ارزیابی مدل‌های مختلف برآورد فرسایش‌پذیری خاک در خاک‌های لسی استان گلستان

نادر جندقی [۱*]، مجتبی قره‌محمودلو [۲]، حجت قربانی واقعی [۳]

۱*- دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس

۲- دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس

۳- دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس

ایمیل نویسنده مسئول: nader.jandaghi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

چکیده تاریخ

برای انجام این تحقیق، پس از بررسی‌های اولیه اجزای واحد ارضی به عنوان واحد کاری در محدوده مورد مطالعه انتخاب شد. برای این منظور ۴۸ نمونه از خاک سطحی در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شد. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک شامل بافت و دانه‌بندی ذرات خاک، آهک خنثی و ماده آلی در آزمایشگاه و ساختمان خاک در صحرا اندازه‌گیری شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش بارافتان در نمونه خاک مغزه‌گیری شده (استوانه‌ای به قطر ۵ و ارتفاع ۵ سانتی متر) اندازه‌گیری شد. سپس مقادیر فرسایش‌پذیری خاک با ۵ روش نموگراف ویشمایر و اسمیت، روش توری، روش واعظی، روش شیرازی و شبیه‌ساز باران تعیین شد. سپس با استفاده از شاخص‌های MAD، RMSE و MAPE، دقت و صحت مدل‌ها مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل واعظی بیشترین دقت را برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی دارد (RMSE=۰,۰۰۲۲۵)، اما این روش فرسایش‌پذیری خاک را ۳۴ درصد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. بعد از روش واعظی، روش شیرازی برای برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک مناسب‌تر بوده است (RMSE=۰,۰۳۶۰۰). نتایج همچنین نشان داد که سه روش شیرازی، توری و نموگراف ویشمایر و اسمیت برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک به ترتیب ۱۱/۲، ۲۱/۹ و ۱۸/۶ برابر نسبت به داده‌های واقعی بیش‌برآوردی داشته است.

کلمات کلیدی

"فرسایش‌پذیری خاک"، "روش توری "، "روش شیرازی"، "روش واعظی "، " اراضی لسی "

۱- مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و نیاز به توسعه منابع جدید برای تامین امنیت غذایی و اجتماعی، باعث عدم تعادل هیدرولوژیکی و اکولوژیکی منابع طبیعی شده که این امر منجر به تشدید روند فرسایش خاک نسبت به حد مجاز آن در ایران شده است. در حال حاضر فرسایش خاک یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است (رفاهی، ۱۳۹۴). لذا شناسایی نقاط حساس به فرسایش خاک و چگونگی توزیع مکانی آن کمک شایانی به کنترل هدررفت خاک خواهد کرد. یکی از پارامترهای کلیدی برای شناسایی و تشخیص خاک‌های حساس به فرسایش استفاده از عامل فرسایش‌پذیری خاک است (عیدی و همکاران، ۱۳۹۹: Bahrami et al., ۲۰۰۵؛ واعظی و همکاران، ۱۳۸۸). فرسایش‌پذیری خاک، مقاومت خاک در برابر جدا شدن و انتقال ذرات است و به نوعی بیانگر پتانسیل بالقوه خاک به فرسایش است. بنابر تعریف ویشمایر و اسمیت مقدار شاخص فرسایش‌پذیری خاک از نسبت فرسایش در منطقه به عامل بارندگی ($R=\sum EI_{30}$) در کرت استاندارد محاسبه می‌شود (رفاهی، ۱۳۹۴).

برای محاسبه شاخص فرسایش‌پذیری خاک از دو روش مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود. روش مستقیم علی‌رغم داشتن دقت مناسب در تعیین شاخص فرسایش‌پذیری خاک، به دلیل صرف وقت و هزینه بالا، مورد توجه کارشناسان نمی‌باشد، لذا تلاش‌ها به استفاده از روش‌های غیرمستقیم متمرکز شده است (Vaezi et al., ۲۰۰۸). تاکنون روش‌های غیرمستقیم مختلفی برای تعیین عامل فرسایش پذیری خاک معرفی شده است. یکی از روش‌های غیرمستقیم و مرسوم برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک استفاده از روش نموگراف ویشمایر و اسمیت است که برای اراضی غیرآهکی ایالات متحده ارائه شده است (Wischmeier and Smith, ۱۹۷۸). مطالعات صحرایی بیش از ۱۰۰۰۰ کرت-پلات در خاک‌های غیرآهکی نواحی نیمه‌مرطوب نشان داد که عامل فرسایش‌پذیری خاک از بین ۲۸ پارامتر موثر بر آن، بیشتر از همه تحت تأثیر پنج ویژگی خاک شامل درصد شن، مجموع درصد سیلت و شن خیلی ریز، درصد ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری نیمرخ خاک قرار دارد (Morgan,۱۹۹۵).استفاده از روش نموگراف ویشمایر و اسمیت برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک‌های آهکی، لسی و یا گچی کارایی ندارد زیرا که این روش برای خاک‌های غیرآهکی بسط و توسعه داده شده است. واعظی و همکاران (۱۳۸۸) در گزارشی اظهار داشتند که استفاده از روش نموگراف ویشمایر و اسمیت برای خاک‌های آهکی ایران برآورد صحیحی از مقدار فرسایش‌پذیری ارایه نمی‌دهد.

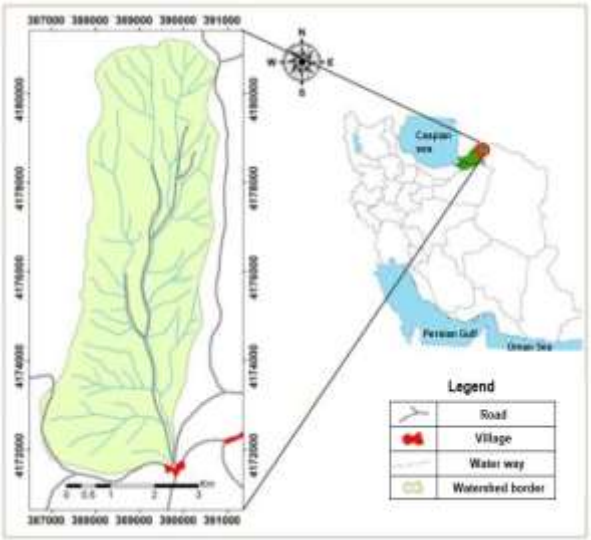
لس‌ها یکی از مهم‌ترین واحدهای رسوبی کواترنر قلمداد شده که در سطح استان گلستان از شرق به غرب گسترش یافته‌اند (امیری و همکاران، ۱۳۹۸). این رسوبات سطحی بالغ بر ۳۰۰۰ کیلومترمربع (معادل ۱۵ درصد) از سطح استان گلستان را پوشانده‌اند (فیض‌نیا، ۱۳۹۶) و دارای درصد بالایی از آهک در ترکیبات خود می‌باشد (ایزانلو، ۱۴۰۱). با توجه به اهمیت لس‌ها در ایجاد انواع فرسایش و از آنجا که بیشتر فرم تپه‌ماهورهای استان گلستان از این نوع خاک تشکیل شده است، بررسی عامل فرسایش‌پذیری در اراضی لسی اطلاعات خوبی در مورد توان بالقوه خاک به فرسایش ارایه خواهد داد و این امر می‌تواند در چگونگی بهره‌برداری از آن و اقدامات حفاظتی موثر باشد.

تاکنون مطالعات مختلفی جهت برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک در ایران و خارج از کشور انجام شده است که در ذیل به برخی از آنها اشاره می‌شود:ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۰٤) در خاک‌های لسی کشور چین مقدار فرسایش‌پذیری خاک را با استفاده از نموگراف ویشمایر و اسمیت ۰/۰۶۱۰ تا ۰/۰۸۸۴ مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورده کرده‌اند که این مقدار ۳/۳ تا ۸/۴ برابر بیشتر از مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بوده است. این بدان معناست که استفاده از روش نموگراف برای تخمین فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مقدار واقعی بوده است. حسین و همکاران (Hussein et al., ۲۰۰۷) در تحقیقی به ارزیابی تغییرات مقدار فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از دو روش نموگراف ویشمایر و اسمیت و روش کرت استاندارد در دو منطقه با بافت خاک‌های متفاوت لومی و لوم سیلتی در شمال کشور عراق پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مقدار این عامل به روش نموگراف ویشمایر و اسمیت ۰/۰۲۷ تا ۰/۰۶۹ مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر بوده که این مقدار ۱۰/۹ تا ۱۲/۷ برابر بیشتر از مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در شرایط کرت استاندارد گزارش شده بود. در پژوهشی دیگری برای برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک در حوزه آبخیز انسای در کشور چین که شامل فلات لسی است از ۵ روش EPIC، معادله نموگراف، معادله نموگراف اصلاح‌شده، مدل شیرازی و مدل توری استفاده شد (Zhao et al., ۲۰۱۸). نتایج این تحقیق نشان داد مدل‌های شیرازی و توری به‌عنوان مدل‌های بهینه برای حوزه آبخیز انسای مناسب بوده و مدل‌های نموگراف و نموگراف اصلاح‌شده موردتایید نبودند. در این حوزه مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از نموگراف ۰/۰۴۶ تا ۰/۰۹۲ مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورد شده بود. من و همکاران (Man et al., ۲۰۲۰) در بررسی اثر ویژگی‌های دو نوع خاک متفاوت بر عامل فرسایش‌پذیری در دو حوزه آبخیز چنگی (خاک آهکی) و جیولونگ (خاک بسیار اسیدی) کشور چین، با استفاده از روش (EPIC) اقدام به محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک نموده‌اند. نتایج نشان داد در هر دو حوزه مقدار فرسایش‌پذیری خاک بین ۰/۰۱۸-۰/۰۰۹ متغیره بوده که در خاک‌های آهکی به دلیل تجمع آهک و افزایش نفوذپذیری، بیش‌برآوردی داشته است. ژو و همکارن (Zhu et al., ۲۰۲۱) مقدار و ریسک فرسایش‌پذیری خاک‌های جنوب شرقی چین را بر اساس تکنیک زمین‌آماری برای ۱۰۱ نمونه خاک سطحی مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق برای محاسبه مقدار فرسایش‌پذیری از ۵ مدل اپیک، نموگراف ویشمایر و اسمیت، توری، شیرازی و مدل وانگ استفاده شد. نتایج آنها نشان داد مدل اپیک نسبت به سایر مدل‌ها در برآورد عامل فرسایش‌پذیری از کارایی بهتری برخوردار بوده است. ژو و همکارن (Zhu et al., ۲۰۲۲) تاثیر ویژگی‌های خاک بر مقدار فرسایش-پذیری خاک‌های سطحی و زیرسطحی را در نواحی کوهستانی شرق چین بررسی کردند. در این تحقیق برای محاسبه فرسایش‌پذیری خاک از سه مدل اپیک، توری و شیرازی استفاده شده بود. نتایج آنها نشان داد که مقدار فرسایش‌پذیری خاک بین ۰,۰۲۵ تا ۰,۰۳۳۱ بوده است و نکته جالب‌تر آن که مقدار فرسایش‌پذیری خاک زیرسطحی به مراتب بیشتر از خاک‌های سطحی بدست آمده بود. بررسی اثر ویژگی‌های خاک بر مقدار فرسایش‌پذیری نشان داد که بین این عامل با pH و جرم ویژه ظاهری خاک هیچ‌گونه همبستگی وجود نداشته و رابطه ریاضی مشخصی هم بین این عامل با رطوبت و مقدار کربن آلی خاک مشاهده نشد. در پژوهشی دیگر عرب‌خدری و همکاران (۱۳۹۹) کارایی ۴ معادله فرسایش‌پذیری خاک شامل USLE، EPIC، واعظی و D_g را در شرایط آزمایشگاهی به کمک باران‌ساز مصنوعی بررسی کردند. نتایج پژوهش حکایت از کم‌برآوردی مدل واعظی و بیش‌برآوردی روش نموگراف ویشمایر و اسمیت داشته است.با توجه به مطالعات واعظی و همکاران (۱۳۸۸) که مقدار فرسایش‌پذیری را در خاک‌های آهکی ۱۰/۷۵ برابر کمتر از مقدار برآوردشده آن به روش نموگراف ویشمایر و اسمیت گزارش نموده‌اند، کارایی استفاده از روش نموگراف ویشمایر و اسمیت و دیگر مدل‌های برآورد فرسایش‌پذیری در خاک‌های لسی حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی با منشا رسوبات آهکی جای تردید دارد. در این تحقیق سعی می‌شود با تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی استان گلستان با استفاده از باران‌ساز و همچنین سایر مدل-های غیرمستقیم رایج، کارایی مدل‌ها نسبت روش باران‌ساز در برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک مورد ارزیابی قرار گرفته شود. لذا هدف اصلی پژوهش حاضر، تعیین مناسب‌ترین مدل تجربی برای تعیین شاخص فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی با منشا رسوبات آهکی در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی واقع در شرق استان گلستان می‌باشد.

روش انجام تحقیق

- **محدوده مورد مطالعه**

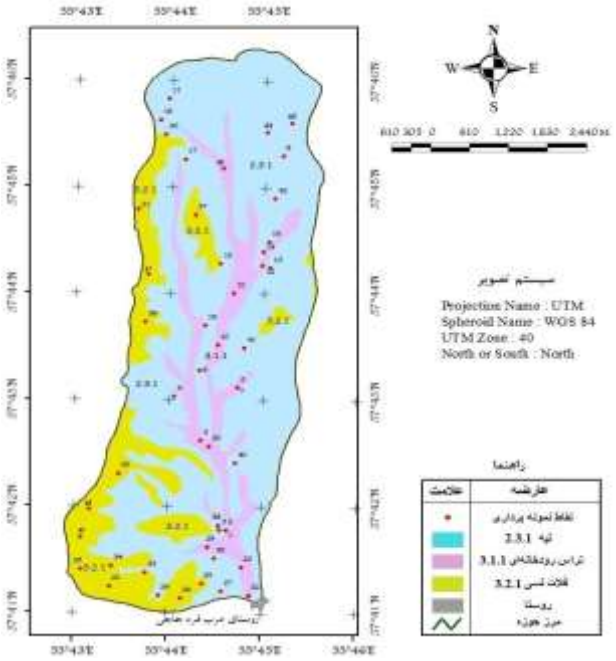
حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی در استان گلستان و در شرق شهرستان کلاله و شهر فراغی واقع شده است. این حوزه به‌عنوان یک حوزه تیپیک لسی با مساحتی ۲۵۹۶ هکتار، در محدوده طول جغرافیایی ´۴۳ °۵۵ تا ۴۵ °۵۵ شرقی و عرض جغرافیایی ´۴۱ °۳۷ تا ´۴۶ °۳۷ شمالی واقع شده است (شکل۱). بارش متوسط سالانه این حوزه ۴۸۹ میلی‌متر و دارای اقلیم نیمه‌خشک معتدل می-باشد. منطقه موردمطالعه از منظر زمین‌شناسی جزو حوزه‌های رسوبی کپه‌داغ در دوره ژوراسیک است و از نظر سنگ‌شناسی دارای تنوع محدود بوده و تنها از رسوبات آهکی و لسی تشکیل شده است (ایزانلو، ۱۴۰۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز عرب قره‌حاجی در کشور و استان گلستان

- **روش نمونه‌برداری و انجام مطالعه**

با انجام بازدیدهای میدانی، ۳ تیپ اصلی خاک شامل تپه (۶۷/۱ درصد)، فلات‌های لسی (۲۰/۶درصد) و تراس‌های آبرفتی (۱۲/۳درصد) در این آبخیز شناسایی شد و اجزاء واحد اراضی به‌عنوان واحد کاری انتخاب شد. نمونه‌برداری از خاک در هر یک از اجزای واحد اراضی بر اساس نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ به روش تصادفی از تمام نقاط حوزه انجام شد. با توجه به کوچک بودن و تنوع کم این حوزه از لحاظ ویژگی‌های لیتولوژی، خاک‌شناسی و پوشش گیاهی، ۲۴ نمونه از تیپ تپه، ۱۳ نمونه از تیپ فلات لسی و ۱۱ نمونه از تیپ تراس آبرفتی و در کل ۴۸ نمونه از کل حوزه از لایه سطحی خاک در عمق ۱۰-۰ سانتی-متر برداشت شد (شکل۲). در این تحقیق از هر مقطع ۲ سری نمونه برداشت شد. سری اول نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی برای انجام آزمایشات فیزیکوشیمیایی خاک و سری دوم توسط سیلندر مخصوص نمونه‌برداری (شکل ۳) دستگاه اتوماتیک اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای تعیین نفوذ نهایی آب به خاک به روش بارافتان برداشت شد (شکل ۴).در آزمایشگاه بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, ۱۹۸۶)، دانه‌بندی خاک به روش الک خشک، ماده‌آلی خاک به روش سوزاندن تر (Nelson and Sommers, ۱۹۸۲) و درصد آهک خنثی به روش نلسون اندازه‌گیری شد. برای تعیین نوع ساختمان خاک از تجربه کارشناس خاک‌شناسی این تحقیق در صحرا استفاده شد.



شکل ۲- نقشه پراکنش نقاط نمونه‌برداری در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

شکل ۳- نمونه‌برداری از لایه سطحی خاک توسط سیلندر نمونه‌برداری خاک

شکل ٤- دستگاه اتوماسیون اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش بارافتان

همچنین برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از دستگاه اتوماسیون هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مدل FH۱۰ ساخت شرکت ابزار خاک توسعه سهند استفاده شد. این دستگاه قادر است هم‌زمان هدایت هیدرولیکی اشباع ۱۰ نمونه خاک را به روش بارافتان با n بار قرائت تکرار کند. در این تحقیق تعداد تکرار قرائت برای هر نمونه خاک ۱۵ بار تعیین شد و پایان آزمایش زمانی انتخاب شد تا حداقل سه قرائت کمتر از ۵ درصد با هم اختلاف داشته باشند.برای محاسبه فرسایش-پذیری خاک استراتژی‌های بسیاری وجود دارد از جمله اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، ابزارهای اندازه‌گیری، مدل‌های ریاضی و گرافیکی (Wei, et al., ۲۰۱۷). اگر چه اندازه‌گیری مستقیم فرسایش خاک در کرت‌های استاندارد تحت تاثیر بارندگی طبیعی می‌تواند برآورد دقیق‌تری از میزان فرسایش‌پذیری خاک را ارائه کند اما این روش عمدتا وقت‌گیر و پرهزینه است لذا مورد توجه کارشناسان نمی‌باشد (Vaezi, et al., ۲۰۰۸). تاکنون روش‌های مختلفی برای تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش غیرمستقیم معرفی شده است که در زیر تنها به ۴ روش مورد استفاده در این تحقیق اشاره خواهد شد.

- **محاسبه فاکتور K به روش توری (Torri)**

توری و همکاران (Torri et al., ۱۹۹۷) با استفاده از داده‌های اندازه ذرات خاک و همچنین محتوای مواد آلی خاک مدل خود را ارایه داده‌اند. از مزایای این روش تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک تنها با استفاده از ۲ پارامتر ماده آلی و بافت خاک است. روش توری از رابطه (۱) تعیین شد:

$$K = 0.0293\left(0.65 - D_g + 0.24D_g^2\right) \times \exp \qquad (۱)$$

$$\{-0.0021\frac{OM}{C}-0.00037\left(\frac{OM}{C}\right)^2-4.02C+1.72C^2\}$$

که در آن: OM درصد مواد آلی خاک و C درصد رس خاک می‌باشد. در این رابطه D_g از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$D_g=\sum f_i\ lg\sqrt{d_i\ d_{i-1}} \quad (۲)$$

که در آن: D_g میانگین هندسی قطر ذرات خاک، d_i و d_{i-1} به ترتیب حداکثر و حداقل قطر کلاس i (mm) و fi درصد فراوانی اندازه ذرات مربوط به کلاس i است.

- **محاسبه فاکتور K به روش واعظی**

نموگراف واعظی و همکاران با هدف محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک در اراضی آهکی ایران طراحی و ابداع شده است (واعظی و همکاران، ۱۳۸۸). برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش واعظی و همکاران از رابطه (۳) استفاده شد:

$$K_{factor}=0.000373+0.00016\ Silt-$$
$$۰,۰۰۲۱۶\ \square\square-۰.۰۰۰۱۷\ \square\square\square \quad (۳)$$

که در آن: K عامل فرسایش‌پذیری خاک بر حسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر، Silt بیانگر درصد سیلت، OM درصد ماده آلی خاک و TNV آهک خنثی بر حسب درصد می‌باشد.

- **محاسبه فاکتور K به روش شیرازی**

شیرازی و همکاران (Shirazi et al., ۱۹۸۸) برای محاسبه فاکتور K مدلی را ارایه دادند که تنها به میانگین هندسی قطر ذرات خاک وابسته است. برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش شیرازی از رابطه (۴) استفاده شد:

$$K=7.594\{0.0034+0.0405\ e^{-0.5\left[\frac{log(D_g)+1.659}{0.7101}\right]^2}\} \quad (۴)$$

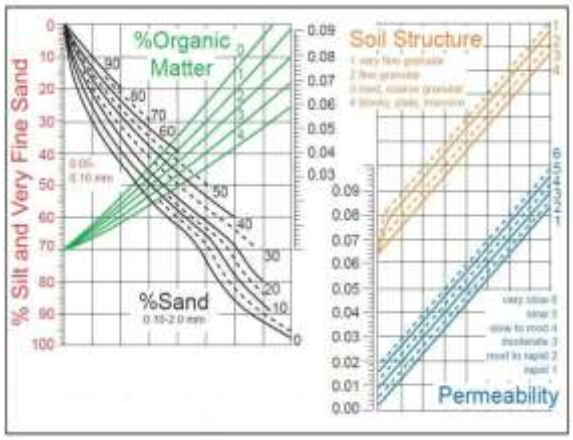
در این رابطه D_g از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$D_g\ (mm)=e^{0.01\sum f_i\ln m_i} \quad (۵)$$

که در آن: fi درصد فراوانی اندازه ذرات مربوط به کلاس i، mi میانگین حسابی محدودیت اندازه ذرات برای i امین کسر به میلی‌متر می‌باشد.

- **محاسبه فاکتور K به روش نموگراف ویشمایر و اسمیت**

برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش نموگراف ویشمایر و اسمیت، مقادیر پنج پارامتر شامل مجموع درصد ذرات سیلت و شن خیلی‌ریز، درصد شن درشت (بزرگتر از ۰/۲ میلی‌متر خاک)، درصد ماده آلی، کد ساختمان خاک و کلاس نفوذپذیری خاک برای هر یک از ۴۸ نمونه خاک مشخص و سپس با کمک نموگراف ویشمایر و اسمیت (شکل ۵) مقدار فرسایش‌پذیری خاک بر حسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر محاسبه شد.



شکل ۵- نموگراف فرسایش‌پذیری خاک در روش ویشمایر و اسمیت

- **محاسبه فاکتور K به روش واقعی**

برای اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری واقعی خاک در هر یک از اجزای واحد اراضی موجود در حوزه آبخیز یک کرت ۱*۱ متر مربع انتخاب شد. سپس با استفاده از شبیه‌ساز باران، مقدار فرسایش‌پذیری خاک در هر ۳ تیپ اندازه‌گیری شد. برای این منظور شدت بارش نیم‌ساعته با دوره بازگشت ۲۵ سال برای باران‌ساز در نظر گرفته شد که مقدار آن بر اساس آمار ۳۰ ساله ایستگاه هواشناسی قپان (در مجاور حوزه) و با استفاده از روش شواب-سبحانی بدست آمده است. با استفاده از رابطه (۶) مقدار فرسایش‌پذیری واقعی هر کرت تعیین شد.

$$K=\frac{A}{R} \quad (۶)$$

که در آن: K عامل فرسایش‌پذیری خاک بر حسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر، A مقدار فرسایش واقعی بر حسب تن در هکتار در سال و R عامل فرسایندگی باران بوده که بر اساس شاخص $EI_{۳۰}$ محاسبه شده است. جهت تعیین شاخص $EI_{۳۰}$ نیاز به محاسبه انرژی جنبشی باران بوده که از رابطه (۷) محاسبه شد (رفاهی، ۱۳۹۴).

$$KE=11.87+8.73log_{10}I \quad (۷)$$

که در آن: I شدت بارندگی بر حسب میلی‌متر بر ساعت و KE انرژی جنبشی باران بر حسب ژول بر مترمربع در میلی‌متر است. برای تعیین شدت بارندگی از آمار باران‌نگار ایستگاه کچیک در مجاور حوزه مورد مطالعه استفاده شد. در ادامه برای تهیه نقشه تغییرات و پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک در سطح حوزه آبخیز برای هر یک از مدل‌ها، از نرم‌افزار ArcGIS و از روش درون‌یابی (IDW) استفاده شد. هدف اصلی در روش درون‌یابی مشخص نمودن میزان یک پارامتر در مناطقی است که در آنها نمونه‌برداری انجام نشده است.

- **ارزیابی مدل‌های مورد استفاده**

تاکنون شاخص‌های استاندارد مختلفی برای مقایسه مقادیر حاصل از مدل و مقادیر واقعی ارایه شده است. در این تحقیق جهت اعتبارسنجی مدل‌ها از ۳ شاخص استاندارد MAD، RMSE و MAPE (روابط ۸ تا۱۰) استفاده شد (Moriasi, ۲۰۰۷):

الف- شاخص میانگین قدرمطلق فاصله[۱]

$$MAD = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}|Y_t - \hat{Y}_t| \quad (۸)$$

ب- شاخص مربع میانگین خطا[۲]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(Y_t - \hat{Y}_t)^2}{m}} \quad (۹)$$

ج- شاخص خطای میانگین مربعات[۳]

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{m}(Y_t - \hat{Y}_t)^2}{m} \quad (۱۰)$$

که در آن: $\hat{Y}_t$ مقادیر برازش‌شده و یا پیش‌بینی‌شده فاکتور K توسط مدل، Y_t مقدار واقعی فاکتور K و m تعداد نمونه یا مقادیر پیش‌بینی می‌باشد. هر مدلی که مقدار شاخص استاندارد کمتری داشته باشد، دارای دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌هاست.

۲- نتایج

جدول (۱) خلاصه نتایج آزمایشگاهی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک را به تفکیک اجزای واحد اراضی نشان می‌دهد. براساس نتایج جدول (۱) بیشترین مقدار ماده آلی در تیپ تراس آبرفتی و کمترین آن در تیپ فلات لسی مشاهده شد. به طور کلی متوسط مقدار ماده آلی در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه بیش از یک درصد است و نسبتا قابل قبول است اما به‌دلیل چرای بیش از حد و فعالیت-های کشاورزی در این فلات‌ها، امکان هماوری ذرات خاک با ماده آلی داده نشده است و لذا مواد آلی طبیعی در خاک نتوانسته است در کنترل فرسایش خاک در منطقه نقش اصلی خود را ایفا کند.

مطابق با جدول (۱) بیشترین مقدار پراکنش درصد آهک در تیپ تراس آبرفتی مشاهده شد. میانگین درصد آهک در سه تیپ تراس آبرفتی، تپه و فلات لسی به‌ترتیب ۲۸/۳۰، ۳۰/۰۳ و ۲۷/۷۶ اندازه‌گیری شده که این مقدار بیشتر از حد استاندارد آهک (۱۵ درصد) در خاک برای ایجاد خاکدانه‌های پایدار در حالت خیس است. حضور مواد آلی و آهک در خاک می‌تواند تا حدودی از اثرات مخرب ذرات سیلت به فرسایش شیاری و خندقی موجود در منطقه بکاهد. اما به‌نظر می‌رسد که درصد آهک بیش از حد استاندارد و عدم هماوری مواد آلی خاک موجب کاهش پایداری خاکدانه‌ها خاک منطقه شده بود. به طوری که اغلب منطقه مطالعاتی برحسب نظر تیم کارشناسی تحقیق از کد کلاس ساختمان خاک ۴ برخوردار بودند.

جدول ۱- خلاصه نتایج ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

پارامتر	% CS	% v.f.Sa+Si	مواد آلی %	آهک %	شن %	سیلت %	رس %	تیپ خاک
حداقل	۰/۱۶	۸۱/۱۳	۰/۸۵	۲۴/۶۲	۱۶	۵۲	۳/۵	تراس آبرفتی
حداکثر	۵/۵	۹۳/۳۴	۷/۱۸	۴۲/۸۷	۴۰/۵	۷۶	۱۴	
میانگین	۲/۰۸	۸۹/۳۵	۳/۹۳	۲۸/۳۰	۳۰/۲۰	۶۰/۸	۹/۲۹	
انحراف-معیار	۱/۶۹	۳/۴۶	۲/۱۳	۵/۲۰	۷/۶۵	۷/۷۲	۳/۳۴	
تعداد نمونه	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	
حداقل	۰/۴۱	۷۴/۱۳	۱/۱۵	۲۴/۲۵	۲۴	۴۲	۴	فلات لسی
حداکثر	۵/۲۱	۹۴/۵۴	۳/۳۹	۲۹/۷۵	۴۶	۶۴	۱۶	
میانگین	۲/۳۵	۸۵/۹۰	۱/۸۷	۲۷/۷۶	۳۴/۷	۵۴/۱	۹/۱	
انحراف-معیار	۱/۷۳	۷/۱۰	۰/۷۶	۱/۵۹	۵/۴۸	۶/۴۶	۴/۴۸	
تعداد نمونه	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	
حداقل	۰/۴۷	۷۸/۸۶	۰/۱۷	۲۴	۱۸	۴۲	۰	تپه
حداکثر	۵/۳۱	۹۸/۵۲	۴/۰۷	۳۷/۲۵	۶۴	۷۶	۱۸	
میانگین	۱/۹۷	۸۶/۶۰	۲/۱۵	۳۰/۰۳	۳۲/۳۸	۵۶/۱۸	۱۱/۳۷	
انحراف-معیار	۱/۵۱	۵/۹۴	۰/۹۴	۲/۵۵	۹/۴۸	۹/۲۸	۵/۷۹	
تعداد نمونه	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	

CS%درصد ذرات شن درشت (بزرگتر از ۰/۲ میلی‌متر خاک) و (v.f.Sa+Si٪) مجموع درصد ذرات سیلت و شن خیلی‌ریز

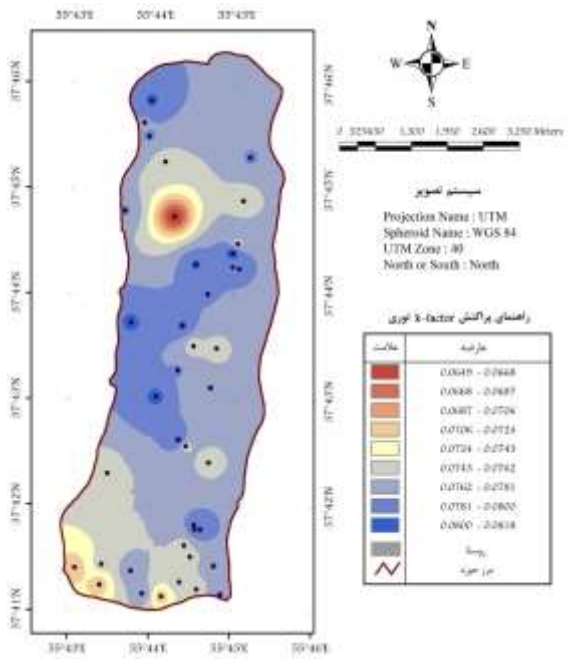
در بررسی درصد ذرات تشکیل‌دهنده خاک مشخص شد که بخش غالب ذرات خاک در این حوزه متعلق به سیلت بوده و بعد از آن شن و رس به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. مقدار سیلت عامل مهمی در فرسایش‌پذیری خاک محسوب شده که به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار آن در تیپ‌های تراس آبرفتی و فلات لسی مشاهده شد (جدول۱). بر این اساس می‌توان انتظار داشت که بیشترین مقدار فرسایش شیاری، تونلی و خندقی در تراس های آبرفتی اراضی لسی منطقه مورد مطالعه مشاهده شود. بررسی بافت خاک در این حوزه نشان داد که ۹۰ درصد نمونه‌های برداشت‌شده دارای بافت لوم سیلتی و ۱۰ درصد دیگر متعلق به بافت خاک لوم است. این بافت خاک می‌تواند حکایت از نفوذپذیری نسبتا متوسط حوزه به آب داشته باشد و از آنجایی که درصد آهک خاک منطقه مورد مطالعه بالاست و نیز به دلیل بالا بودن سیلت احتمال وقوع فرسایش‌های تونلی زیاد باشد.

در پژوهش حاضر آزمایش نفوذپذیری خاک با استفاده از روش بارافتان اندازه‌گیری و مشخص شد که نمونه‌های برداشت شده در دو کلاس نفوذپذیری متوسط (۵/۰۸–۱/۵۲ سانتی‌متر بر ساعت) و نسبتا آهسته (۱/۵۲–۰/۵۱ سانتی‌متر بر ساعت) واقع شده‌اند. ۶۹ درصد نمونه‌های برداشت شده در کلاس متوسط نفوذپذیری و مابقی در کلاس نسبتا آهسته بوده‌اند. با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص شد تمام نمونه‌های برداشت شده در کلاس ۴ طبقه‌بندی ساختمان خاک شامل ساختمان مکعبی، ستونی یا توده‌ای دانه درشت قرار گرفته‌اند.

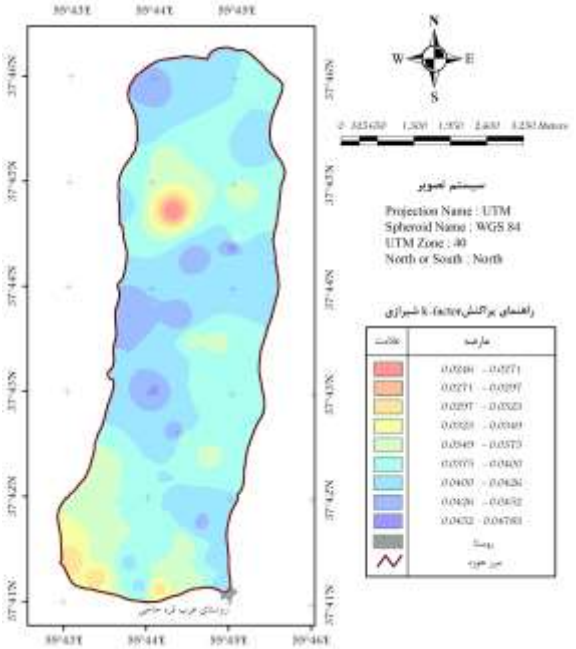
در این تحقیق عامل فرسایش‌پذیری خاک به ۴ روش غیرمستقیم شامل مدل‌های توری، شیرازی، نموگراف ویشمایر و اسمیت و مدل

۱ - Mean Absolute Distance
۲ - Root Mean Squares of Error
۳ - Mean Squared Error

واعظی و همکاران برآورد و سپس با مقادیر واقعی مقایسه شد. شکل-های (۶) تا (۹) نقشه پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده را به ۴ روش مورد استفاده در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی نشان می‌دهد.

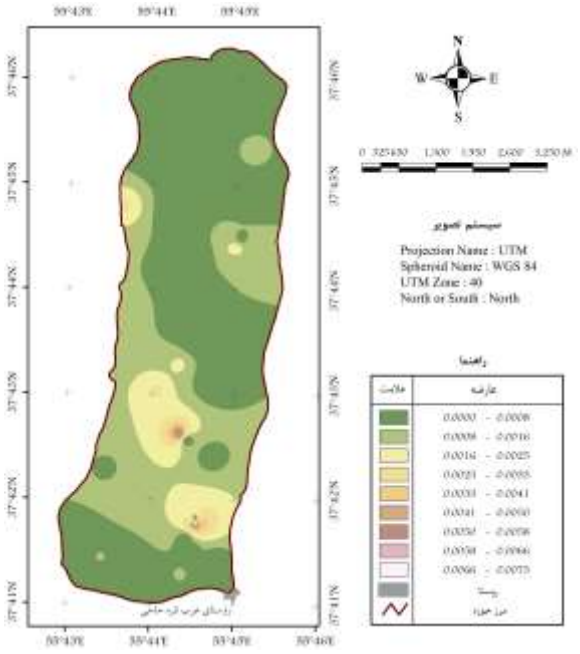


شکل ۶- نقشه پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده به روش توری در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

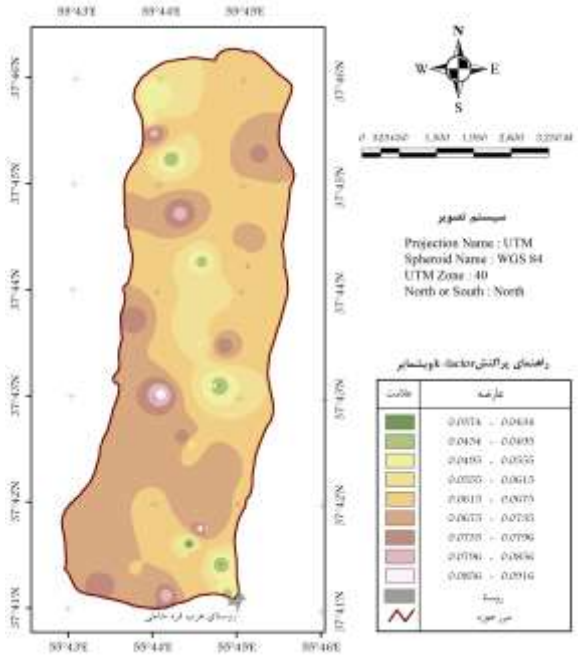


شکل ۷- نقشه پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده به روش شیرازی در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

در محاسبات عامل فرسایش‌پذیری خاک مربوط به روش واعظی و همکاران، برای تعدادی از نمونه‌ها عامل فرسایش‌پذیری خاک قابل محاسبه نبوده است که دلیل آن عدم کارایی مدل در محاسبه فرسایش-پذیری در خاک‌های با درصد آهک زیاد می‌باشد.



شکل ۸- نقشه پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده به روش واعظی و همکاران در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی



شکل ۹- نقشه پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده به روش نموگراف ویشمایر و اسمیت در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

لازم به توضیح است که نموگراف ویشمایر و اسمیت برای خاک‌های غیرآهکی نـواحی‌نیمه‌مرطوب در ایالات متحده آمریکا توسعه یافته و از آنجا که خاک منطقه مورد مطالعه آهکی است انتظار می‌رود که نموگراف ویشمایر و اسمیت روش مناسبی برای برآورد عامل فرسایش-پذیری خاک نباشد. واعظی و همکاران گزارش داده‌اند که مقدار فرسایش‌پذیری در خاک‌های آهکی (حوزه مطالعاتی زنجان با مقدار متوسط آهک ۱۳ درصد) ۱۰/۷۵برابر کمتر از برآورد آن به روش نموگراف ویشمایر و اسمیت بوده است. بررسی نتایج برآورد عامل فرسایش‌پذیری در خاک‌های لسی حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی نیز حکایت از همین واقعیت دارد با این تفاوت که مدل فرسایش‌پذیری

واعظی و همکاران در برخی نقاط مطالعاتی که مقدار آهک آن بیشتر از ۳۰ درصد است قادر به پاسخگویی منطقی نبوده است.

اندازه‌گیری عامل فرسایش‌پذیری واقعی خاک هزینه‌بر و وقت‌گیر است. بر این اساس در این پژوهش در هر تیپ اراضی تنها یک آزمایش انجام شد. محل آزمایش در هر تیپ به گونه‌ای انتخاب شد که معرف شرایط تیپ خاک باشد. بر این اساس، مقدار متوسط عامل فرسایش‌پذیری خاک در ۳ تیپ تراس آبرفتی، تپه و فلات لسی به ترتیب ۰/۰۰۴۴، ۰/۰۰۳۸ و ۰/۰۰۲۴ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر بدست آمد.

تاکنون شاخص‌های استاندارد مختلفی برای مقایسه مقادیر حاصل از مدل و مقادیر واقعی ارایه شده است. در این تحقیق جهت اعتبارسنجی ۴ مدل تجربی مورد استفاده از شاخص‌های MAE، RMSE و MSE استفاده شد. جدول (۲) نتایج اعتبارسنجی مدل‌های تجربی مورد استفاده را جهت برآورد عامل فرسایش‌پذیری K در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج اعتبارسنجی مدل‌های تجربی مورد استفاده جهت برآورد عامل فرسایش‌پذیری K در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

شاخص اعتبارسنجی	مدل مورد استفاده			
	توری	واعظی و همکاران	شیرازی	ویشمایر و اسمیت
MAD	۰/۰۷۳۲۲	۰/۰۰۱۹۶	۰/۰۳۵۷۰	۰/۰۶۲۳۴
RMSE	۰/۰۷۳۲۸	۰/۰۰۲۲۵	۰/۰۳۶۰۰	۰/۰۶۳۸۶
MSE	۰/۰۰۵۳۷	۰/۰۰۱۳۰	۰/۰۰۲۱۱	۰/۰۰۴۰۸

بررسی نتایج اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده (جدول۲) توسط ۳ شاخص MAE، RMSE و MSE نشان داد که استفاده از روش واعظی و همکاران جهت برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین دقت می‌باشد. شاخص‌های محاسبه شده در روش واعظی و همکاران نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده دارای کمترین مقدار بوده لذا کمترین مقدار خطا را نسبت با سایر روش‌ها داراست. در این بررسی همچنین مشخص شد بعد از روش واعظی و همکاران، روش شیرازی برای برآورد عامل فرسایش-پذیری خاک در اراضی لسی حوزه نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر است. روش نموگراف ویشمایر و همکاران بعد از دو روش ذکر شده در جایگاه سوم، و روش توری دارای بیشترین خطا نسبت به سایر روش-های مورد استفاده برای برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی این منطقه بوده است. شکل (۱۰) نیز نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده را در هر ۳ تیپ خاک مورد بررسی و همچنین کل حوزه حوزه عرب‌قره‌حاجی تایید می‌کند. مطابق این شکل مشخص می‌شود که در هر ۳ تیپ تپه، فلات لسی و تراس آبرفتی و همچنین در کل حوزه مناسب‌ترین مدل برای برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک روش واعظی و همکاران بوده ولی نسبت به داده‌های واقعی کم-برآوردی داشته است در حالی که سایر مدل‌های مورد استفاده بیش-برآوردی داشته‌اند.

شکل ۱۰- هیستوگرام مقایسه مقادیر میانگین عامل فرسایش‌پذیری خاک K با روش‌های در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی به تفکیک اجزاء واحد اراضی

٤- نتیجه‌گیری

در معادله جهانی فرسایش خاک مبنای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک استفاده از نموگراف ویشمایر می‌باشد. در نموگراف ویشمایر مبنای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش غیرمستقیم بوده که در اصل برای خاک‌های غیرآهکی مناطق نیمه‌خشک در ایالات متحده آمریکا توسعه یافته است. از آنجا که عمده خاک‌های کشور ایران از نوع آهکی است، خطای به‌کارگیری نموگراف ویشمایر برای چنین خاک-هایی باید مدنظر کاربران قرار بگیرد. واعظی و همکاران گزارش داده‌اند که مقدار فرسایش‌پذیری در خاک‌های آهکی (حوزه مطالعاتی زنجان با مقدار متوسط آهک ۱۳ درصد) ۱۰/۷۵برابر کمتر از مقدار برآورد شده آن به روش نموگراف ویشمایر و اسمیت بوده است. لذا استفاده از نموگراف ویشمایر و اسمیت در خاک‌های لسی حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی با منشا رسوبات آهکی جای تردید دارد. در این تحقیق برای محاسبه مناسب-ترین مدل تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک، از مدل‌های واعظی و همکاران، توری، شیرازی و نموگراف ویشمایر استفاده و با داده‌های واقعی مقایسه شد. بررسی نتایج اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده توسط ۳ شاخص MAE، RMSE و MSE نشان داد که استفاده از روش واعظی و همکاران جهت برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین دقت می‌باشد. این نتیجه در هر ۳ تیپ خاک مورد بررسی و همچنین در کل حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی تایید شد. در این بررسی مشخص شد مقادیر فرسایش-پذیری برآوردی به روش واعظی در این حوزه با داده‌های واقعی نسبتا نزدیک بوده ولی برآورد کمتری نسبت به مقادیر واقعی داشته است.

در این بررسی همچنین مشخص شد بعد از روش واعظی و همکاران، روش شیرازی برای برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی حوزه نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر است. روش شیرازی در هر ۳ تیپ خاک مورد بررسی و همچنین در کل حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی بیش‌برآوردی داشته است که این مقدار در کل حوزه ۱۱/۲ برابر بیشتر از داده‌های واقعی است. بعد از دو روش فوق، به ترتیب روش‌های نموگراف ویشمایر و توری عملکرد ضعیف‌تری در تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک در اراضی آهکی منطقه مورد مطالعه داشته‌اند. روش‌های نموگراف ویشمایر و توری نیز مشابه با روش شیرازی در تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک بیش‌برآوردی داشته به‌طوری‌که این مقدار در کل حوزه، در روش نموگراف ویشمایر۱۸/۶ و در روش توری

۲۱/۹ برابر بیشتر از داده‌های واقعی بوده است. نتایج این پژوهش با مطالعات انجام شده توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۰۴) در کشور چین، حسین و همکاران (Hussein et al., ۲۰۰۷) در شمال کشور عراق که اظهار داشته‌اند روش نموگراف ویشمایر و اسمیت نسبت به داده‌های واقعی بیش‌برآوردی دارد، همخوانی دارد. همچنین با نتایج مطالعات عری-خدری و همکاران (۱۳۹۹) که اظهار داشته‌اند مدل واعظی نسبت به داده‌های واقعی کم‌برآوردی و روش نموگراف ویشمایر و اسمیت بیش-برآوردی داشته است، همراستا است اما با نتایج مطالعات ژو و همکارن (Zhu et al., ۲۰۲۱) در کشور چین همخوانی ندارد. بیش‌برآوردی شاخص فرسایش‌پذیری خاک برای مدل‌های مورد استفاده (به‌جز روش واعظی) به‌دلیل وجود درصد آهک بیش از حد استاندارد و عدم هماوری مواد آلی در خاک اتفاق افتاده که موجب کاهش پایداری خاکدانه‌ها در منطقه شده است. نتایج این بررسی با مطالعات من و همکاران (Man et al., ۲۰۲۰) در کشور چین که اظهار داشته‌اند در فرسایش‌پذیری خاک‌های آهکی به دلیل تجمع آهک و افزایش نفوذپذیری، بیش-برآوردی وجود داشته است، همسویی دارد. بر اساس مطالعات واعظی و همکاران در منطقه زنجان که نشان داد مقدار آهک کمتر از ۱۳ درصد نقش کنترلی بر مقدار عامل فرسایش‌پذیری داشته اما این مدل قادر به محاسبه فرسایش‌پذیری خاک در مناطق با آهک بیشتر از ۳۰ درصد نیست. لذا استفاده از مدل واعظی و همکاران در تعدادی از نمونه‌ها حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی که مقدار آهک خنثی در آنها بالای ۳۰ درصد بود قادر به محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک نبوده است. با توجه به توضیحات فوق به‌نظر می‌رسد در حال حاضر برای مناطقی که درصد آهک در خاک سطحی آنها کمتر از ۳۰ درصد است استفاده از روش واعظی و همکاران مناسب‌تر از روش ویشمایر و اسمیت باشد و برای مناطقی که درصد آهک در آنها بیشتر از ۳۰ درصد می‌باشد، مدل نیاز به واسنجی و بروزرسانی دارد.

منابع

- امیری، ز.، خرمالی، ف.، بایرام کمکی، چ. ۱۳۹۸. نقشه پراکنش واحدهای مختلف مواد مادری در فلات لسی شرق استان گلستان با استفاده از تکنیک سنجش‌ازدور (منطقه مطالعاتی: آق‌بند). فصلنامه کواترنری ایران. ۵ (۱): ۵۸-۴۷.
- ایزانلو، ص.، قره‌محمودلو، م.، جندقی، ن.، قربانی واقعی، ح. ۱۴۰۱. تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع سطحی و زیرسطحی در خاک‌های لسی شرق استان گلستان، مجله تحقیقات کاربردی خاک، ۱۰ (۲) : ۱۱۹-۱۰۳.
- رفاهی، ح. ق. ۱۳۹۴. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ هفتم. انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۴ صفحه.
- عرب‌خدری، م.، گرامی، ز.، شادفر، ص.، بیات، ر.، پرویزی، ی.، نبی‌پی لشکریان، س. مقایسه کارایی چند معادله برآورد شاخص فرسایش‌پذیری مدل USLE در شرایط آزمایشگاهی. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۷): ۱۷۳۵-۱۷۲۶.
- عیدی، ر.م.، جندقی، ن.، قره محمودلو، م.، قربانی واقعی، ح.، محمدی استادکلایه، ا. ۱۳۹۹. مقایسه کارایی مدل واعظی و نموگراف ویشمایر جهت برآورد فرسایش پذیری خاک در اراضی لسی (مطالعه موردی حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی استان گلستان). مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۱۰ (۴): ۳۹-۵۷.
- فیض‌نیا، س. ۱۳۹۶. رسوب‌شناسی کاربردی با تاکید بر فرسایش خاک و تولید رسوب. انتشارات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۳۸۲ صفحه.
- واعظی، ع.، بهرامی، ح.، صادقی، ح. ر.، مهدیان، م. ح. ۱۳۸۸. نموگرافی جدید برای برآورد عامل فرسایش‌پذیری (K) در بخشی از خاک‌های نواحی نیمه‌خشک در شمال‌غربی ایران. مجله علوم آب و خاک، ۱۳ (۴۹):۸۰-۶۹
- Bahrami, H. A., Gorbani Vaghei, H. Gorbani Vaghei, B. Tahmasbipour, N. and Taliey-Tabari, F. ۲۰۰۵. A New Method for Determining the Soil Erodibility Factor Based on Fuzzy System. Journal of Agricultural Science and Technology. 7:115-123.
- Gee, G. W., Bauder, J. W. 1986. Particle Size Analysis. In: Methods of Soil Analysis, Part A. Klute (ed.). 2 Ed., Vol. 9 nd. Am. Soc. Agron., Madison, WI, P. 383-411.
- Hussein, M., Kariem, H., Othman, A. K. 2007. Predicting soil erodibility in northern Irag natural runoff data. Journal of soil & tillage research. 94: 220-228.
- 14- Morgan, R. P. C. 1995. Soil erosion and conservation. Second edition, Longman. P: 29-30.
- Man, L., Guilin, H., Xiaoqiang, L., Shitong, Z., Wenxiang, Z. and Qian, Z. 2020. Effects of soil properties on k factor in the gratite and limestone regions of China.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. Veith, T.L. 2007. *Model* Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 50(3): 885-900.
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, P. 539-579.

- Shirazi, M. A., Hart, J. W., and Boersma, L. 1988. A unifying quantitative analysis of soil texture: improvement of precision and extension of scale, Soil Sciences Society of American Journal, 52, ۱۸۱–۱۹۰.
- Torri, D., Poesen, J., and Borselli, L.: Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset, Catena, 31, 1–22.
- Vaezi, A.R., Sadeghi, H.R., Bahrami, H.A., Mahdian, M.H. 2008. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. Geomorphology, 97 (3-4): 414-423.
- Wei, H., Zhao, W.W., and Wang, J. 2017. The optimal estimation method for K value of soil erodibility: A case study in Ansai Watershed, Science of Soil and Water Conservation, 15, 52–62.
- 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.
- 24- Zhang, K., Ki, S., Peng, W. and Yu, B. 2004. Erodibility of agricultural soil on the loess plateau of China. Journal of soil & tillage research. 76(2): 157-165.
- Zhao, W., Wei, H., Jia, L., Daryanto, S., Zhang, X. and Liu, Y. 2018. Soil erodibility and its influencing factors on the Loess Plateau of China: a case study in the Ansai watershed. Solid Earth, 9(6), 1507-1516.
- Zhu, M., He, W., Liu, Y., Chen, Z., Dong, Z., Zhu, C., Chen, Y. and Xiong, Y. 2022. Characteristics of Soil Erodibility in the Yinna Mountainous Area, Eastern Guangdong Province, China. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 15703. https:// doi.org/10.3390/ijerph192315703.
- Zhu, X. C., Liang, Y., Tian, Z. Y., Zhang, Y., Zhang, Y. G., Du, J., Wang, X., Li, Y., Qu, L. L. and Dai, M. M. 2021. Simulating soil erodibility in southeastern China using a sequential Gaussian algorithm. Pedosphere. 31(5): 715–724.

Evaluation of different models for estimating soil erodibility in loamy soils of Golestan province

Nader Jandaghi[1]; Mojtaba Ghareh Mahmoodlu[2]; Hojat Ghorbani Vagheie[3]

[1]Assistant Professor in Engineering Hydrology, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Iran
[2] Associate Professor in Environmental hydrogeology, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Iran
[3]Assistant Professor in Soil physics and conservation, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Iran

Abstract

Introduction

Currently, soil erosion is considered one of the important environmental problems in Iran's watersheds. Accurate estimation of sedimentation and soil erodibility is very important for the protection and management of natural resources. Soil erodibility indicates the potential ability of soil to erode, and its increase is considered a serious threat to the stability and production capacity of agricultural lands. Measuring soil erodibility by direct method is expensive and time-consuming, and nowadays indirect methods are used to determine it. One of the most common indirect methods for estimating this parameter is the use of the Wischmeier and Smith nomograph, which was developed for non-calcareous soils. However, the majority of the soils in Iran is calcareous and the use of the nomograph method does not provide a correct estimate of the amount of erodibility. Loess is one of the most important Quaternary sedimentary formations in northeastern Iran, which consists of a relatively high percentage of lime. Therefore, the main goal of current research is to determine the most suitable indirect model to determine soil erodibility in Loess lands with the origin of calcareous sediments.

Methodology

In the current study, Arab-Qara-Haji watershed with an area of 2596 hectares located in the east of Golestan province was selected as a typical loess area. The average annual precipitation of this watershed is 489 mm and it has a moderate semi-arid climate. This area is one of the sedimentary basins of Kopeh-Dagh zone related to the Jurassic period and consists of limestone and loess sediments. Based on the field studies, three main types of soil including hills (67.1%), loess plateaus (20.6%) and river terraces (12.3%) were identified in this watershed and the land unit was selected as working units. For this purpose, 48 surface samples (0-10 cm depth) were collected from each part of the land unit. In this research, two series of samples were taken from each section. The first series of samples was used to determine the soil physicochemical properties and the second series was sampled by a special cylinder to determine the soil saturated hydraulic conductivity using the falling head method. In the laboratory, soil texture was determined by hydrometric method (D<0.075), soil granularity by sieve analysis (D>0.075), soil organic matter by wet burning method and neutral lime percentage by Nelson method. The experience of the soil expert of this research was used to determine the soil structure in field. Then, soil erodibility was estimated using four indirect methods, including Weishmeier and Smith nomograph, Torri, Shirazi, and Vaezi. In this study, the soil actual erodibility was measured using rain simulator in the field (in plots of 1 m^2). Then the validation of the models was performed using three standard indices MAD, RMSE and MAPE and the most appropriate model was selected.

Results

Soil texture assessment in this watershed revealed that around 90 percent of soil samples have silt loam texture and the rest of samples has loam one. Also, the average lime in study area was estimated about 29%. The high percentage of lime (29%) and silt (60%) in this watershed has greatly increased the tunnel erosion probability. The validation results of the used models revealed that the use of the Vaezi method to estimate the soil erodibility factor in the loess lands of the study area has the highest accuracy (RMSE=0.00225). However, it is less estimated than the actual values. These results were

confirmed in all 3 soil types of Arab-Qara-Haji watershed. After Vaezi model, Shirazi model (RMSE=0.03600) is more suitable than other models to estimate the soil erodibility factor in the loess lands of the area. This model has overestimated in all three types of soil including hill, loess plateau, and alluvial terrace, which is 11.2 times higher than the actual data from the rain simulator in the Arab-Qara-Haji watershed. After the Vaezi and Shirazi models, Wischmeier nomograph and Torri models, respectively, have a weaker performance in determining the soil erodibility factor in the limestone lands of the study area. Like the Shirazi method, Wischmeier nomograph and Tori methods have overestimated the soil erodibility factor. In the study area, this increase has been18.6 and 21.9 times higher than the actual data for Wischmeier nomograph and Torri models, respectively.

Conclusion

The present research results revealed that the use of Vaezi model to estimate soil erodibility in loamy lands with a high percentage of neutral lime is more appropriate compared to other used models. Based on the Vaezi and colleagues model, if the amount of neutral lime in the soil is less than 13%, it has a controlling role on the soil erodibility factor. While, this model is not able to estimate the soil erodibility in areas with neutral lime more than 30%. Therefore, for a number of soil samples in which the neutral lime was above 30%, the Vaezi model was not able to calculate the soil erodibility factor. It seems that currently, for the areas where the percentage of neutral lime in the surface soil is less than 30%, the use of the Vaezi model is more suitable than other models. It is suggested to recalibrate and update the Vaezi model for areas where the percentage of lime is more than 30%.

Keywords

Soil erodibility; Torri Model; Shirazi Model; Vaezi Model; Loess lands