

مقایسه‌ی کارایی مدل واعظی و نمودار ویشمایر برای برآورد فرسایش پذیری خاک در اراضی لسی (مطالعه موردی حوزه آبخیز عرب قره حاجی استان گلستان)

رجب محمد عیدی: دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس

نادر جندقی*: استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس

مجتبی قره محمودلو: استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس

حجت قربانی واقعی: استادیار گروه منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس

امین محمدی استاد کلاهی: استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۲)

چکیده

این پژوهش، به منظور ارزیابی عامل فرسایش پذیری خاک در اراضی لسی شرق استان گلستان و در حوزه آبخیز عرب قره حاجی به مساحت ۲۶۹۵ هکتار انجام شد؛ بدین منظور، از هر جزء واحد اراضی شامل تراس رودخانه‌ای، فلات لسی و تپه، در مجموع ۴۲ نمونه‌ی سطحی (۱۰-۰) سانتی‌متر برداشت شد. سپس خصوصیات فیزیکی‌شیمیایی خاک شامل بافت خاک، آهک خنثی، ماده آلی، درصد ذرات شن درشت و مجموع درصد سیلت و شن خیلی ریز در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز در آزمایشگاه توسط دستگاه اتوماسیون هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با روش بارافتان اندازه‌گیری شد. در این پژوهش فرسایش-پذیری واقعی خاک، به وسیله‌ی شبیه‌ساز باران در صحرا اندازه‌گیری و تمامی نقشه‌های موردنیاز در نرم‌افزار GIS و با روش IDW ترسیم شد. در بررسی بافت خاک مشخص شد که ۹۰ درصد نمونه‌ها، دارای بافت سیلتی لوم و ۱۰ درصد، دارای بافت لومی است. همچنین میانگین آهک در حوزه‌ی مورد مطالعه، در حدود ۲۹ درصد اندازه‌گیری شد که به نسبت زیاد است. نتایج نشان داد که روش واعظی، میزان فرسایش پذیری خاک را در حدود ۳۰ برابر کمتر از روش نمودار ویشمایر برآورد می‌کند. نتایج آزمون F و گیمز - هاول نیز نشان داد که با احتمال ۹۵ درصد، بین مقادیر فرسایش پذیری از روش واعظی با داده‌های واقعی اختلاف آماری وجود ندارد؛ در حالی که بین روش ویشمایر با داده‌های واقعی اختلاف آماری مشاهده می‌شود. نتایج روش رگرسیون چندگانه‌ی خطی و روش گام‌به‌گام نیز نشان داد که به ترتیب شاخص‌های درصد سیلت، مواد آلی و آهک خنثی، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در تعیین فرسایش پذیری خاک است ($R^2=0.9648$). در این پژوهش به دلیل بالا بودن درصد آهک خنثی در تعدادی از نمونه‌ها (بیش از ۳۰ درصد)، محاسبه‌ی عامل فرسایش پذیری خاک با استفاده از روش واعظی ممکن نبود. در نتیجه، استفاده از این روش برای مناطق مشابه نیازمند واسنجی و بروزرسانی است.

واژگان کلیدی: آهک خنثی، اراضی لسی، روش واعظی، فرسایش پذیری خاک، نمودار ویشمایر، هدایت هیدرولیکی.

۱- مقدمه

فرسایش خاک، یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم قرن حاضر در مناطق خشک و نیمه‌خشک به ویژه کشور ایران است (Refahi, 2015). اگر رقم سالانه‌ی تلفات خاک کشور ۲ تا ۲/۵ میلیارد تن فرض شود، معادل ۲۰ درصد فرسایش طبیعی خاک‌ها و ۸ درصد مقدار فرسایش خاک در مقیاس جهانی در ایران رخ می‌دهد. این میزان با توجه به سهم ۱/۱ درصدی ایران از مساحت خشکی‌های دنیا، بسیار قابل‌تأمل است. اینک بیش از نیمی از مساحت ایران (۸۸ میلیون هکتار) از نظر میزان فرسایش در حالت بحرانی است (Shafiei et al, 2009)؛ از این رو، مدیران و برنامه‌ریزان حفاظت خاک همواره به شناسایی نقاط با ریسک بالای فرسایش توجه داشته‌اند.

یکی از پارامترهای کاربردی برای شناسایی و تشخیص نقاط حساس به فرسایش، استفاده از عامل فرسایش‌پذیری خاک است (Vaezi et al, 2009 & Sadeghi et al, 2009 & Bahrami et al, 2005). این عامل، مقاومت خاک را در برابر جدا شدن و انتقال ذرات نشان می‌دهد که می‌تواند با دو روش مستقیم و غیرمستقیم تعیین شود. روش مستقیم تعیین فرسایش‌پذیری خاک با وجود دقت مناسب، به دلیل جنبه‌های اقتصادی زیاد از سوی کارشناسان قابل توجه نمی‌باشد. تاکنون روش‌های مختلفی برای تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش غیرمستقیم معرفی شده که یکی از این روش‌ها، استفاده از روش نمودار ویشمایر و اسمیت است که برای اراضی غیرآهکی ایالات متحده ارائه شده‌است (Wischmeier and Smith, 1978). بررسی‌های صحرایی در خاک‌های غیرآهکی نواحی نیمه‌مرطوب نشان داد که فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر پنج ویژگی است: درصد شن بزرگ‌تر از ۰/۲ میلی‌متر، مجموع درصد سیلت و شن خیلی ریز، درصد ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری نيمرخ خاک (Morgan, 1995).

در ایران هم در سالیان گذشته، مطالعات گسترده‌ای در نقاط مختلف کشور برای تعیین عامل فرسایش‌پذیری به روش نمودار ویشمایر و اسمیت انجام شده‌است (Ayoubi and Hossein Alizadeh, 2007 & Ghorbani and Bahrami, 2005 & Vaezi et al, 2008 & Vaezi et al, 2009 & Jafari Honar et al, 2015 & Pazhouhesh et al, 2017 & Soofi et al, 2017 & Mazloun Aliabadi et al, 2017 & Karami et al, 2017). اما بخش غالب خاک‌های ایران آهکی است؛ در حالی که نمودار ویشمایر و اسمیت برای خاک‌های غیرآهکی بسط و توسعه داده شده و به نظر می‌رسد، استفاده از این نمودار برای خاک‌های آهکی ایران نمی‌تواند برآورد صحیحی از مقدار فرسایش‌پذیری ارائه دهد (Sadeghi et al, 2009).

برای رفع این مشکل، تحقیقات مبسوطی برای تعیین خطای برآورد عامل فرسایش‌پذیری (USLE) در ۳۶ شبکه و در هر شبکه، ۳ کرت استاندارد بر روی اراضی دیم‌زار در شهرستان هشتگرد انجام شد (Vaezi et al, 2008 & Vaezi et al, 2009). نتایج این تحقیقات نشان داد که میانگین مقدار فرسایش‌پذیری واقعی در خاک‌های آهکی منطقه‌ی مطالعاتی برابر ۰/۰۲۵۴ تا ۰/۰۴۹۲ مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر است. این مقدار در مقایسه با فرسایش‌پذیری واقعی، ۸/۷۷ تا ۱۰/۹۷ برابر بیشتر برآورد شد. فرسایش‌پذیری در خاک‌های آهکی منطقه نیز با شن درشت، سیلت، ماده آلی و آهک همبستگی معنی‌داری داشت. همچنین Kamali و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی عوامل محیطی مؤثر بر میزان فرسایش آبی در آبخیز طالقان، بیان کردند که از بین ۱۵ شاخص مورد بررسی، ۷ شاخص ماده آلی، رخساره‌ی فرسایشی، درصد پوشش گیاهی، درصد آهک، درصد سیلت، جنس سنگ و درصد رس، مهم‌ترین نقش را بر فرسایش داشته‌اند. در

مطالعه‌ی دیگری که توسط Ostovari و همکاران (۲۰۱۶) در بالادست سد سیوند انجام شد، تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک و عوامل مؤثر بر آن در ۴۰ کرت استاندارد در شیب‌های ۹٪ در طی یک سال، ارزیابی و هدرفت خاک در ۴ رخداد بارندگی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میانگین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در کرت‌های آزمایشی و برآوردی به روش نمودار ویشمایر، به ترتیب 0.144 h MJ^{-1} و 0.304 h MJ^{-1} بود که به طور میانگین، مقدار برآوردی این فاکتور به روش ویشمایر و اسمیت دو برابر مقدار اندازه‌گیری شده بود. در تحقیق دیگری، شاخص فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی حوزه آبخیز کچیک استان گلستان بررسی شد. در این تحقیق، مقدار فرسایش‌پذیری خاک به روش نمودار ویشمایر و اسمیت با مقدار واقعی آن مقایسه شد (Khormai et al, 2017). نتایج به دست آمده، بیانگر برآورد بیشتر شاخص فرسایش‌پذیری ویشمایر و اسمیت در مقایسه با داده‌های واقعی بود. در تحقیق دیگری، کارایی ۴ معادله برای برآورد مقدار فرسایش‌پذیری خاک در شرایط آزمایشگاهی به کمک باران-ساز مصنوعی در پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری ایران انجام شد که نتایج آن، از کم‌برآوردی مدل واعظی و بیش‌برآوردی روش نمودار ویشمایر حکایت داشت (Arabkhedri et al, 2020).

Rejman و همکاران (۱۹۹۸) به مطالعه بر روی خاک‌های لسی در شرق کشور لهستان پرداختند. آنها با اندازه‌گیری ۳ ساله در یک حوزه آبخیز کوچک، مقدار فرسایش‌پذیری خاک را با استفاده از روش نمودار ویشمایر و اسمیت به میزان 0.553 تا 0.83 مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورد کردند. این مقدار، ۶ تا ۱۰ برابر بیش از مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بود. Yu و Shi (۲۰۰۱)، در مطالعه‌ای عامل فرسایش‌پذیری هفت نوع خاک مختلف را در منطقه‌ی جنب حاره کشور چین، تحت شرایط باران طبیعی و شبیه‌سازی شده اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد مقادیر اندازه‌گیری شده، با شرایط باران شبیه‌سازی شده بسیار متفاوت است. Zhang و همکاران (۲۰۰۴) در خاک‌های لسی کشور چین، مقدار فرسایش‌پذیری خاک را با استفاده از نمودار ویشمایر و اسمیت 0.161 تا 0.884 مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورد کردند که این مقدار، $3/3$ تا $8/4$ برابر بیش از مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بود؛ این بدان معناست که استفاده از روش نمودار ویشمایر برای تخمین فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی، به طور قابل توجهی بیش از مقدار واقعی بود. نتایج همچنین بیانگر آن است که عامل فرسایش‌پذیری خاک با درصد رس مرتبط است ($R^2=0.75$) Hussein و همکاران (۲۰۰۷) در شمال کشور عراق، از دو سایت با خاک‌های لومی و سیلتی لومی استفاده و مقدار فرسایش‌پذیری خاک را با استفاده از نمودار ویشمایر و اسمیت، 0.27 تا 0.69 مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورد کردند که این مقدار، $10/9$ تا $12/7$ برابر بیش از مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بود. Kiani و Ghezseflo (۲۰۱۶) با هدف ارزیابی توانایی شاخص ویشمایر و اسمیت در برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک، با توجه به مقادیر زیاد محتوای سیلت و آهک در خاک‌های لسی مناطق شرقی استان گلستان در ایران به مطالعه پرداختند. فرسایش‌پذیری خاک ابتدا با استفاده از نمودار ویشمایر تعیین، سپس با انتخاب شش کرت و اجرای آزمایشات فیزیکی و شیمیایی بر روی این نمونه‌ها، با مقادیر واقعی مقایسه شد. فرسایش‌پذیری خاک به روش نمودار ویشمایر در حدود 0.5 تا 0.92 مگاگرم در ساعت بر مگاژول در میلی‌متر محاسبه شد. نتایج به دست آمده، برآورد بیشتر شاخص فرسایش‌پذیری ویشمایر و اسمیت را در خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. Zhao و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی فرسایش‌پذیری خاک در حوزه آبخیز انسای در کشور چین - که شامل فلات لسی است

– پرداختند و از ۵ روش (مدل EPIC، معادله‌ی نمودار ویشمایر، معادله‌ی نمودار ویشمایر اصلاح‌شده، مدل شیرازی و مدل توری) استفاده کردند. مقدار فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از نمودار ویشمایر، ۰/۰۴۶ تا ۰/۰۹۲ مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورده شد. نتایج نشان داد مدل‌های شیرازی و توری، به عنوان مدل‌های بهینه برای حوزه آبخیز انسانی مناسب بود و مدل‌های نمودار ویشمایر و نمودار ویشمایر اصلاح‌شده نیز تأیید نشدند. Man و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی اثر ویژگی‌های دو نوع خاک متفاوت بر عامل فرسایش‌پذیری در دو حوزه آبخیز چنگی (دارای خاک آهکی) و جیولونگ (پوشیده از خاک بسیار اسیدی) کشور چین پرداختند. آنها پس از تعیین خصوصیات خاک با استفاده از روش (EPIC)، به محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری آن پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار فرسایش‌پذیری خاک در هر دو حوزه، بین ۰/۰۱۸-۰/۰۰۹ متغیره بود و در خاک‌های آهکی به دلیل تجمع آهک و افزایش نفوذپذیری، بیش-برآوردی داشت. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی و مدل معادلات ساختاری نیز نشان داد که عامل K در خاک‌های اسیدی حوزه‌ی جیولونگ، عمدتاً به بافت خاک بستگی دارد و مقدار سیلت مهم‌ترین عامل است؛ در حالی که در خاک‌های آهکی حوزه‌ی چنگی، مقدار عامل K عمدتاً تحت تأثیر مواد آلی است و سایر ویژگی‌های خاک از جمله pH، مقدار رس و سیلت نیز به طور غیرمستقیم با تأثیر بر تجمع مواد آلی خاک، بر عامل K تأثیر می‌گذارد. Jiang و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی الگوی فضایی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در حوزه آبخیزی واقع در مرکز کشور چین پرداختند. آنها بیان کردند که تغییرات فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، بیش از همه با تغییرات بافت خاک و مواد آلی آن ارتباط داشت.

لس‌ها، یکی از مهم‌ترین واحدهای رسوبی کواترنر قلمداد شده که در سطح استان گلستان از جهت شرق به غرب گسترش یافته‌است (Amiri et al, 2019). این رسوبات، سطحی بالغ بر ۳۰۰۰ کیلومترمربع (معادل ۱۵ درصد) از سطح استان گلستان را پوشانده‌است (Feyz Nia, 2017). با توجه به وجود انواع فرسایش‌های شیاری و خندقی گسترده در مناطق لسی استان گلستان، شناسایی نقاط بحرانی و فرسایش‌پذیر می‌تواند در برنامه‌ریزی مدیریتی برای کاهش خطرات زیست‌محیطی فرسایش خاک، کمک شایانی داشته باشد. یکی از پارامترهای مؤثر در شناسایی نقاط بالقوه در فرسایش خاک، برآورد عامل فرسایش‌پذیری در چنین اراضی است. از سوی دیگر، مدل فرسایش‌پذیری واعظی یک مدل ایرانی است که برای خاک‌های آهکی بسط و توسعه داده شده و کارایی آن در خاک‌های لسی چندان مورد نقد و بررسی قرار نگرفته‌است. بنابراین، این تحقیق با هدف ارزیابی و مقایسه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک محاسبه شده، به روش نمودار ویشمایر واعظی در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی واقع در شرق استان گلستان – که به طور کامل پوشیده از خاک‌های آهکی – لسی است – انجام شد. به طور کلی، این مطالعه و داده‌های آن، به شناخت بهتر رفتار مدل فرسایش‌پذیری واعظی در خاک‌های لسی – آهکی ایران کمک خواهد کرد.

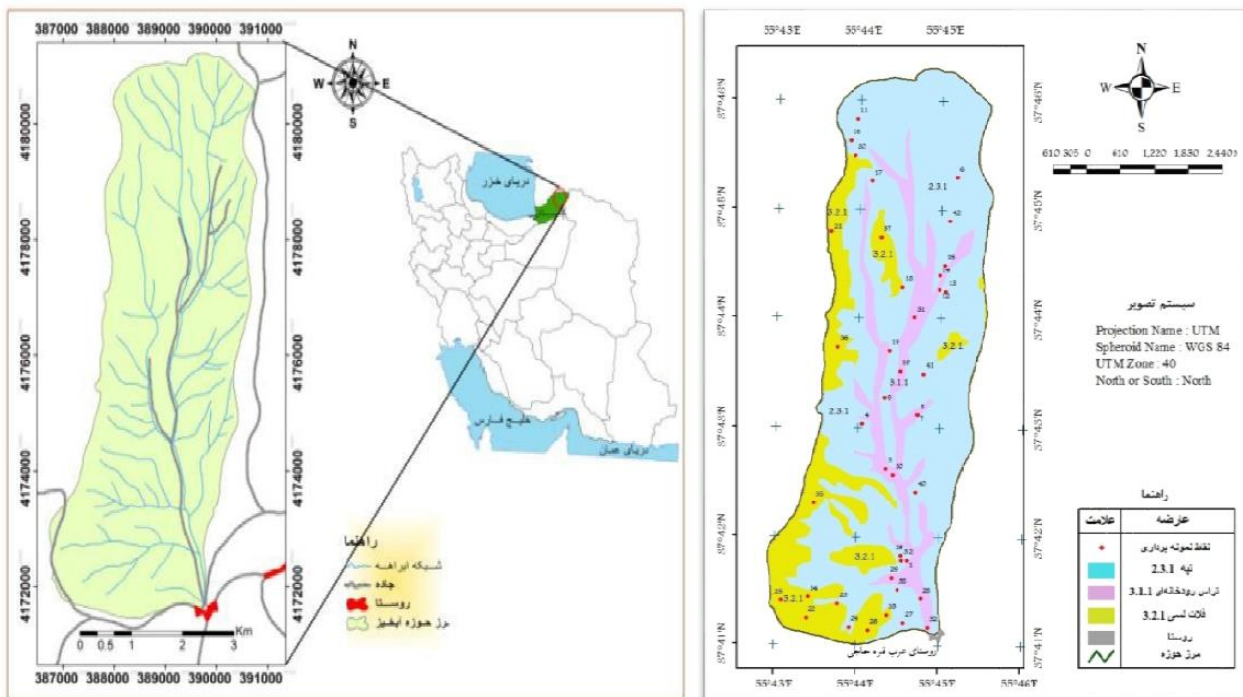
۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی با مساحت ۲۶۹۵/۶۵ هکتار، در محدوده‌ی طول جغرافیایی ۴۳° ۵۵' تا ۴۵° ۵۵' شرقی و عرض جغرافیایی ۴۱° ۳۷' تا ۴۶° ۳۷' شمالی واقع شده‌است. این حوزه در بخش گلیداغ مراوه‌تپه و در شرق شهرستان کلاله و شهر جدید فراغی قرار دارد. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی این حوزه را در کشور و استان گلستان نشان می‌دهد. متوسط بارندگی سالانه در این حوزه، ۴۸۹ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه، ۱۶ درجه‌ی سانتی‌گراد است و اقلیمی نیمه-

خشک معتدل دارد. منطقه‌ی مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی نیز جزو حوزه‌های رسوبی کپه‌داغ در دوره‌ی ژوراسیک است و از نظر سنگ‌شناسی، تنوع محدودی دارد و تنها از رسوبات آهکی و لسی تشکیل شده‌است (Izanloo et al., 2019).

۳- مواد و روش

در این تحقیق اجزاء واحد اراضی به‌عنوان واحد کاری انتخاب شد. بر این اساس، ۳ تیپ اصلی شامل تپه (۶۷/۱ درصد)، فلات‌های لسی (۲۰/۶ درصد) و تراس‌های آبرفتی (۱۲/۳ درصد) در این آبخیز شناسایی شد و نمونه‌برداری خاک در هر یک از اجزای واحد اراضی، بر اساس نقشه‌ی 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 خصوصیات لیتولوژی، خاک‌شناسی و پوشش گیاهی، ۴۲ نمونه در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر از سطح خاک برداشت شد (شکل ۲). در این تحقیق، از هر مقطع ۲ سری نمونه برداشت شد؛ سری اول نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی برای اجرای آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی خاک برداشت شد و سری دوم توسط سیلندر مخصوص نمونه‌برداری دستگاه اتوماتیک اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، برای تعیین نفوذ نهایی آب به خاک برداشت شد (شکل ۳).



شکل ۲: نقشه‌ی پراکنش نقاط نمونه‌برداری در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی در کشور و استان گلستان

در آزمایشگاه، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، دانه‌بندی خاک به روش الک خشک، ماده‌آلی خاک به روش سوزاندن تر (Nelson and Sommers, 1982) و درصد آهک خنثی به روش نلسون (۱۹۸۲) اندازه‌گیری شد. برای تعیین نوع ساختمان خاک نیز از تجربه‌ی کارشناس در صحرا استفاده شد. ساختمان خاک منطقه-

ی مطالعاتی، عمدتاً از نوع مکعبی است. همچنین برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، از دستگاه اتوماسیون هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مدل FH10 - که ساخت شرکت ابزار خاک سهند تبریز است - استفاده شد. این دستگاه می‌تواند 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 است که حداقل سه قرائت، کمتر از ۵ درصد با هم اختلاف داشته باشند.



شکل ۳: مراحل نمونه‌برداری از لایه‌ی سطحی خاک توسط سیلندر نمونه‌برداری خاک (الف) و دستگاه اتوماسیون اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش بارافتان (ب)

برای محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش نمودار ویشمایر و اسمیت، مقادیر پنج پارامتر شامل مجموع درصد ذرات سیلت و شن خیلی ریز، درصد شن درشت (بزرگ‌تر از ۰/۲ میلی‌متر خاک)، درصد ماده آلی، کد ساختمان خاک و کلاس نفوذپذیری خاک، برای هر یک از ۴۲ نمونه خاک مشخص شد. سپس با کمک نمودار ویشمایر و اسمیت، مقدار فرسایش‌پذیری خاک بر حسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر، محاسبه و عامل فرسایش‌پذیری به روش نمودار واعظی و همکاران برآورد شد. واعظی و همکاران (Vaezi et al, 2009)، این نمودار را برای خاک‌های آهکی ایران طراحی و ابداع کردند. رابطه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش واعظی و همکاران، در رابطه‌ی ۱ ارائه شده است:

$$K_{\text{factor}} = 0.000373 + 0.00016 \text{ Silt} - 0.00216 \text{ OM} - 0.00017 \text{ TNV} \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

که در آن K: عامل فرسایش‌پذیری خاک بر حسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر، Silt: سیلت بر حسب درصد، OM درصد ماده آلی خاک و TNV آهک خنثی بر حسب درصد است. برای اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری واقعی خاک، در هر یک از اجزای واحد اراضی یک کرت ۱*۱ متر مربع انتخاب شد. شیب کرت‌ها در تیپ تراس آبرفتی، فلات لسی و تپه به ترتیب ۵، ۱۲ و ۲۵ درصد در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از شبیه‌ساز باران، مقدار فرسایش‌پذیری خاک در ۳ تیپ اندازه‌گیری شد. شبیه‌ساز باران مورد استفاده، ساخت

ایران و قابل حمل بود که صفحه‌ی بارش آن، از ۸ نازل با قابلیت تنظیم (مدل PD_12) پمپ و مخزن آب تشکیل شده‌است. این دستگاه دارای پایه و کاور پلاستیکی است که از پایه‌ها برای رساندن نازل به ارتفاع مناسب - حداکثر ۳ متر در حالت عمودی - و از کاور پلاستیکی به منظور جلوگیری از تأثیر وزش باد در هنگام آزمایش استفاده می‌شود. پلات مورد استفاده برای دستگاه، از ورق فولادی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و مساحت یک متر مربع تشکیل شده‌است؛ برای این منظور، شدت بارش نیم‌ساعته با دوره بازگشت ۲۵ سال برای باران‌ساز در نظر گرفته شد که مقدار آن، بر اساس آمار ۳۰ ساله‌ی ایستگاه هواشناسی قپان (در مجاور حوزه) و با استفاده از روش شواب - سبحانی به دست آمد. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۲، مقدار فرسایش‌پذیری واقعی هر کرت تعیین شد.

$$K = \frac{A}{R} \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

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 فرسایش‌پذیری باران بود که بر اساس شاخص EI_{30} محاسبه شد. برای تعیین شاخص EI_{30} ، به محاسبه‌ی انرژی جنبشی باران نیاز بود که از رابطه‌ی ۳ محاسبه شد.

$$KE = 11.87 + 8.73 \log_{10} I \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

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 ایستگاه باران‌نگار ایستگاه کچیک در مجاورت حوزه‌ی مورد مطالعه استفاده شد.

به منظور مقایسه و تعیین اختلاف معنی‌داری بین مقادیر فرسایش‌پذیری برآورد شده، از دو روش نمودار ویشمایر و مدل واعظی و همکاران (Vaezi et al, 2009) با داده‌های واقعی از آزمون F در سطح احتمال ۰/۰۵ استفاده شد. قبل از اجرای آزمون F ، فرض نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون اندرسون - دارلینگ^۱ و فرض یکسان بودن واریانس‌ها با استفاده از آزمون لون^۲ ارزیابی شد. توضیح این امر لازم است که روش اندرسون - دارلینگ، دقیق‌ترین و قوی‌ترین روش برای بررسی نرمال بودن سری داده‌ها است (Shirazi, 2016). برای اجرای آزمون‌های آماری نیز از نرم‌افزار مینی‌تب^۳ استفاده شد. در آزمون F ، چنانچه فرض H_1 یا وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین تیمارهای مورد بررسی پذیرفته شود؛ برای بررسی اینکه کدام تیمارها با هم اختلاف آماری دارند از آزمون گیمز - هاول^۴ در سطح احتمال ۰/۰۵ استفاده شد.

برای تعیین مؤثرترین پارامتر در محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش واعظی و همکاران، از روش رگرسیون چندگانه‌ی خطی در محیط نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. بعد از برازش مدل، چنانچه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته رابطه‌ی وجود داشته باشد، از روش گام‌به‌گام^۵، متغیرهای مستقلی که بیشترین تأثیر را بر متغیر وابسته

¹ Anderson-Darling Normality Test

² Levene's Test

³ Minitab

⁴ Games-Howell

⁵ Stepwise

دارند، مشخص می‌شود. قبل از این آزمون، آزمون‌های نکویی برازش برای مدل رگرسیونی انجام شد؛ برای این منظور، از آماره دورین^۱ - واتسون^۱ برای بررسی خودهمبستگی در باقی‌مانده‌های مدل، از آزمون اندرسون - دارلینگ برای بررسی نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، از ضریب تورم واریانس (VIF) برای بررسی هم‌راستایی در متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی مدل و از آزمون درها^۲ برای بررسی تصادفی بودن مانده‌ها استفاده شد. برای تعیین مهم‌ترین متغیر مؤثر در تعیین شاخص فرسایش‌پذیری، در ابتدا داده‌های باقی‌مانده در مدل استانداردسازی شده، سپس رگرسیون گرفته می‌شود. در معادله‌ی رگرسیون جدید، چنانچه قدرمطلق ضریب هر پارامتر، بالاترین مقدار را داشته باشد بیانگر مؤثرترین متغیر تأثیرگذار در تعیین فاکتور فرسایش‌پذیری خواهد بود (Shirazi, 2016).

در ادامه برای هر دو مدل، نقشه‌ی تغییرات و پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک و دیگر نقشه‌های مورد نیاز در سطح حوزه آبخیز، با استفاده از نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس و از روش درون‌یابی^۳ (IDW) ترسیم شد. هدف اصلی در روش درون‌یابی، مشخص کردن میزان یک پارامتر در مناطقی است که در آنها نمونه‌برداری انجام نشده‌است.

۴- یافته‌ها (نتایج)

در این تحقیق در سه تیپ اراضی تراس آبرفتی، تپه و فلات لسی، به ترتیب ۱۰، ۲۲ و ۱۰ نمونه خاک برداشت شد. جدول ۱، خلاصه‌ی نتایج آزمایشگاهی خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک را به تفکیک اجزای واحد اراضی نشان می‌دهد. بررسی درصد ذرات تشکیل‌دهنده‌ی خاک نشان داد که بخش غالب آن در حوزه آبخیز به سیلت تعلق داشت و بعد از آن، شن و رس به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفت. مقدار سیلت، عامل مهمی در فرسایش‌پذیری خاک است که به ترتیب، بیشترین و کمترین مقدار آن در تیپ‌های تراس آبرفتی و فلات لسی مشاهده شد (جدول ۱ و شکل ۴). بررسی بافت خاک در این حوزه نشان داد که ۹۰ درصد نمونه‌های برداشت‌شده، دارای بافت سیلتی-لوم و ۱۰ درصد دیگر دارای بافت خاک لومی است.

¹ Durbin-Watson statistic

² Run Test

³ Inverse Distance Weighting

جدول ۱: خلاصه نتایج آزمایشگاهی خصوصیات فیزیکی-شیمیایی نمونه‌های خاک به تفکیک اجزای واحد اراضی در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

پارامتر	CS %	(v.f.Sa+Si) %	مواد آلی %	آهک %	شن %	سیلت %	رس %	تیپ خاک
حداقل	۰/۱۶	۸۲/۲۳	۰/۸۵	۲۴/۶۲	۱۶	۵۴	۳/۵	تراس آبرفتی
حداکثر	۵/۴	۹۳/۳۴	۷/۱۴	۴۲/۸۷	۴۰/۵	۷۶	۱۴	
میانگین	۲/۰۵	۸۹/۴۰	۳/۹۱	۲۸/۶۰	۳۰/۲۵	۶۱/۳	۹/۲۵	
انحراف معیار	۱/۶۱	۳/۴۵	۲/۱۱	۵/۲۱	۷/۷۲	۷/۶۰	۳/۲۶	
تعداد نمونه	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	
حداقل	۰/۴۲	۷۵/۹۳	۱/۱۷	۲۶/۲۵	۲۴	۴۴	۴	
حداکثر	۵/۱۵	۹۴/۵۴	۳/۳۹	۲۹/۷۵	۴۶	۶۴	۱۶	
میانگین	۲/۳	۸۶/۱۰	۱/۸۸	۲۸/۰۶	۳۵	۵۴/۶	۹/۲	
انحراف معیار	۱/۶۲	۷/۰۸	۰/۷۴	۱/۵۲	۵/۵۲	۶/۳۳	۴/۴۴	
تعداد نمونه	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	
حداقل	۰/۴۹	۷۸/۸۶	۰/۱۷	۲۴	۱۸	۴۲	۰	تپه
حداکثر	۵/۳۱	۹۸/۵۲	۴/۰۷	۳۷/۲۵	۶۴	۷۶	۱۸	
میانگین	۱/۹۸	۸۶/۶۲	۲/۱۶	۳۰/۱۸	۳۲/۷۳	۵۶/۵۵	۱۱/۰۹	
انحراف معیار	۱/۴۹	۵/۹۶	۰/۹۶	۲/۶۳	۹/۴۳	۹/۲	۵/۶۲	
تعداد نمونه	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	

CS % درصد ذرات شن درشت (بزرگ‌تر از ۰/۲ میلی‌متر خاک).

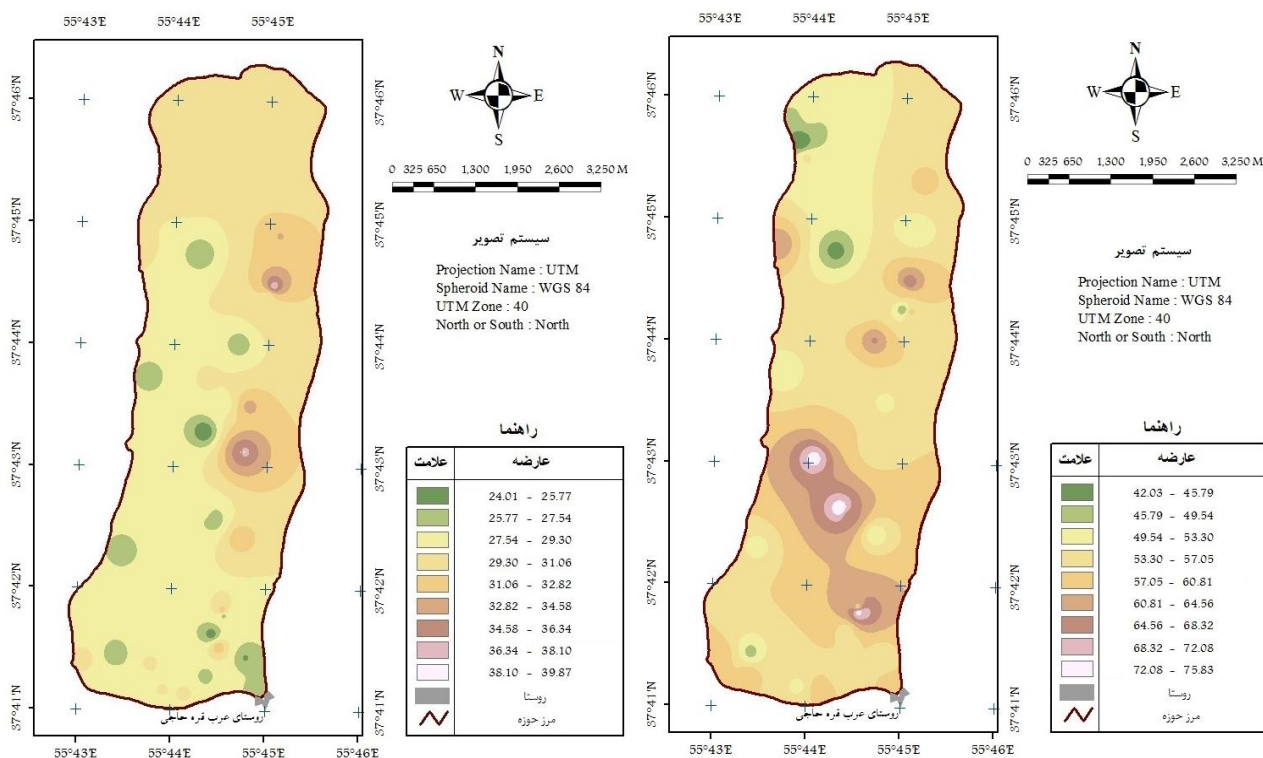
(v.f.S+ %Si) مجموع درصد ذرات سیلت و شن خیلی ریز.

مطابق با جدول ۱، میانگین درصد آهک در سه تیپ تراس آبرفتی، تپه و فلات لسی به ترتیب ۲۸/۰۶ و ۳۰/۱۸، ۲۸/۰۶ و ۳۰/۱۸، ۲۸/۰۶ و ۳۰/۱۸ است. این مقدار، بیش از حد استاندارد آهک (۱۵ درصد) در خاک برای ایجاد خاکدانه‌های پایدار در حالت خیس است (Ayoubi and Jalilian, 2005)؛ بنابراین، به نظر می‌رسد مازاد آن در خاک مرطوب می‌تواند کاهش پایداری خاکدانه‌ها را به همراه داشته باشد. مشاهدات میدانی، از وجود حفرات ناشی از آب‌شستگی از سطح به عمق خاک حکایت دارد و از آنجا که بخش غالب منطقه از نظر وسعت به تیپ تپه بازمی‌گردد، احتمال ایجاد فرسایش خندقی ناشی از انحلال آهک و فرونشست خاک در پایین دست حوزه نیز دیده می‌شود.

حضور مواد آلی و آهک در خاک، می‌تواند تا حدودی از اثرات مخرب ذرات سیلت بر فرسایش بکاهد (Vaezi et al, 2009). براساس نتایج جدول ۱، مقدار ماده آلی در خاک سطحی نسبتاً قابل قبول است، ولی به دلیل چرای بیش از حد و کشاورزی در فلات‌ها، هم‌آوری ذرات خاک با ماده آلی ممکن نیست؛ بنابراین، مواد آلی طبیعی در خاک نتوانسته است نقش اصلی خود را در کنترل فرسایش خاک در منطقه ایفا کند. براساس شکل ۵، بیشترین مقدار پراکنش درصد آهک در تیپ تراس آبرفتی مشاهده شد؛ شاید علت اصلی آن را بتوان به تمرکز جریان رواناب در کنار تبخیر بالای منطقه و وجود چند بند بزرگ در مسیر آبراهه‌ی اصلی نسبت داد. به‌طور کلی، می‌توان گفت تجمع آهک در قسمت‌های شمالی و شرقی حوزه نسبت به قسمت‌های جنوبی و غربی بیشتر است.

در این بررسی، آزمایش نفوذپذیری خاک با استفاده از روش بارفتان اندازه‌گیری و مشخص شد که نمونه‌های برداشت شده، در دو کلاس نفوذپذیری متوسط (۱/۵۲-۵/۰۸ سانتی‌متر بر ساعت) و نسبتاً آهسته (۰/۵۱-۱/۵۲ سانتی‌متر بر ساعت) قرار دارد. ۶۷ درصد نمونه‌های برداشت شده، در کلاس متوسط نفوذپذیری و مابقی در کلاس نسبتاً آهسته بود.

همچنین با توجه به بررسی‌های انجام شده، مشخص شد که تمام نمونه‌های برداشت شده در کلاس ۴ طبقه‌بندی ساختمان خاک (ساختمان صفحه‌ای، منشوری، ستونی یا دانه‌ای درشت) قرار گرفته‌اند.

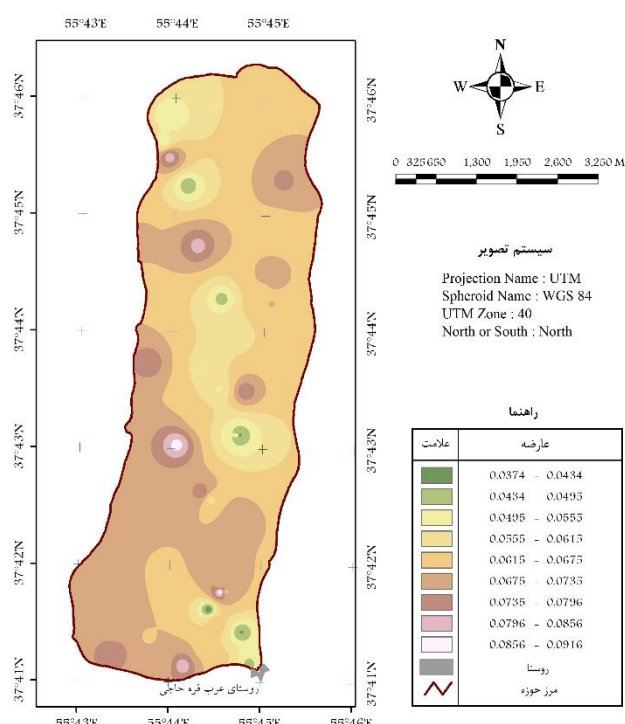
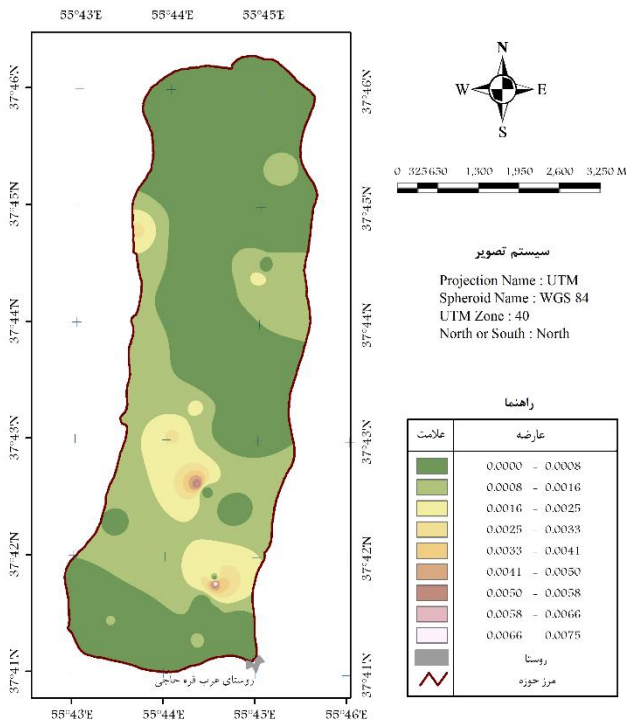


شکل ۴: نقشه‌ی پراکنش درصد سیلت در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی
شکل ۵: نقشه‌ی پراکنش درصد آهک خنثی در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

در مدل فرسایش‌پذیری واعظی و همکاران، پارامتر درصد آهک خنثی در برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک نقش مؤثری دارد. شکل ۶ و ۷، به ترتیب نقشه‌ی پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک را در دو مدل واعظی و ویشمایر در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶، مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش واعظی در شمال حوزه حداقل بود و در قسمت‌های مرکزی حوزه افزایش یافت؛ با این وجود، مقدار آن در قسمت انتهایی حوزه (جنوب حوزه)، بر خلاف انتظار کاهش یافت که شاید بتوان آن را به بالا بودن درصد آهک نسبت داد. در نقشه‌ی پراکنش فرسایش‌پذیری خاک به روش ویشمایر و اسمیت (شکل ۷)، مشاهده شد که حداکثر مقدار فرسایش‌پذیری در مناطق جنوبی و غربی حوزه اتفاق افتاد و در قسمت‌های میانی و شمالی حوزه مقدار آن کمتر بود. ذکر این امر لازم است که برای تعدادی از نمونه‌های خاک، امکان محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری به روش واعظی و همکاران وجود نداشت که دلیل آن، به احتمال زیاد به بالا بودن درصد آهک بازمی‌گردد.

همچنین در این بررسی، مقادیر فرسایش‌پذیری واقعی حوزه با استفاده از شبیه‌ساز باران اندازه‌گیری شد. با توجه به آمار ۳۰ ساله‌ی ایستگاه هواشناسی قیان و با استفاده از روش شواب - سبحانی، شدت بارش نیم‌ساعته با دوره بازگشت ۲۵ سال ۲۹/۴۵ میلی‌متر در ساعت در نظر گرفته شد. پس از آزمایش، مقدار هدررفت خاک (A) بر حسب تن در هکتار در سال برای هر یک از اجزای واحد اراضی محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۳، انرژی جنبشی باران بر حسب ژول بر مترمربع در میلی‌متر باران محاسبه شد. از حاصل ضرب حداکثر شدت بارندگی نیم‌ساعته در انرژی جنبشی باران

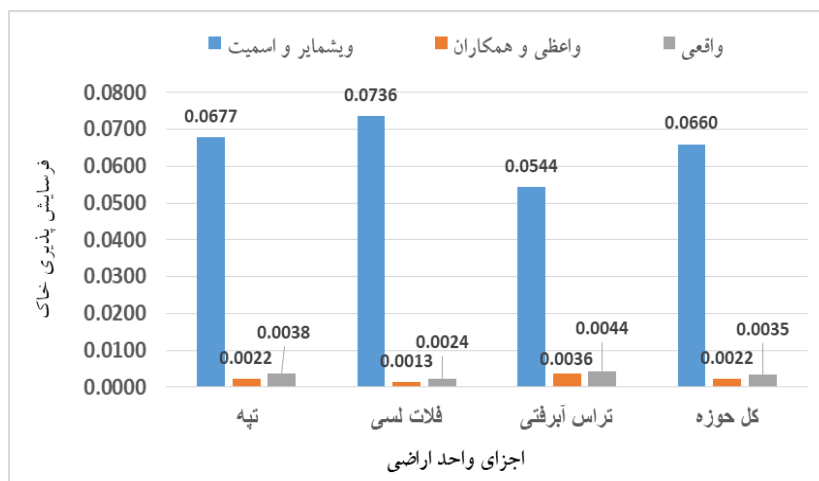
بر حسب مگاژول بر هکتار، شاخص فرساینده‌گی (EI30) برای هر رگبار محاسبه شد. مقدار سالانه‌ی عامل فرساینده‌گی باران (R)، از جمع مقادیر شاخص فرساینده‌گی باران در یک سال بر حسب مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت در سال محاسبه شد. بر این اساس، مقدار متوسط عامل فرسایش‌پذیری خاک در ۳ تیپ تراس آبرفتی، تپه و فلات لسی، به ترتیب ۰/۰۰۴۴، ۰/۰۰۳۸ و ۰/۰۰۲۴ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر به دست آمد.



شکل ۶: نقشه‌ی پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده به روش نمودار اعظمی و همکاران در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

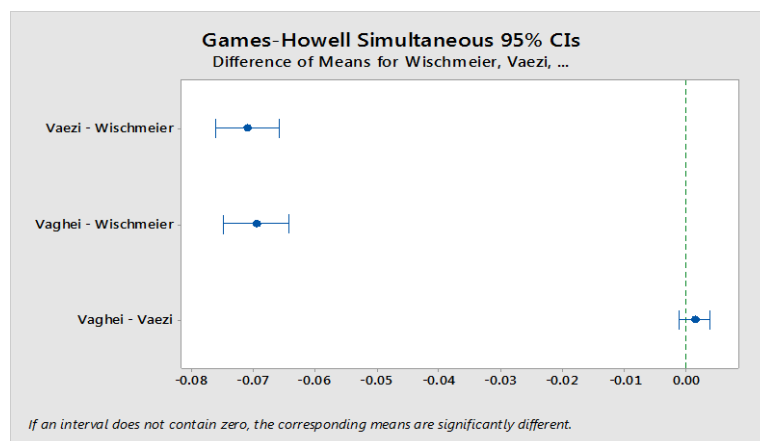
شکل ۷: نقشه‌ی پراکنش عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده به روش نمودار ویشمایر و اسمیت در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

شکل ۸، هیستوگرام مقایسه‌ی مقادیر میانگین عامل فرسایش‌پذیری خاک را به ۳ مورد استفاده در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقادیر فرسایش‌پذیری به روش اعظمی و همکاران در هر سه تیپ بررسی شد و کل حوزه با داده‌های واقعی، نسبتاً نزدیک بود ولی برآورد کمتری داشت؛ در حالی که روش ویشمایر و اسمیت، با داده‌های فرسایش‌پذیری واقعی تفاوت بسیاری داشت و بیش‌برآورد بود. نکته‌ی مهم در شکل ۸، آن است که عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش اعظمی و همکاران نسبت به نمودار ویشمایر و اسمیت، در تیپ تراس آبرفتی ۱۵/۲ برابر، در تیپ فلات لسی ۵۵/۷ برابر، در تیپ تپه ۳۱/۲ برابر و در کل حوزه ۳۰/۴ برابر کمتر برآورد شده است.



شکل ۸: هیستوگرام مقایسه‌ی مقادیر میانگین عامل فرسایش‌پذیری خاک به سه روش مورد استفاده در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی

به منظور مقایسه و تعیین اختلاف آماری بین مقادیر فرسایش‌پذیری دو روش برآوردی (روش واعظی و ویشمایر) با داده‌های واقعی، از آزمون F استفاده شد. با توجه به اینکه مقدار p-value آزمون F برابر با صفر محاسبه شد، با احتمال ۹۵ درصد، فرض H_0 رد و فرض H_1 یعنی وجود اختلاف معنی‌دار بین حداقل میانگین دو روش مورد بررسی پذیرفته می‌شود. برای بررسی و تعیین اینکه کدام یک از روش‌ها با هم اختلاف آماری دارند، از آزمون گیمز - هاوول در سطح احتمال ۰/۰۵ استفاده شد (شکل ۹). نتایج آزمون گیمز - هاوول نشان داد که با احتمال ۹۵ درصد، بین مقادیر فرسایش‌پذیری از روش واعظی با داده‌های واقعی اختلاف آماری نیست؛ در حالی که بین روش ویشمایر با داده‌های واقعی و روش ویشمایر با روش واعظی، اختلاف آماری وجود دارد.



شکل ۹: نتایج آزمون گیمز - هاوول برای تعیین اختلاف آماری فرسایش‌پذیری خاک در سه روش مورد استفاده

در این پژوهش برای تعیین ارتباط بین پارامتر فیزیکوشیمیایی خاک و عامل فرسایش‌پذیری واعظی، از روش رگرسیون چندگانه‌ی خطی در محیط نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. نتایج حاصل از رگرسیون چندگانه‌ی خطی نشان داد که بین مقدار عامل فرسایش‌پذیری با حداقل یکی از متغیرهای مستقل، رابطه‌ی معنی‌داری وجود دارد (P-value=0.000). سپس آزمون‌های نکویی برازش انجام شد. در نمونه‌های خاک مورد بررسی با توجه به مقدار معنی‌داری در آماره دورین واتسون (p-value=0.825)، مشخص شد که در باقی‌مانده‌های مدل نیز خودهمبستگی وجود

ندارد. در بررسی نتایج آزمون درها ($p\text{-value}=0.068$) نیز مشخص شد که باقی‌مانده‌های مدل نیز تصادفی بوده‌اند. همچنین نتایج آزمون اندرسون - دارلینگ ($p\text{-value}=0.976$) نشان داد که باقی‌مانده‌های مدل دارای توزیع نرمال بود و نتایج ضریب تورم واریانس (VIF) - که برای هر ۴ مدل، حدود ۱ گزارش شده‌است - نشان داد که بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی مدل نهایی، هم‌راستایی وجود نداشت. در مرحله‌ی بعد با استفاده از روش گام‌به‌گام مشخص شد که از بین متغیرهای مورد بررسی، چهار شاخص در تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک بیشترین نقش را داشته‌اند که عبارتند از: درصد سیلت، آهک خنثی، مواد آلی و شن درشت (رابطه‌ی ۴).

رابطه‌ی ۴

$$K_{F(Vaezi)} = -0.00038 + 0.000151 \text{ Silt} - 0.000132 \text{ Caco}^3 - 0.001504 \text{ OM} - 0.000255 \text{ CS}$$

که در آن CS: درصد ذرات شن درشت (بزرگ‌تر از ۰/۲ میلی‌متر)، OM: درصد مواد آلی، Caco^3 : درصد آهک خنثی، Silt: درصد سیلت و $K_{F(Vaezi)}$: عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش واعظی و همکاران است ($R^2=96.48\%$) ($R^2\text{-adj}=95.39\%$). سپس فاکتورهای باقی‌مانده در مدل، استانداردسازی شد و مجدداً رگرسیون چندگانه‌ی خطی از آنها تهیه شد (رابطه‌ی ۵).

رابطه‌ی ۵

$$K_{F(Vaezi)S} = -0.0000 - 0.1906 \text{ CS}_S - 0.4542 \text{ OM}_S - 0.1924 \text{ Caco}^3_S + 0.7903 \text{ Silts}_S$$

که در آن CS_S ، OM_S ، Caco^3_S ، Silts_S و $K_{F(Vaezi)S}$ به ترتیب پارامترهای استانداردسازی شده‌ی درصد ذرات شن درشت، درصد مواد آلی، درصد آهک خنثی، درصد سیلت و عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش واعظی و همکاران است. با استفاده از رابطه‌ی ۵ مشخص شد مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار در تعیین فرسایش‌پذیری خاک، فاکتور درصد سیلت است. در این بررسی همچنین مشخص شد که پس از فاکتور درصد سیلت، به ترتیب فاکتورهای مواد آلی، آهک خنثی و ذرات شن درشت (بزرگ‌تر از ۰/۲ میلی‌متر) خاک نسبت به سایر فاکتورهای مورد بررسی، در تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک نقش بیشتری داشته‌است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در بررسی بافت خاک در این حوزه مشخص شد که نمونه‌های برداشت‌شده، دارای بافت سیلتی-لوم (۹۰ درصد) و لومی (۱۰ درصد) بود؛ به طوری که سیلت دارای بیشترین فراوانی ذرات تشکیل‌دهنده خاک است. با توجه به فرسایش‌پذیری بالای سیلت، این مناطق می‌تواند جزء مستعدترین نقاط حوزه نسبت به فرسایش محسوب شود. نتایج این تحقیق نشان داد که به‌طور متوسط نسبت مقدار شن‌ریز به درشت در حدود ۱۸ است و این می‌تواند یکی از عوامل اصلی ایجاد رواناب در خاک آن منطقه باشد. نتایج این تحقیق با مطالعات Bahrami و همکاران (۲۰۰۵) هم‌سویی دارد. آنها اظهار داشتند هر چه مقدار درصد شن خیلی‌ریز در خاک نسبت به شن درشت بیشتر باشد، قابلیت نفوذ آب به داخل خاک کاهش می‌یابد.

میانگین درصد آهک در سه تیپ تراس آبرفتی، تپه و فلات لسی به ترتیب ۲۸/۶، ۳۰/۱۸ و ۲۸/۰۶ اندازه گیری شده که این مقدار، بیش از حد استاندارد آهک (۱۵ درصد) در خاک برای ایجاد خاکدانه‌های پایدار در حالت خیس است (Ayoubi and Jalilian, 2005 & Parsi et al, 2019)؛ بنابراین، به نظر می‌رسد مازاد آن در خاک مرطوب می‌تواند کاهش پایداری خاکدانه‌ها را به همراه داشته باشد. همچنین مشخص شد که مقدار نفوذ نهایی آب به خاک در حد متوسط است و انتظار می‌رود که مقدار رواناب و فرسایش خاک را کنترل کند. اما مقدار بالای آهک خاک در شرایط بارندگی شدید فصلی، پایداری خاکدانه‌ها را به شدت کاهش می‌دهد و با نفوذ آب به خاک، به انحلال آهک خاک و ایجاد فرسایش تونلی به ویژه در اراضی تپه‌ای منجر شده است. بررسی‌های میدانی، از پدیده‌ی تونلی شدن و تراکم زیاد خندق‌ها حکایت دارد که خود دلیلی بر فرسایش‌پذیر بودن این خاک است.

در بسیاری از معادلات برآورد فرسایش خاک، عامل فرسایش‌پذیری خاک به‌عنوان رکن اصلی محاسبه‌ی فرسایش خاک منظور شده است (Vagheie et al, 2005 & Zhao et al, 2018). نمودار ویشمایر، مبنای محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش غیرمستقیم است که در اصل برای خاک‌های غیرآهکی مناطق نیمه‌خشک در ایالات متحده‌ی آمریکا توسعه یافته است. از آنجا که عمده خاک‌های ایران آهکی است، خطای به‌کارگیری نمودار ویشمایر برای چنین خاک‌هایی باید همواره از سوی کاربران قابل توجه قرار گیرد. از آنجا که خاک‌های لسی حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی، منشأ رسوبات آهکی دارد، برای محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک از مدل واعظی استفاده، و با روش‌های نمودار ویشمایر و داده‌های واقعی از روش شبیه‌ساز مقایسه شد.

نتایج آزمون F و گیمز - هاوول نشان داد که با احتمال ۹۵ درصد، بین مقادیر فرسایش‌پذیری از روش واعظی با داده‌های واقعی اختلاف آماری وجود ندارد؛ در حالی که بین روش ویشمایر با داده‌های واقعی و روش ویشمایر با روش واعظی اختلاف آماری مشاهده می‌شود. در این بررسی مشخص شد مقادیر فرسایش‌پذیری برآوردی به روش واعظی در این حوزه، با داده‌های واقعی نسبتاً نزدیک بود ولی برآورد کمتری داشت (همسو با نتایج Arabkhedri و همکاران، ۲۰۲۰)؛ در حالی که روش ویشمایر و اسمیت، با داده‌های فرسایش‌پذیری واقعی تفاوت بسیاری داشت و بیش‌برآورد بود (۱۸/۸ برابر بیشتر). نتایج این تحقیق با مطالعات Vaezi و همکاران (۲۰۰۸)، Vaezi و همکاران (۲۰۰۹)، Ostovari و همکاران (۲۰۱۶)، Khormai و همکاران (۲۰۱۷)، Arabkhedri و همکاران (۲۰۲۰)، Rejman و همکاران (۱۹۹۸) در شرق لهستان، Shi و Yu (۲۰۱۱) در کشور چین، Zhang و همکاران (۲۰۰۴) در اراضی لسی کشور چین، Hussein و همکاران (۲۰۰۷) در شمال عراق، Kiani و Ghezelseflo (۲۰۱۶) در استان گلستان، Zhao و همکاران (۲۰۱۸) در اراضی لسی کشور چین و Man و همکاران (۲۰۲۰) در کشور چین هم‌سویی دارد که همگی اظهار کردند روش نمودار ویشمایر و اسمیت نسبت به داده‌های واقعی، در خاک‌های آهکی بیش‌برآوردی دارد.

نتایج حاصل از رگرسیون چندگانه‌ی خطی و روش گام‌به‌گام نیز نشان داد که مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر تعیین فرسایش‌پذیری خاک، فاکتور درصد سیلت است و پس از آن به ترتیب فاکتورهای مواد آلی، آهک خنثی و ذرات شن درشت اهمیت بالایی دارد. نتایج این بررسی با مطالعات Vaezi و همکاران (۲۰۰۹) همسو است. نتایج این بررسی همچنین با مطالعات Jiang و همکاران (۲۰۲۰) که اظهار داشتند تغییرات فاکتور فرسایش‌پذیری خاک بیش از همه با

تغییرات بافت خاک و مواد آلی خاک ارتباط داشته، کاملاً همسو است اما با مطالعات Man و همکاران (۲۰۲۰) که نتیجه گرفتند در خاک‌های آهکی، مقدار عامل K عمدتاً توسط مواد آلی کنترل می‌شود و سایر خصوصیات خاک از جمله pH، مقدار رس و سیلت به طور غیرمستقیم با تأثیر بر تجمع مواد آلی خاک بر عامل K تأثیر می‌گذارد، نسبتاً همسویی دارد.

مستندات به‌جامانده از مطالعات واعظی و همکاران در منطقه‌ی زنجان نیز نشان داد که مقدار آهک کمتر از ۱۳ درصد، بر مقدار عامل فرسایش‌پذیری نقش کنترلی داشت؛ اما این مدل نمی‌تواند به محاسبه‌ی فرسایش‌پذیری خاک در مناطق با آهک بیش از ۳۰ درصد بپردازد؛ بنابراین، استفاده از مدل واعظی و همکاران در ۲۴ نمونه (از مجموع ۴۲ نمونه) در حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی - که مقدار آهک خنثی در آنها بالای ۳۰ درصد بود - نتوانست به محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک بپردازد. با توجه به توضیحات فوق به‌نظر می‌رسد اینک 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 است و برای مناطقی که درصد آهک در آنها بیش از ۳۰ درصد است، مدل به واسنجی و بروزرسانی نیاز دارد. از سوی دیگر، براساس آنالیز رگرسیون چندگانه‌ی خطی و روش گام به گام مشخص شد که بعد از مقدار سیلت، دومین پارامتر تأثیرگذار بر مقدار فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی مورد مطالعه، ماده آلی خاک است. در عمل، تغییر پارامترهای فیزیکی خاک برای کنترل مقدار فرسایش‌پذیری آن ناممکن است؛ بنابراین، بهترین گزینه برای بهبود ماده آلی خاک استفاده از پلیمرهای محلول در آب است که از قدرت هم‌آوری خوبی برای ذرات خاک برخوردار است. استفاده از پلی‌اکریل‌آمید آنیونی نیز می‌تواند مقدار نفوذ اولیه را به دلیل هم‌آوری ذرات خاک تا ۷۵ درصد و مقدار نفوذ نهایی را تا ۲۵ درصد افزایش دهد (Ghorbani Vagheie et al, 2010). با توجه به اینکه حوزه آبخیز عرب‌قره‌حاجی جزو حوزه‌های تیپیک مطالعاتی اراضی لسی در استان گلستان است، توصیه می‌شود کاربرد این ماده در کاهش مقدار فرسایش و رسوب اراضی لسی این حوزه بررسی شود.

منابع

1. Amiri, Z.; Khormali, F.; & B. Komaki Choghi, 2019. Distribution map of the different lithologic units in loess plateau of eastern Golestan by using remote sensing technique; Aghband research area, *Quaternary Journal of Iran*, 5 (1), 47-58. (in Persian).
2. Arabkhedri, M.; Gerami, Z.; Shadfar, S.; Bayat, R.; Parvizi, Y.; & S. Nabipay Lashkarian, 2020. Comparing the performance of several erodibility indices' equations of USLE model at Laboratory condition, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51 (7), 1725-1736. (in Persian).
3. Ayoubi, Sh., & A. Jalilian., (2005). Land Evaluation. Isfahan University of Technology Publications. Iran. 396 p. (in Persian).
4. Ayoubi, Sh., & M. Hossein Alizadeh., (2007). Assessment spatial variability of soil erodibility by using of geostatistic and GIS (Case study Mehr watershed of Sabzevar). *Journal of the Iranian Natural Resources*. 60 (20), 369-382. (in Persian).
5. Bahrami, H. A.; Gorbani Vaghei, H.; Gorbani Vaghei, B.; Tahmasbipour, N.; & F. Taliey-Tabari, 2005. A New Method for Determining the Soil Erodibility Factor Based on Fuzzy System, *Journal of Agricultural Science and Technology*, 7, 115-123.
6. Feyz Nia, S., 2017. Applied Sedimentology with Emphasis on Soil Erosion and Sediment Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources Publications,

382 p. (in Persian).

7. Gee, G. W., & J. W. Bauder., (1986). Particle Size Analysis. In: Methods of Soil Analysis, Part A. Klute (ed.). 2 Ed., Vol. 9 nd. Am. Soc. Agron., Madison, WI, pp, 383-411.

8. Ghorbani Vagheie, H., & H. Bahrami., (2005). Evaluation of erodibility factor changes with method weighted in USLE and RUSLE models using GIS in soils northeast of Lorestan province. 3rd National Conference on Erosion and Sedimentation. *Soil conservation and watershed management research center of Iran.* (in Persian).

9. Ghorbani Vagheie, H.; Bahrami, H. A.; Ghafarian Mogharab, M. H.; Shahab, H; Fakhtak Taliei Tabari, 2010. Effects of Anionic Polyacrylamide on the Increase of Infiltration Rate, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 39 (1), 77-84. (in Persian).

10. Hussein, M.; Kariem, H.; & A. K. Othman, 2007. Predicting soil erodibility in northern Iraq natural runoff data, *Journal of soil & tillage research*, 94, 220-228.

11. Izanloo, S.; Ghareh Mahmoodlu, M.; Jandaghi, N.; & H. Ghorbani Vagheie, 2019. Changes in surface and subsurface saturated hydraulic conductivity in the loess soils (case study: Agh-Emam 2 watershed, Golestan province), Watershed management MSc thesis, Rangeland and watershed department, Gonbad Kavous University, 75 p. (in Persian).

12. Jafari Honar, A.; Kiani, F.; & F. Khormali, 2015. Effect of climate difference on variation of loess soil erodibility indices in Golestan province, *Journal of Water and Soil Conservation*, 22 (1), 49-70. (in Persian).

13. Kamali, N.; Ahmadi, H.; Sadeghipur, A.; & M. Kamali, 2011. Investigation on Environmental Factors Influencing Water Erosion, Case Study: Taleghan Basin, Varkesh Sub-basin, *Environmental Erosion Research Journal*, 1 (4), 109-124. (in Persian).

14. Karami, E.; Ghorbani Dashtaki, S.; & B. Khalilimoghaddam, 2017. Effects of land management on soil erodibility-A case study in part of Zayandeh-Rood watershed, *Journal of Agricultural Engineering*, 40 (20), 106-119. (in Persian).

15. Kiani, F., & A. Ghezselflo., (2016). Evaluation of soil erodibility factor (k) for loess derived landforms of Kechik watershed in Golestan Province, North of Iran. *Journal of Mountain Science*. 13(11), 2028-2035.

16. Khormai, H.; Kiani, F.; & F. Khomali, 2017. Evaluation of soil erodibility factor (k) for loess derived landforms of Kechik watershed in Golestan province, *Journal of Water and Soil*, 30 (6), 2078-2086. (in Persian).

17. Man, L.; Guilin, H.; Xiaoqiang, L.; Shitong, Z.; Wenxiang, Z.; & Z. Qian, 2020. Effects of soil properties on k factor in the granite and limestone regions of China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (801), 1-13.

18. Mazloun Aliabadi, Y.; Masouri, H.; & H. Emami, 2017. Investigating the relationship between soil quality indices with soil losses and soil erosion index, 15th Iranian Soil Sciences Congress, Isfahan University of Technology, 1-6. (in Persian).

19. Morgan, R. P. C. 1995. Soil erosion and conservation, Second edition, Longman, P, 29-30.

20. Nelson, D. W., & L. E. Sommers., (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties. pp, 539-579.

21. Ostovari, Y.; Ghorbani Dashtaki, Sh.; Bahrami, H.; Naderi, M.; & M. Abbasi, 2016. Spatial variations of soil erodibility and factors affecting it upstream of Sivand Dam, *Quantitative Geomorphological Research*, 4 (3), 127-142. (in Persian).

22. Parsi, Sh.; Pazhouhesh, M.; Gharahi, N.; & Kh. Abdollahi, 2019. Effect of lime on soil wetting depth at different slopes using rain simulator, 1st International and 4th National Conferences on Conservation of Natural Resources and Environment, University of Mohaghegh Ardabili. (in Persian).

23. Pazhouhesh, M.; Kaviani, A.; Givi, J.; Davoudian, A.; & A. Honarbakhsh, 2017. Estimating of the amount of soil loss using universal soil loss equation In the Jonghan watershed, *Journal of Water and Soil Conservation*, 24 (3), 299-306. (in Persian).

24. Jiang, Q.; Zhou, P.; Liao, C.; Liu, Y.; & F. Liu, 2020. Spatial pattern of soil erodibility factor (K) as affected by ecological restoration in a typical degraded watershed of central China, *Science of the Total Environment*, 749, 141609.
25. Rejman, J.; Turski, R.; & J. Paluszek, 1998. Spatial and temporal variability in erodibility of loess soil, *Journal of soil & tillage research*, 46, 61-68.
26. Refahi, H., 2015. Water erosion and its control, 7th edition, Tehran University Publication, 674 p. (in Persian).
27. Sadeghi, H.; Bahrami, H.; Tahmasebipour, N.; & H. Ghorbani Vagheie, 2009. The simplest way to estimate the soil erodibility factor suitable for calcareous soils of Iran, *11th Iranian Soil Sciences Congress*, 1890-1892. (in Persian).
28. Shafiei, F.; Rezvanfar, A.; Hosseini, S. M.; & F. Sarmadian, 2009. Investigating the use of soil protection operations by farmers in Karkheh and Dez watersheds, The 5th National Conference on Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, 1-9. (in Persian).
29. Shi, X. Z., & D. S. Yu., (2001). Measurement of erodibility for soils in subtropical china by simulated and natural rainfall, *Sustaining the Global Farm*, 803-806.
30. Shirazi, E., 2016. Statistical software training Minitab 16, Noruzi Publications, 306 p. (in Persian).
31. Soofi, M. B., & H. Emami., (2017). Evaluation soil erodibility in catchment of Torogh dam of Mashhad. *Environmental Erosion Research Journal*. 7 (3), 25-38. (in Persian).
32. Zhang, K.; Ki, S.; Peng, W.; & B. Yu, 2004. Erodibility of agricultural soil on the loess plateau of China, *Journal of soil & tillage research*, 76(2), 157-165.
33. Zhao, W.; Wei, H.; Jia, L.; Daryanto, S.; Zhang, X.; & Y. Liu, 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.
34. Vaezi, A. R.; Bahrami, H. A.; Sadeghi, H. R.; & M. H. Mahdian, 2008. Determining the estimating error of USLE erodibility factor in calcareous soil of Northwestern Iran, *Journal of Water and Soil*, 22 (2), 61-71. (in Persian).
35. Vaezi, A. R.; Bahrami, H. A.; Sadeghi, H. R.; & M. H. Mahdian, 2009. New nomograph for estimating erodibility factor (K) in some soils of the semi-arid regions in Northwest of Iran, *Journal of Soil and Water Sciences*, 13 (49), 69-80. (in Persian).
36. Wischmeier, W. H., & D. D. Smith., (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. US Department of Agriculture, Washington DC.

Efficiency comparison of the Vaezi model and Wischmeier nomograph for estimating soil erodibility in loess soils (Case study: Arab-Qareh-Haji watershed in Golestan province)

Rajab-Mohammad Eidi: *Msc Student in Watershed Management, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gondad Kavous, Gondad Kavous*

Nader Jandaghi : *Assistant Professor in Engineering Hydrology, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gondad Kavous, Gondad Kavous*

Mojtaba Ghareh Mahmoodlu : *Assistant Professor in Environmental hydrogeology, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gondad Kavous, Gondad Kavous*

Hojat Ghorbani Vagheie : *Assistant Professor in Soil physics and conservation, Natural Resources Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gondad Kavous, Gondad Kavous*

Amin Mohammadi Ostadkelayeh : *Assistant Professor in Geography, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gondad Kavous, Gondad Kavous*

Article History (Received: 2020/10/30

Accepted: 2021/02/10)

Extended abstract

1- Introduction

One of the important parameters for identifying the erosion-sensitive points is the use of soil erodibility factor, which is determined by two methods; direct and indirect methods. The direct method for calculating soil erodibility has good accuracy. However, it is economically expensive. Therefore, this method is not considered by experts. The indirect and conventional method for calculating the soil erodibility is the Wischmeier nomograph method, which was presented for non-calcareous and semi-wet soils of the United States. Since the majority of the soils in Iran are calcareous, hence in this research, the Vaezi method, which is designed for this type of soil, was used. Loess is one of the most important Quaternary sedimentary formations in northeastern Iran, which has variable sedimentation and erosion potential due to its physicochemical properties. This study was conducted to evaluate and compare the estimated values of soil erodibility (K) from two methods of Wischmeier nomograph and Vaezi method in calcareous-loess soils of Arab-Qareh-Haji watershed in the east of Golestan province.

2- Methodology

The study watershed with an area of 2595 hectares is located in the northeast of Golestan province. To perform this research, after the initial studies, the components of the land unit in the study area (including river terrace, loess plateau, and hill) were selected as the working unit. For this purpose, 42 surface samples (0-10 cm depth) were collected from each part of the land unit. In this study, the standard laboratory methods were used to determine the soil physicochemical parameters. Soil physicochemical properties, including soil texture, neutral lime, organic matter, coarse sand, very fine sand+silt, and soil structure, were measured in the laboratory. The saturation hydraulic conductivity of soil in the laboratory was estimated using the falling head method. In this research, the actual soil erodibility was measured using a rain simulator in the field (in plots of 1 m²). Then, spatial changes of soil erodibility in the study area were plotted using GIS software and inverse distance weighting (IDW) method. F-test and Games-Howell at the probability level of 0.05 were used to compare and determine the statistical difference between the estimated erodibility values (the Wischmeier nomograph and Vaezi methods) with actual data. To estimate the most effective parameter in the soil

erodibility using the Vaezi method, multiple linear regression and stepwise methods were used. Statistical tests were performed using Minitab software.

3- Results

The average silt particles in the soil were measured about 60% in the Arab-Qareh-Haji watershed, which plays an important role in the soil erodibility. In this watershed, the ratio of fine sand to coarse sand was calculated about 18, and this can be one of the main causes of runoff in this area. Soil texture assessment in this watershed revealed that around 90 percent of soil samples have silt loam texture, and the rest of the samples has loam one. Also, the average lime in study area was estimated at about 29%. This amount is higher than the standard lime (15%) in the soil to create stable aggregates in the wet state. Then, soil erodibility values were determined by three methods: Wischmeier nomograph, Vaezi method, and rain simulator (actual data). The results showed that the value of soil erodibility using Wischmeier nomograph was estimated at about 30.4 and 18.8 times higher than for the Vaezi method and actual data, respectively. The results of F-test and Games-Howell test with 95% probability showed that there was no significant difference between the soil erodibility from the Vaezi method and the actual data, while there was a significant difference between the Wischmeier method and the actual data. Results of multiple linear regression and stepwise methods showed that the most important variables in estimating the soil erodibility are silt, organic matter, neutral lime factors, and coarse sand, respectively ($R^2 = 0.9648$, $R^2\text{-adj} = 0.9539$). In this study, it was not possible to estimate the soil erodibility factor by Vaezi method due to the high percentage of neutral lime for a number of samples.

4- Discussion & Conclusions

In this study, the average lime was estimated at about 29%. This amount is higher than the standard lime (15%) in the soil to create stable aggregates in the wet state. Therefore, it seems that excess lime in the wet soil can reduce the stability of aggregates. In this watershed, a large number of tunnels and gully were observed, which indicates that this soil is erodible. The statistical analysis results showed that the soil erodibility values from the Vaezi method in this watershed were relatively close to the actual data but were less estimates, while the Wischmeier nomograph method was significantly different from the actual data and was overestimated. However, for areas where the amount of neutral lime was over 30%, the Vaezi method was not able to calculate the soil erodibility factor. Hence, for the areas where the percentage of neutral lime is lower than 30%, the use of the Vaezi method is more suitable than the Wischmeier nomograph method, and for areas where the percentage of neutral lime is higher than 30%, the model needs to be calibrated and updated.

Key Words: Neutral lime, Loess lands, Vaezi method, Soil erodibility, Wischmeier nomograph, Hydraulic conductivity