

تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک و عوامل مؤثر بر آن در بالادست سد سیوند

یاسر استواری - دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
شجاع قربانی دشتکی* - دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
حسینعلی بهرامی - دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
مهدی نادری - دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
مژگان عباسی - استادیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۰۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۸/۲۸

چکیده

فرسایش‌پذیری خاک یکی از عوامل مهم در تخمین درست مقدار فرسایش خاک و ارائه راهکارهای مبارزه با این پدیده است. اهداف این مطالعه، اندازه‌گیری واقعی مقدار فرسایش‌پذیری خاک؛ مقایسه مقدار واقعی فرسایش‌پذیری با مقدار برآوردی توسط رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸)؛ تهیه نقشه تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری و پارامترهای مؤثر بر آن در منطقه بالادست سد سیوند واقع در استان فارس بود. برای این منظور، ۴ کرت استاندارد در شیب‌های ۹٪ ایجاد و در طی یک سال مقدار هدر رفت خاک‌ها حاصل از ۴ رخداد بارندگی در این کرت‌ها اندازه‌گیری شد. میانگین سالانه شاخص فرسایش‌پذیری از رابطه‌ی اصلاح‌شده فورنیه محاسبه شد. نقشه‌ها با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ و در محیط GIS ترسیم گردید. نتایج نشان داد که میانگین مقدار هدر رفت خاک در کرت‌ها $5/8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ya}^{-1}$ و میانگین شاخص فرسایش‌پذیری باران $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ya}^{-1}$ بود. میانگین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در کرت‌های آزمایشی و برآوردی با استفاده از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت به ترتیب $1 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ و $0/014 \text{ t h MJ}^{-1}$ شد که بر اساس رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت در برآورد فرسایش‌پذیری به‌طور میانگین مقدار این فاکتور را ۲ برابر بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند. برای هر دو فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده مدل سمی‌وار یوگرام نمائی با دامنه تأثیر به ترتیب ۳۳۹۹ و ۵۴۳۹ متر بهترین برازش را داشت. در حالی که برای خصوصیات ماده‌آلی، کربنات کلسیم معادل، پایداری خاک‌دانه‌ها و نفوذپذیری که بیشترین همبستگی را با فرسایش‌پذیری واقعی داشتند، مدل کروی واریوگرام بهترین توصیف را داشت. نقشه‌های پهله‌بندی نشان داد که مقدار فرسایش‌پذیری از قسمت‌های مرکزی و مسطح منطقه که تحت کشت گیاهان پوششی قرار دارد به سمت نواحی مرتفع حاشیه‌ای که فاقد پوشش گیاهی مناسب است افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: کریجینگ، شاخص فورنیه، فرسایش‌پذیری، فرسایش‌پذیری.

مقدمه

فرسایش‌پذیری (Erodibility) خصوصیتی از خاک است که میزان حساسیت آن در برابر جدا شدن و انتقال توسط عوامل فرسایش‌دهنده (قطره‌های باران و روان آب) را بیان می‌کند (واعظی و همکاران، ۲۰۰۸). بخشی از این حساسیت، ناشی از مواد مادری خاک‌ها می‌باشد و به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌ها وابسته است (رفاهی، ۱۳۸۵). این فاکتور عموماً به‌عنوان یکی از خصوصیات ذاتی با مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود.

در بسیاری از علوم محیطی از جمله علوم خاک، ویژگی‌هایی هستند که مقادیر آن‌ها به‌صورت پیوسته در فضای چندبعدی توزیع یافته‌اند، یکی از ویژگی‌های خاک تغییرپذیری مکانی آن است (محمدی، ۱۳۸۵). توزیع مکانی خصوصیات و ویژگی‌های خاک و اعمال مدیریت آن بر اساس نتایج روش‌های متداول آمار کلاسیک مانند تجزیه واریانس که موقعیت مکانی داده‌ها را در نظر نمی‌گیرد، کارایی نداشته و حتی ممکن است مشکل‌ساز شوند (محمدی، ۱۳۸۵ و احمدالی، ۱۳۸۸). آمار مکانی و یا زمین‌آمار (Geostatistics) فراهم‌کننده چارچوبی نظری و کاربردی به‌منظور تجزیه و تحلیل مکانی داده‌هاست. یکی از اهداف اصلی آمار مکانی، ارائه مدلی مناسب جهت توصیف متغیر ناحیه‌ای با در نظر گرفتن مؤلفه‌های تغییرپذیری ساختاری و تصادفی است (محمدی، ۱۳۸۵).

ایوبی و حسینعلی‌زاده (۱۳۸۶) به بررسی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک حوضه آبخیز مهر سبزوار با استفاده از روش زمین‌آمار و GIS پرداختند. برای این منظور ۱۱۰ نمونه خاک برداشت و پارامترهای معادله ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) اندازه‌گیری و فرسایش‌پذیری خاک محاسبه شد. فرسایش‌پذیری خاک و مؤلفه‌های مؤثر بر آن با استفاده از روش کریجینگ معمولی پهنه‌بندی و نقشه آن در محیط GIS تعیین شد. حداقل دامنه تأثیر ۳۲۰ متر برای سیلت و موادآلی با مدل کروی و حداکثر دامنه تأثیر ۳۲۰۰ متر برای کلاس نفوذپذیری خاک با مدل گوسی بود. مقایسه نقشه فرسایش-پذیری با نقشه‌های شیب، زمین‌شناسی و قابلیت اراضی به‌صورت جداگانه، نشان داد که الگوی تغییرات این متغیر با توزیع واحدهای زمین‌شناسی منطقه نسبت به نقشه سایر عوامل همخوانی بیشتری دارد.

واعظی و همکاران (۲۰۱۰۲) تغییرات مکانی فاکتور K مدل RUSLE منطقه هسرود ایران را بررسی کردند. برای این منظور تعداد ۳۶ کرت استاندارد ایجاد و مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری گردید و نیز این پارامتر با نمودار ویشمایر و اسمیت تخمین زده شد. نتایج نشان داد که اختلاف بین دو مقدار در سطح ۱٪ معنی‌دار و همبستگی بین آن‌ها خیلی ضعیف ($I=0/21$) بود. مدل کروی نیم‌تغییرنما برای هر دو مقدار فرسایش‌پذیری بهترین برازش را داشت. مقدار دامنه تأثیر برای مقدار اندازه‌گیری شده فرسایش‌پذیری (۲/۴۳ کیلومتر) و کمتر از دامنه تأثیر برای فرسایش‌پذیری تخمین زده شده (۱۱/۵۱ کیلومتر) بود. نتایج این پژوهش دلالت بر بیش برآوردی زیاد نمودار ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) در فاکتور فرسایش‌پذیری خاک بود. فریدی و رضائی (۱۳۹۲) به بررسی تغییرات مکانی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک حوضه آبخیز گابریک استان هرمزگان پرداختند. بدین منظور از ۲۱ نقطه نمونه‌برداری صورت و فرسایش‌پذیری از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) برآورد شد. مناسب‌ترین روش درون‌یابی از بین ۲ روش کریجینگ ساده و کریجینگ معمولی انتخاب گردید. نتایج نشان داد روش کریجینگ ساده با مربع میانگین ریشه خطا برآورد ۰/۰۰۲۶ بر روش دیگر ارجحیت داشت و به‌عنوان بهترین روش درون‌یابی انتخاب گردید. درنهایت با در نظر گرفتن بهترین روش درون‌یابی، نقشه فاکتور فرسایش‌پذیری خاک تهیه شد.

همان‌گونه که گفته شد پدیده هدر رفت خاک یکی از مهم‌ترین مشکلات در حوضه‌های آبخیز کشور است، بنابراین آگاهی از حساسیت خاک به فرسایش و نیز ارائه نقشه توزیع مکانی آن نقش بسیار مهمی را در مدیریت کاربردی مناطق

¹-Vaezi et al

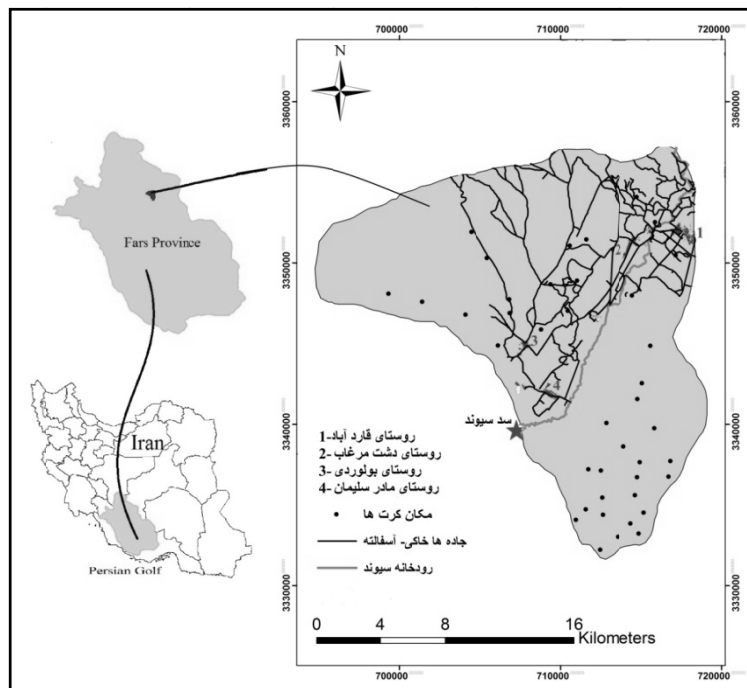
²-Vaezi et al

³-Wishmier and Smith

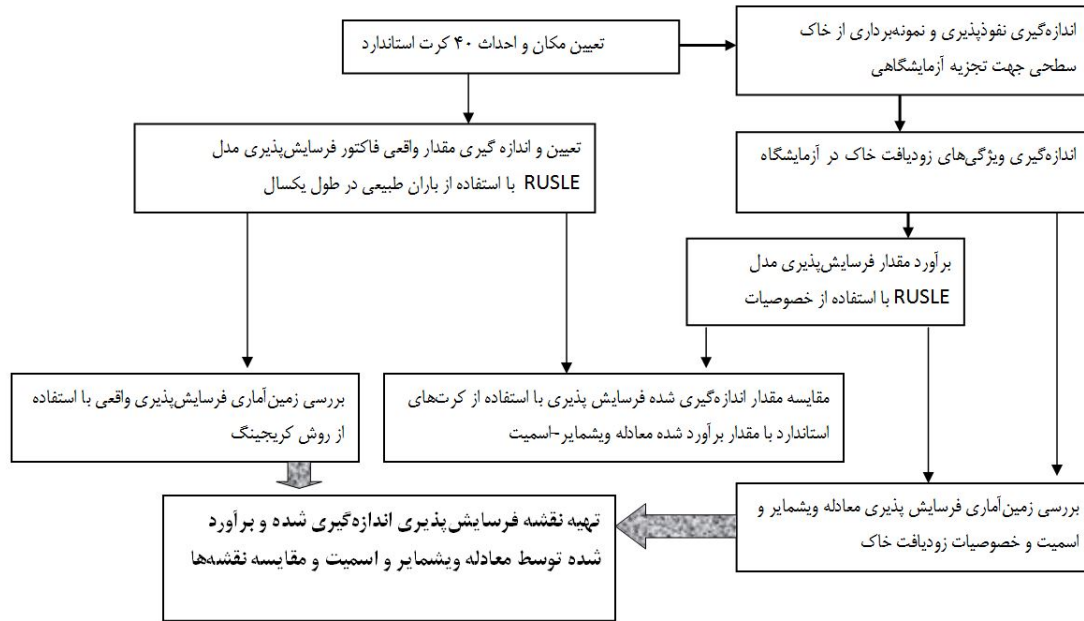
استراتژیک کشاورزی دارد. از آنجائی که تاکنون فرسایش پذیری خاک منطقه‌ی سیمکان (از مناطق کشاورزی مهم استان فارس) مورد بررسی قرار نگرفته است، لذا هدف از این مطالعه (۱) اندازه‌گیری واقعی شاخص فرسایش پذیری مدل RUSLE و بررسی خصوصیات مؤثر بر آن؛ (۲) مقایسه مقدار واقعی شاخص فرسایش پذیری با مقدار برآورد شده توسط رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸)؛ و (۳) بررسی تغییرات مکانی فرسایش پذیری و خصوصیات مؤثر بر آن با استفاده از روش زمین‌آمارى کریجینگ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه سیمکان به وسعت ۳۵۰ کیلومترمربع است. این منطقه در استان فارس، شهرستان پاسارگاد قرار گرفته و از نظر موقعیت جغرافیایی بین $39^{\circ} 56' 52''$ تا $39^{\circ} 48' 53''$ طول شرقی و $30^{\circ} 08' 17''$ تا $30^{\circ} 33' 34''$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). حداکثر ارتفاع حوضه ۳۴۸۱ متر و حداقل ارتفاع در خروجی حوضه‌های (ورودی مخزن سد سیوند) برابر ۱۷۸۴ متر از سطح دریا می‌باشد. از نظر اقلیمی، متوسط دمای سالانه $11/8$ درجه سانتی‌گراد، متوسط بارندگی سالانه $308/6$ میلی‌متر و متوسط تبخیر و تعرق سالانه به روش پنمن مانیتث $1190/4$ میلی‌متر برآورد شده است (گزارش سازمان آب منطقه‌ای استان فارس، ۱۳۸۸). در این محدوده سازند زمین‌شناسی سورمه (با ترکیبات حساس کربنات کلسیم معادلی دولومیتی دانه‌ریز، کربنات کلسیم معادل رسی کم مقاوم قهوه‌ای همراه با مارن و شیل) غالب زمین‌شناسی را شامل می‌شود. رودخانه سیوند از میان منطقه سیمکان عبور کرده که در خروجی حوضه بر روی آن سد سیوند (سیبویه) جهت تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و شرب احداث شده است. از مراکز جمعیتی واقع در حوضه می‌توان به روستاهای بلوردی و مادر سلیمان اشاره کرد (گزارش سازمان آب منطقه‌ای استان فارس، ۱۳۸۸). با توجه به سیل خیز بودن حوضه، لذا ضرورت حفاظت این منابع و جلوگیری از فرسایش بی‌رویه آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. روندنمای تحقیق در شکل ۲ مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه واقع در استان فارس و ایران. نقاط کرت‌های ایجاد شده در شیب ۸ - ۱۰٪



شکل ۲: روندنمای تحقیق حاضر در بررسی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک

شاخص فرسایش‌پذیری (Soil Erosivity) عبارت از ضریبی است که نشان‌دهنده توان فرسایش‌زایی خاک توسط باران است (رفاهی، ۱۳۸۵). در این مطالعه از داده‌های بارش ۸ ساله (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳) ایستگاه باران‌سنجی مادر سلیمان که در مرکز منطقه مورد مطالعه قرار دارد جهت محاسبه شاخص فرسایش‌پذیری باران استفاده شد. شاخص سالانه فرسایش‌پذیری باران از رابطه‌ی اصلاح‌شده فورنیه توسعه‌یافته توسط آرنولدوس^۱ (۱۹۷۷) استفاده گردید:

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{p} \quad (1)$$

$$R = 0.264 F^{1.50} \quad (2)$$

که در این معادلات MFI شاخص اصلاح‌شده فورنیه، R شاخص فرسایش‌پذیری باران ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ya}^{-1}$)، P_i بارندگی ماهانه (mm) و p بارندگی سالانه (mm) است.

در مدل RUSLE مفهوم فرسایش‌پذیری با فاکتور K معرفی شده است که عبارت است از نسبت هدر رفت خاک (A) به عامل فرسایش‌پذیری باران (R) در کورت استاندارد:

$$K = \frac{A}{R} \quad (3)$$

کورت استاندارد کورتی به طول ۲۲/۱ متر و عرض ۱/۸۳ متر با شیب یکنواخت ۹٪ که آیش بوده و در جهت شیب شخم‌خورده است. در واحد متریک A برحسب $\text{t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ و R برحسب $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ است. از آنجائی که اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری به‌طور مستقیم و در شرایط بارندگی طبیعی، وقت‌گیر، مشکل و پرهزینه است، تاکنون

^۱ - Arnoldus

پژوهشگران توابع انتقالی زیادی را جهت برآورد آن توسعه داده‌اند. از جمله ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) نمودار فرسایش پذیری را بر اساس اجزای بافت خاک، درصد ماده آلی، ساختمان خاک و کلاس نفوذپذیری خاک توسعه دادند. همچنین این پژوهشگران با استفاده از روش رگرسیونی بین فرسایش پذیری و ویژگی‌های زود یافت (بیان شده در بالا) تابعی به شکل زیر را توسعه دادند:

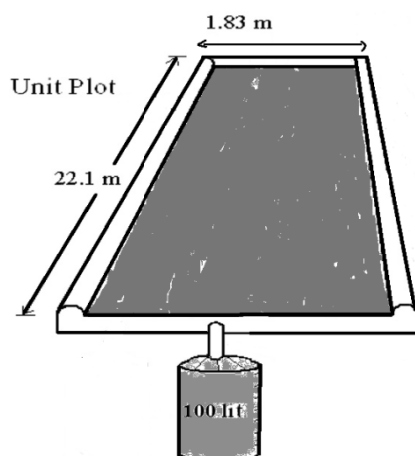
$$K = 2.1 \times M^{1.14} \times 10^{-14} \times (12 - \%OM) + 3.25 \times (S - 2) + (P - 3) \quad (4)$$

که در این معادله OM درصد ماده آلی، S کلاس ساختمان خاک، P کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک و M از طریق معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M = (100 - C) \times (fS + Si) \quad (5)$$

که در آن C درصد رس خاک، fS درصد شن ریز خاک و Si درصد سیلت خاک است.

شاخص فرسایش پذیری خاک به طور مستقیم از تقسیم مقدار هدر رفت خاک به مقدار شاخص فرسایش پذیری باران محاسبه شد. برای اندازه‌گیری مقدار هدر رفت خاک، ۴۰ کرت استاندارد با پراکنش خوب (شکل ۱) که بیشتر بر روی لندفرم‌های بادبزن و دشت‌های سیلابی قرار داشت در منطقه احداث شد (شکل ۲). در این پژوهش کرت‌های استاندارد با پشته‌های خاکی با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و لایه‌ای نایلونی در میان پشته‌ها ایجاد گردید. جهت جلوگیری از ورود رواناب از بالادست و خروج رواناب از درون کرت، بالا و پائین کرت‌ها با ورقه‌های گالوانیزه با پهنای ۳۰ سانتی‌متر به گونه‌ای که ۱۰ سانتی‌متر آن در خاک فرو رود محصور شد (واعظی و همکاران، ۲۰۰۸). سیستم جمع‌کننده رواناب شامل لوله انتقال رسوب و تانکر ۱۰۰ لیتری در انتهای هر کرت نصب گردید. جهت جلوگیری از رویش علف‌های هرز در کرت‌ها در طول سال از علف‌کش استفاده شد (واعظی و همکاران، ۲۰۰۸). شکل ۳ کرت استاندارد و سیستم جمع‌کننده رسوب را نشان می‌دهد (واعظی و همکاران، ۲۰۰۸).



شکل ۳: کرت استاندارد و سیستم جمع‌کننده رسوب (واعظی و همکاران، ۲۰۰۸)

از هر کرت تعداد ۳ نمونه خاک سطحی از ۰-۲۵ سانتی‌متری برداشت و پس از مخلوط کردن یک نمونه مرکب ایجاد و در هر نمونه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به شرح زیر اندازه‌گیری شد: چگالی ظاهری خاک به روش استوانه (بلک و هورتج^۱، ۱۹۸۶)، بافت خاک به روش هیدرومتری، واکنش نمونه‌های خاک به وسیله pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی به وسیله هدایت سنج، کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک ۲ نرمال و درصد کربن آلی خاک به روش اکسایش‌تر (والکی و بلک، ۱۹۳۴)^۲ تعیین شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در حالت

^۱ -Blake and Hartge

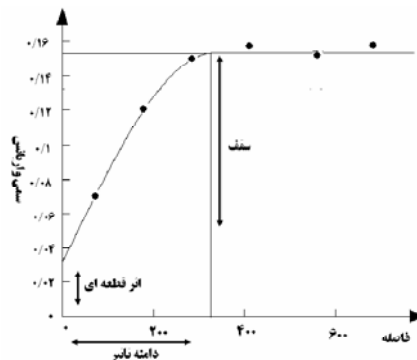
^۲ - Walky A. and Black

مرطوب با الک‌هایی در اندازه قطرهای مختلف تعیین گردید. نفوذپذیری خاک بر اساس سرعت نهایی نفوذ آب با استفاده از روش استوانه دوگانه در هر کرت با ۳ تکرار در فصل خشک سال (جهت کاهش اثر رطوبت پیشین بر سرعت نفوذ) اندازه‌گیری شد (واعظی و همکاران، ۲۰۰۸).

روش کریجینگ متکی بر میانگین متحرک وزنی بوده و بهترین تخمین گر ناریب می‌باشد که علاوه بر مقادیر برآورد شده، میزان خطای تخمین در هر نقطه را نیز مشخص می‌نماید (شی و همکاران، ۲۰۰۷)^۱. موفقیت این روش در درون‌یابی متغیرها کاملاً وابسته به دقت در انتخاب مدل سمی‌واریوگرام دارد. در ابتدا سمی‌واریوگرام تجربی ($\gamma(h)$) محاسبه گردید:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (6)$$

که در آن N : تعداد جفت مشاهدات، $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ مقدار مشاهدات متغیرها در نقطه‌های x_i و x_i+h است. هرسمی‌واریوگرام سه ویژگی اصلی دارد (شکل ۴). فاصله‌ای که در آن واریوگرام به حد ثابتی رسیده و به حالت خط افقی نزدیک می‌شود، دامنه یا شعاع تأثیر نامیده می‌شود (شکل ۴). این دامنه محدوده‌ای را مشخص می‌کند که می‌توان از داده‌های موجود در آن برای برآورد مقدار متغیر مجهول استفاده کرد. به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه‌ی تأثیر به آن می‌رسد آستانه (سقف) ($C_0 + C$) گفته می‌شود. در روش کریجینگ، واریوگرام‌هایی که دارای آستانه مشخصی هستند، اهمیت بیشتری دارند. مقدار واریوگرام در مبدأ مختصات، یعنی به ازای $h=0$ را اثر قطعه ای (C_0) می‌نامند که در حالت آرمانی مقدار C_0 باید صفر باشد (شکل ۴). نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر (C_0/C_0+C) شاخصی از قدرت ساختار مکانی در متغیرها می‌باشد چنانچه این نسبت کمتر از ۰/۲۵ گردد نشان‌دهنده همبستگی مکانی قوی است. اگر این نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ قرار گیرد بیانگر همبستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بزرگ‌تر از ۰/۷۵ گردد نشان‌دهنده وابستگی مکانی ضعیف خواهد بود (کامبردلا و همکاران، ۱۹۹۴)^۲. همبستگی قوی مکانی به این معنی است که در دامنه تأثیر می‌توان متغیر موردنظر را تخمین زد.



شکل ۴: سمی‌واریوگرام تجربی (استواری و همکاران، ۱۳۹۰)

¹ - Shi et al

² - Cambardella

سپس مدل‌های تئوری سمی‌واریوگرام کروی، نمائی و گوسی برازش داده شد و بهترین مدل انتخاب گردید. پس از تعیین مدل واریوگرام، از آن برای محاسبه وزن در روش کریجینگ استفاده شد. معادله اساسی کریجینگ به شکل زیر است (ایوبی و حسینعلی‌زاده، ۱۳۸۶؛ هنگل و همکاران، ۲۰۰۴):

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i \times f_i \quad (7)$$

که در آن: $F(x, y)$ مقدار تخمین زده شده پارامتر در نقطه‌ای با مختصات x و y ; n تعداد نقاط اندازه‌گیری شده؛ w_i وزن نسبت داده شده به هر نقطه i ؛ و f_i مقادیر پارامتر در هر نقطه اندازه‌گیری i است. برای ارزیابی مدل‌های واریوگرام انتخاب شده دو معیار زیر محاسبه شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X(p)_j - X(m)_j)^2}{n}} \quad (8)$$

با استفاده از معادله ۸، معیار سوم: $\%RMSE$ حساب شد:

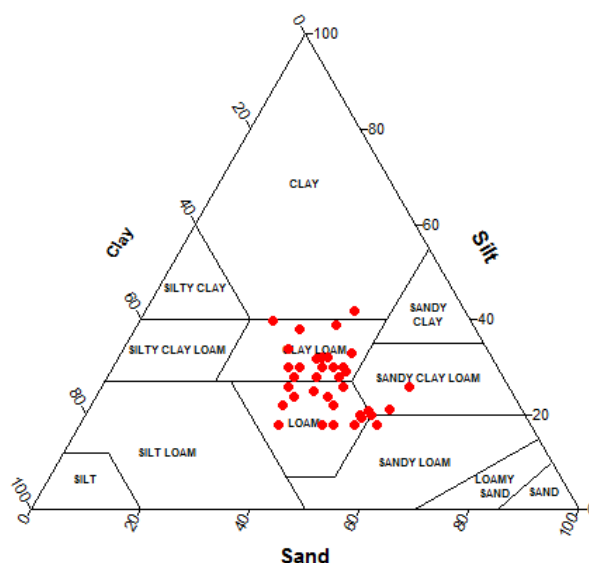
$$\%RMSE = (RMSE / \bar{X}) \times 100 \quad (9)$$

$RMSE$: ریشه میانگین مربعات خطا، $X(p)$: مقادیر برآورد شده، $X(m)$: مقادیر اندازه‌گیری شده، n : تعداد نمونه‌ها و \bar{X} : میانگین هر پارامتر اندازه‌گیری شده است. معیار $RMSE$ نسبت به داده‌های پرت حساس است، به همین دلیل می‌توان از $\%RMSE$ استفاده کرد. کوچک‌تر بودن این ویژگی، دلیلی بر دقت بالاتر تخمین‌ها و یا اختلاف کم بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده می‌باشد. حد قابل قبول $RMSE$ ۴۰٪ و $RMSE$ ۷۱٪ بالاتر از درصد به معنی عدم دقت در نظر گرفته شده است (هنگل و همکاران، ۲۰۰۴). تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل خلاصه آماری، آزمون نرمالیت و آزمون t با استفاده از نرم‌افزار Statistica 8.0، محاسبات زمین‌آمار و تهیه نقشه‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Variowin 2.2 و GIS انجام شد.

نتایج و بحث

خلاصه آماری

شکل ۵ توزیع ذرات نمونه‌های خاک را در مثلث بافت خاک نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۴ بیشتر نمونه‌های خاک در سه کلاس لوم، لوم رسی و لوم رسی شنی قرار دارند.



شکل ۵: توزیع اندازه ذرات در مثلث بافت خاک

جدول ۱ خلاصه آماری مقدار فرسایش‌پذیری برآورد شده با استفاده از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. محتوای رس با میانگین ۲۶/۷٪ از ۱۷/۹ تا ۴۱/۹ درصد متغیر بود. درصد شن از ۲۴/۱ تا ۵۶/۰٪ و با میانگین ۴۱/۱٪ متغیر بود. خاک‌های منطقه دارای مقدار متوسط ماده‌آلی ۳/۱۳٪ بودند. نفوذپذیری بر اساس مقدار نفوذ نهایی در کلاس‌های ۳ و ۴ قرار داشت و از ۰/۸ تا ۳/۴ سانتی‌متر بر ساعت متغیر بود. اگرچه خاک‌ها دارای مقادیر بالایی کربنات کلسیم معادل (متوسط ۴۵/۲٪) بودند، با این حال خاکدانه‌ها در کلاس پایداری متوسط قرار داشتند. میانگین فرسایش‌پذیری حاصل از رابطه‌ی ویشمایر اسمیت (۱۹۷۸) t $MJ^{-1} mm^{-1}$ h^{-1} 0.30 و از 0.15 تا $0.47 t h MJ^{-1} mm^{-1}$ متغیر بود (جدول ۱). میانگین مقدار شاخص فرساینده‌ی باران به دست آمده از معادله اصلاح شده فورنیه حاصل از داده‌های بارش ۸ ساله ایستگاه مادر سلیمان MJ $mm^{-1} h^{-1} ya^{-1}$ $255/7$ و از حداقل $56/9$ تا حداکثر $723/0 MJ mm^{-1} h^{-1} ya^{-1}$ متغیر بود. کولی و همکاران^۱ (۲۰۰۹) و ایروم و همکاران^۲ (۲۰۰۷) همبستگی بالایی را بین شاخص فورنیه اصلاح شده و شاخص فرساینده‌ی باران را گزارش کردند. هیو و همکاران^۳ (۲۰۱۰) و الکزکیس و همکاران^۴ (۲۰۱۳) نیز از شاخص فورنیه اصلاح شده برای محاسبه فرساینده‌ی باران استفاده کردند. از آنجائی ایستگاه مادر سلیمان تنها ایستگاه موجود در منطقه است، لذا از مقدار میانگین شاخص فرساینده‌ی باران حاصل از این ایستگاه جهت محاسبات بعدی استفاده گردید.

^۱ - Kouli et al

^۲ - Irvem

^۳ - Hui et al

^۴ - Alexakis

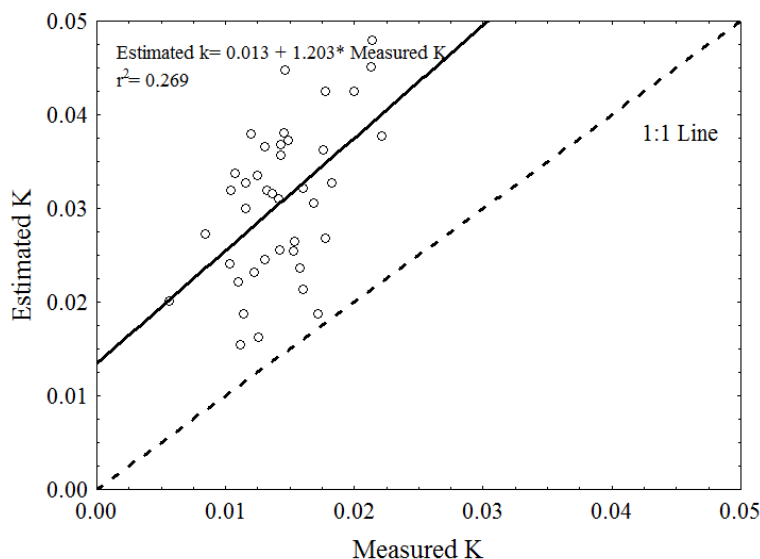
جدول ۱: خلاصه آماری فرسایش پذیری برآورد شده و خصوصیات فیزیکوشیمیایی

K ($t h MJ^{-1} mm^{-1}$)	CaCO ₃ (%)	MWD (mm)	PE ($cm h^{-1}$)	VFS (%)	OM (%)	FS (%)	Cl (%)	Si (%)	Sa (%)	
۰/۰۳۰	۴۵/۲	۱/۵۲	۲/۰۶	۱۷/۱	۳/۱۲	۱۰/۱	۲۶/۷	۳۲/۳	۴۱/۱	میانگین
۰/۰۱۵	۱۱/۵	۰/۸۵	۰/۸۰	۱/۳	۱/۸۵	۴/۶	۱۷/۹	۱۸/۰	۲۴/۱	حداقل
۰/۰۴۷	۶۶/۵	۲/۵۴	۳/۴۰	۲۹/۵	۳/۸۵	۱۶/۵	۴۱/۹	۴۶/۰	۵۶/۰	حداکثر
۰/۰۰۷	۱۲/۱	۰/۴۹	۰/۵۶	۶/۸	۰/۴۸	۲/۶	۶/۶	۵/۷	۷/۴	انحراف معیار

Sa ; Si: Silt; Cl: Clay; FS: Fine sand; OM: Organic matter; VFS: Very find sand; PE: Permeability; MWD: Water aggregate stability , CaCO₃: Calcium carbonate

در طول دوره یک ساله (پاییز ۹۳ تا پاییز ۹۴) در منطقه مورد مطالعه ۸ رخداد بارندگی صورت پذیرفت که تنها ۴ مورد منجر به تولید رواناب و ایجاد رسوب گردید. میانگین مقدار هدر رفت سالانه خاک در کرت‌های استاندارد $t ha^{-1}$ $5/85 ya^{-1}$ و از حداقل $1/438 t ha^{-1} ya^{-1}$ تا $6/382 t ha^{-1} ya^{-1}$ متغیر بود. لذا با توجه با مقدار هدر رفت خاک و میانگین شاخص فرسایش‌دهی سالانه باران ($255/7 MJ mm ha^{-1} h^{-1} ya^{-1}$) مقدار فرسایش‌پذیری محاسبه شد. حداقل، حداکثر و میانگین فرسایش‌پذیری به ترتیب $0/005$ ، $0/025$ و $0/014 t h MJ^{-1}$ بود. مقایسه مقادیر میانگین فرسایش‌پذیری برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (1978) ($0/030 t h MJ^{-1}$) با میانگین مقدار اندازه‌گیری شده ($t h MJ^{-1}$) $0/014$ مبین آن است که مقدار اندازه‌گیری شده فرسایش‌پذیری از $1/08$ تا $3/57$ با میانگین $2/18$ برابر به‌طور معنی‌داری کوچک‌تر از مقدار فرسایش‌پذیری برآورد شده است ($p < 0/05$). در مطالعه واعظی و همکاران (2010) نیز فرسایش‌پذیری حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (1978) از $4/40$ تا $17/64$ برابر بزرگ‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده این شاخص بود. می‌توان بیان داشت از آنجائی که رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (1978) برای مناطقی با بارندگی $mm h^{-1}$ 63 و خاک‌های با کربنات کلسیم معادل فقیر در آمریکا توسعه‌یافته است، در بیشتر مناطق کشور ما کارایی خوبی ندارد. زیرا که نه تنها مقدار بارندگی بسیار کمتر از $63 mm h^{-1}$ است، بلکه مقدار بالای کربنات کلسیم معادل در خاک‌ها باعث خاکدانه‌سازی بهتر و مقاومت خاکدانه‌ها در مقابل عوامل فرسایش می‌شود (رفاهی، 1385).

شکل ۶ رابطه‌ی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (1978) را نشان می‌دهد. بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده یک رابطه‌ی خطی افزایشی معنی‌داری با ضریب تعیین ($R^2 = 0/269$) وجود دارد. باین‌حال چنانچه گفته شد رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (1978) در برآورد فرسایش‌پذیری از کارایی خوبی برخوردار نیست. در شکل ۵ می‌توان دید که مقادیر برآورد شده فرسایش‌پذیری حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (1978) ناریبی بسیاری زیادی از خط $1:1$ را نشان می‌دهد. رابطه‌ی بین فرسایش‌پذیری برآورد شده و اندازه‌گیری شده بیانگر آن است که همواره رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (1978) به مقدار $t h MJ^{-1}$ $0/013$ (عرض از مبدأ معادله خط) دارای بیش‌برآوردی است (شکل ۶). جدول ۲ همبستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده با خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک را نشان می‌دهد. اجزای رس و شن ریز خاک هیچ‌گونه همبستگی با فرسایش‌پذیری خاک نداشتند (جدول ۲).



شکل ۶: رابطه‌ی فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده

جدول ۲: همبستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

VFS	PE	MWD	FS	CaCO ₃	OM	Sa	Si	Cl	
							۱/۰۰	-/۲۹	Si
						۱/۰۰	**./۵۲-	***-/۰۶۷	Sa
					۱/۰۰	-/۲۳	-/۲۱-	-/۰۸	OM
				۱/۰۰	**./۵۱	**./۵۶	*./۴۹-	-/۰۲۱	CaCO ₃
			۱/۰۰	-/۲۳-	-/۱۴-	-/۱۸-	-/۲۰	-/۰۲	FS
		۱/۰۰	**./۴۵-	*./۳۶	**./۵۸	-/۱۸	-/۲۹-	-/۰۵	MWD
	۱/۰۰	*./۳۷	-/۲۴-	**./۵۱	**./۵۴	**./۴۹	**./۴۲-	-/۰۱۸	PE
۱/۰۰	-/۲۸-	-/۳۱-	-/۰۶	-/۲۶	-/۲۳-	*./۳۵	-/۰۳	**-/۰۴۲	VFS
./۴۳	*./۷۷-	**./۵۸-	-/۳۰	**./۵۲-	***./۶۰-	*./۳۲-	**./۴۷	-/۰۵-	K

Sa: Sand; Si: Silt; Cl: Clay; FS: Find sand; OM: Organic matter; VFS: Very find sand; PE: Permeability; MWD: Water aggregate stability; CaCO₃: Calcium carbonate; ***: Correlation significant at p<0.001; **: Correlation significant at p<0.01; *: Correlation significant at p<0.05

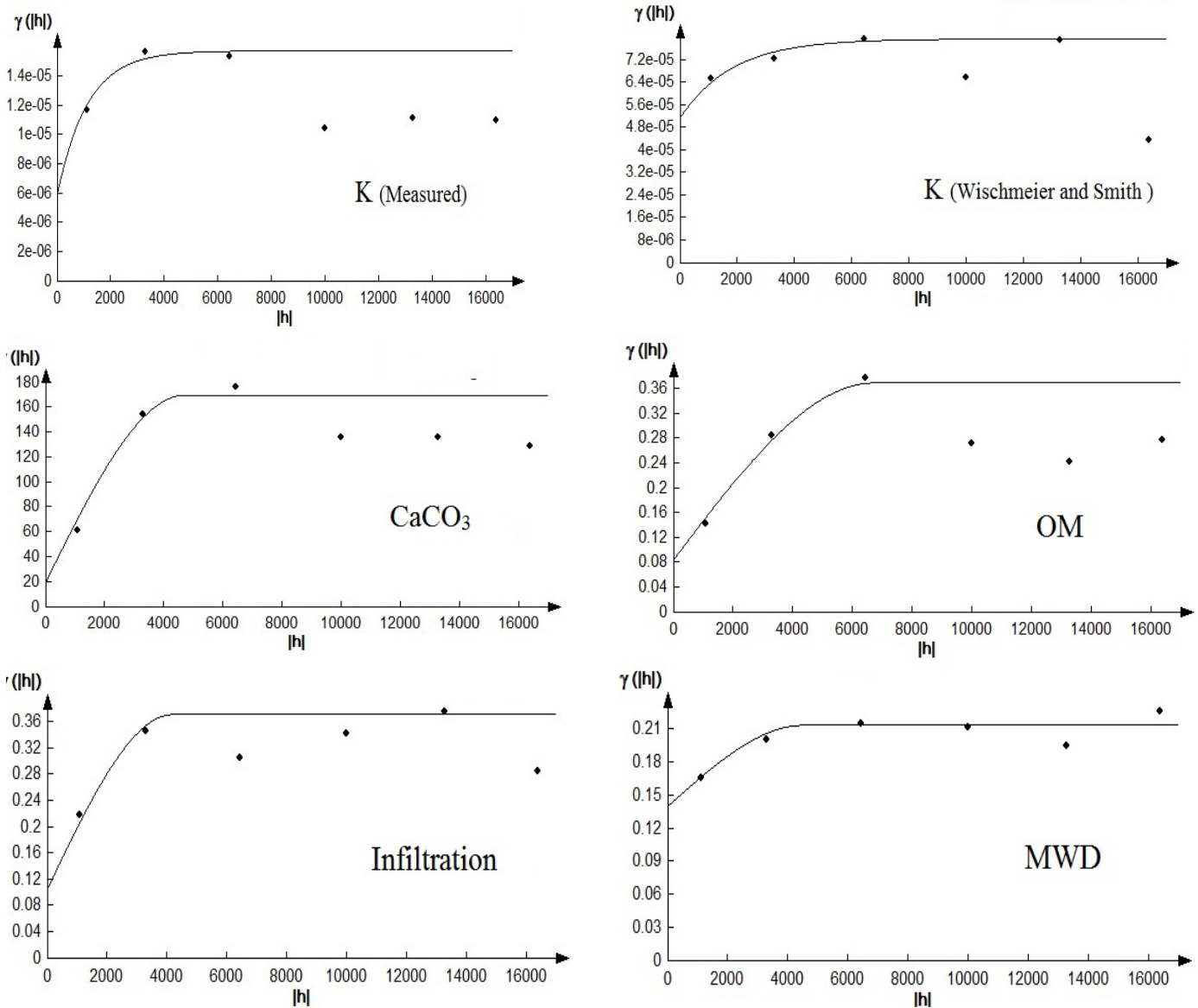
فرسایش‌پذیری بیشترین همبستگی ($r = -0.77$) را نفوذپذیری خاک دارد. یو و همکاران^۱ (۲۰۰۶) و اعطی و همکاران (۲۰۰۸) نیز همبستگی بالا و منفی نفوذپذیری با فرسایش‌پذیری را گزارش کردند. ماده‌آلی با تأثیر مثبت بر خاکدانه‌سازی، مقدار نفوذپذیری خاک افزایش و در نتیجه فرسایش‌پذیری کاهش می‌یابد (همبستگی منفی معنی‌دار بین ماده‌آلی و فرسایش‌پذیری بیانگر این نکته است جدول ۲). سانتز و همکاران^۲ (۲۰۰۳) و تجادا و گزالس^۳ (۲۰۰۶) نیز اثر معنی‌دار ماده‌آلی و ذرات شن در کاهش مقدار فرسایش‌پذیری را گزارش کرده بودند. محتوای کربنات کلسیم معادل با فرسایش‌پذیری همبستگی معنی‌دار منفی دارد (جدول ۲). کربنات کلسیم معادل با علاوه بر افزایش مقاومت خاک به جدا شدن ذرات توسط قطره باران و رواناب، با داشتن اثر معنی‌دار بر خاکدانه سازی مقدار نفوذپذیری را افزایش و به دنبال

^۱ - Yu et al

^۲ - Santos et al

^۳ - Tejada and Gonzalez

آن رواناب کاهش می‌یابد. چنانچه گفته شد در توسعه‌ی رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) تنها پنج خصوصیت فیزیکی خاک (اجزای بافت خاک، درصد ماده‌آلی، ساختمان خاک و کلاس نفوذپذیری خاک) در نظر گرفته شده است، درحالی‌که در مطالعه حاضر خصوصیتی مانند محتوای کربنات کلسیم معادل تأثیر بسزا و معنی‌داری بر مقدار فرسایش پذیری خاک دارد. در این مطالعه علاوه بر فرسایش‌پذیری واقعی و برآورد شده، عواملی که بیشترین همبستگی را بر فرسایش‌پذیری واقعی داشتند شامل ماده‌آلی، پایداری خاکدانه‌ها، درصد کربنات کلسیم معادل و نفوذپذیری نیز مورد تجزیه و تحلیل زمین-آماري قرار گرفتند. بر اساس آزمون کلموگرف-اسمیرنوف همه خصوصیات مورد مطالعه نرمال بودند. شکل ۷ سیمی-واریوگرام ماده‌آلی، پایداری خاکدانه‌ها، درصد کربنات کلسیم معادل، نفوذپذیری، فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷: سیمی-واریوگرام تجربی فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده

هر دو فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده و دیگر خصوصیات مورد تجزیه و تحلیل همسانگرد بودند. همگن بودن متغیرها دلیل بر عدم تغییر ناموزون آن در جهت‌های مختلف نیست، بلکه به دلیل تکرارهای مکرر پیچیدگی طبیعی (شکل و جهت شیب، تنوع زمین‌شناسی و ...) این همگنی و یکنواختی حاصل شده است (ایوبی و حسینعلی‌زاده، ۱۳۸۶). ونگ و همکاران (۲۰۰۱) همسان‌گردی فرسایش‌پذیری و پارامترهای مؤثر بر آن را گزارش کردند. مدل نمائی بهترین برازش را بر هر دو نوع فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده و مدل کروی در توصیف ماده‌آلی، پایداری خاکدانه‌ها، درصد کربنات کلسیم معادل و نفوذپذیری بهترین عملکرد را داشت. در پژوهش واعظی و همکاران (۲۰۱۰) سمی‌واریوگرام کروی بهترین نوع مدل در توصیف فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) بود. همچنین در مطالعه پژوهش و داودی‌ان‌دهکردی (۱۳۹۳) مدل کروی واریوگرام بهترین برازش را بر فرسایش‌پذیری حاصل از معادله ویشمایر و اسمیت و پارامترهای مرتبط با آن داشت.

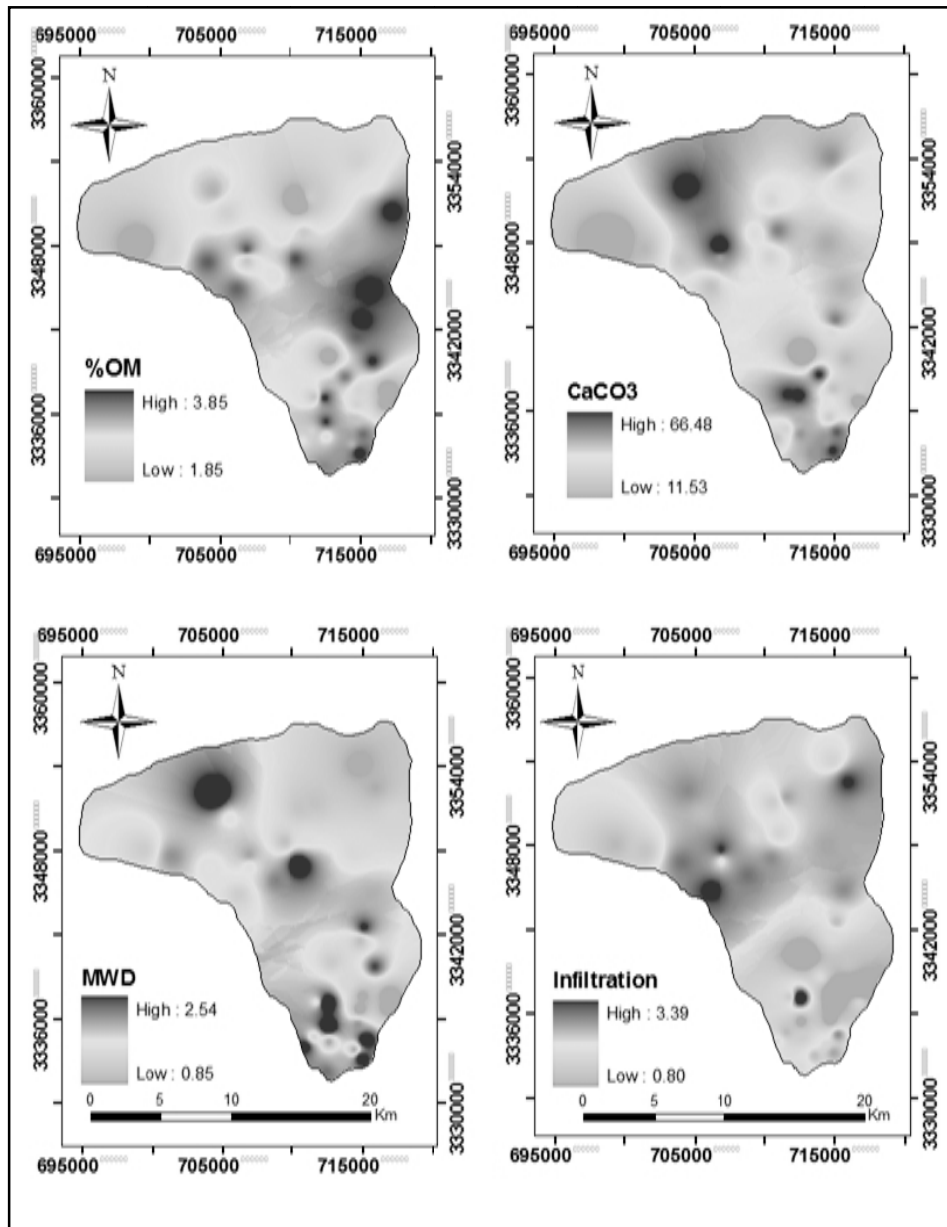
جدول ۳ خصوصیات سمی‌واریوگرام تجربی برازش شده بر فرسایش‌پذیری (اندازه‌گیری شده و برآورد شده) و ماده‌آلی، پایداری خاکدانه‌ها، درصد کربنات کلسیم معادل و نفوذپذیری را نشان می‌دهد. مقدار دامنه تأثیر از ۳۳۹۹ متر برای فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده تا ۶۷۰۷ متر برای ماده‌آلی متغیر بود. فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده دامنه تأثیر کمتری نسبت به فرسایش‌پذیری برآورد شده داشت. در مطالعه واعظی و همکاران (۲۰۱۰) نیز فرسایش‌پذیری برآورد شده دامنه تأثیر بیشتری نسبت به فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده داشت. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر برای هر دو فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده و سایر خصوصیات بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ بود که کلاس وابستگی متوسط مکانی را نشان می‌دهد (کامبردلا و همکاران، ۱۹۹۴). مقدار $RMSE\%$ برای فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده، کربنات کلسیم معادل، پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری کمتر از ۴۰ بود که دقت بالای تخمین را نشان می‌دهد (جدول ۳) درحالی‌که مقدار این شاخص برای فرسایش‌پذیری برآورد شده و ماده‌آلی بیشتر از ۴۰ بود که دقت متوسط و قابل قبول تخمین را نشان می‌دهد (هنگل و همکاران، ۲۰۰۴).

جدول ۳: خصوصیات سمی‌واریوگرام برازش شده بر فرسایش‌پذیری (اندازه‌گیری شده و برآورد شده) و سایر خصوصیات اندازه‌گیری شده

نفوذپذیری	پایداری خاکدانه‌ها	کربنات کلسیم معادل	ماده‌آلی	برآورد شده	اندازه‌گیری شده	
کروی	کروی	کروی	کروی	نمائی	نمائی	مدل سمی‌واریوگرام
۴۱۷۰	۴۵۱۰	۴۶۷۳	۶۷۰۷	۵۴۳۹	۳۳۹۹	دامنه تأثیر برحسب متر (Rang)
۰/۱۰۶۵	۰/۱۴۰۹	۱۹/۸۶	۰/۰۸۵۸	۵/۲× ۱۰-۵	۶/۰× ۱۰-۶	اثر قطعه‌ای (Nugget: C0)
۰/۲۶۶	۰/۰۷۴	۱۴۸	۰/۰۲۸۵	۲/۸× ۱۰-۵	۹/۸× ۱۰-۶	آستانه تأثیر (Sill: C0+C)
۰/۲۸	۰/۶۶	۰/۱۱	۰/۷۳	۰/۶۵	۰/۳۷	(C0/ C0+C)
متوسط	متوسط	خوب	متوسط	متوسط	متوسط	کلاس وابستگی مکانی
۰/۳۴	۰/۲۹	۲۸/۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۳۲	۰/۰۰۵۳	RMSE
۱۷	۱۹	۳۴	۵۱	۴۴	۳۸	%RMSE

شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی حاصل از روش کریجینگ ماده‌آلی، پایداری خاکدانه‌ها، درصد کربنات کلسیم معادل و نفوذپذیری را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل مشخص است کربنات کلسیم معادل و پایداری خاک دارای روند تغییرات مکانی مشابهی هستند. از دلایل شباهت در روند تغییرات مکانی این دو خصیصه می‌توان به اثر معنی‌دار کربنات کلسیم معادل در خاکدانه‌سازی و در نتیجه افزایش مقدار پایداری خاکدانه‌ها خاک اشاره کرد (همبستگی معنی‌دار این دو پارامتر با

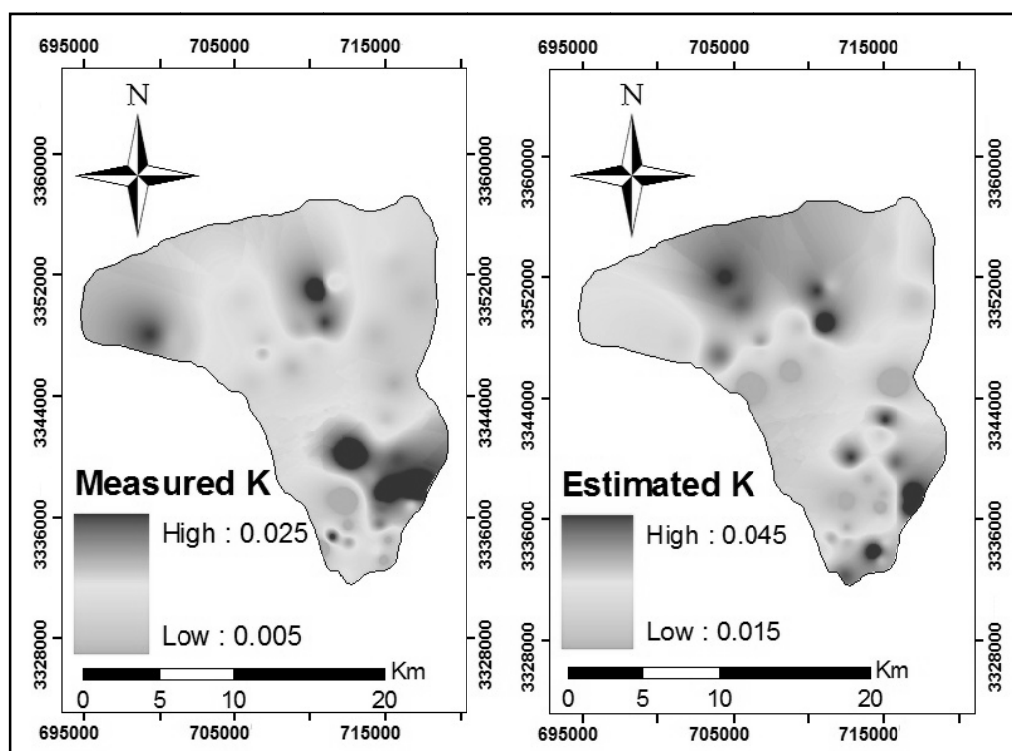
یکدیگر مبین این نکته است (جدول ۲). این خصوصیات از مناطق مرکزی به سمت شمال منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. با این حال در مناطق مرکزی مقدار ماده آلی نسبت به سایر مناطق بیشتر است که می‌توان آن را به فعالیت‌های کشاورزی موجود ارتباط داد. در مناطق مرکزی فعالیت‌های کشاورزی موجب افزایش ماده آلی و به دنبال آن افزایش نفوذپذیری شده است. رابطه‌ی معنی‌دار مثبت بین ماده آلی با فرسایش‌پذیری نشان‌دهنده اثر مثبت ماده آلی در افزایش مقدار نفوذپذیری شده است.



شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی حاصل از روش کریجینگ ماده آلی، پایداری خاکدانه‌ها، درصد کربنات کلسیم معادل و نفوذپذیری

در قسمت‌های مرکزی دشت بیشتر دشت‌های سیلابی داده می‌شود. لذا در این مناطق به دلیل وجود خاک‌های عمیق مقدار نفوذپذیری بیشتر از قسمت‌های دیگر منطقه مورد مطالعه است. شکل ۹ نقشه تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) را نشان می‌دهد. تغییرات مکانی فرسایش-

پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده از روند تقریباً یکسانی برخوردار هستند به‌گونه‌ای که از قسمت‌های میانی دشت به حواشی منطقه مقدار فرسایش‌پذیری افزایش می‌یابد. این روند مشابه تغییرات مکانی را می‌توان با رابطه‌ی خطی معنی‌دار ($R^2=0/۲۶۹*$) بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده (شکل ۵) ارتباط داد. مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده به ترتیب از $0/0۰۵$ و $0/0۱۵$ $t h MJ^{-1}$ در قسمت‌های مرکزی تا $0/0۲۵$ و $0/0۴۵$ در قسمت جنوب شرقی و شمال غربی دشت متغیر است. باید بیان کرد که در قسمت‌های تحت کشاورزی (مناطق مرکزی و قسمت‌های شمالی) بادبزن‌ها و دشت‌های سیلابی که محل تجمع رسوبات هستند لندفرم غالب در این مناطق محسوب می‌شوند. چنانچه قبلاً گفته شد سازند غالب منطقه مورد مطالعه سازند سورمه است. این سازند با داشتن ترکیبات حساس کربنات کلسیم معادلی دولومیتی دانه‌ریز، کربنات کلسیم معادل رسی کم مقاوم قهوه‌ای همراه با مارن و شیل نسبت به فرسایش آبی حساس بوده و پدیده انحلال موجب ناهمواری‌هایی کوچک در سطح می‌گردد (احمدی و سادات‌فیض‌نیا، ۱۳۸۵). در قسمت مرکزی دشت به دلیل کشت محصولاتی مانند یونجه، جو و گندم که سطح خاک را در مقابل فرسایش می‌پوشانند و منجر به افزایش مقدار ماده‌آلی خاک می‌شوند (شکل ۸)، مقدار حساسیت خاک به فرسایش نسبت به سایر نقاط کمتر است. درحالی‌که در دیگر نواحی به دلیل پوشش گیاهی ضعیف و عدم وجود مراتع خوب و متراکم، سازند سورمه در ارتفاعات، تپه‌ماهورها و شیب‌های زیاد دارای رخنمون بوده و بنابراین مقدار حساسیت خاک به فرسایش در این مناطق زیاد است.



شکل ۹: نقشه پهنه‌بندی حاصل از روش کریجینگ فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از این مطالعه بررسی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک و پارامترهای مؤثر بر این خصیصه در منطقه بالادست سد سیوند بود. نتایج نشان داد که میانگین مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در کرت‌های استاندارد و برآورد شده با استفاده از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) به ترتیب $0/0۱۴$ و $0/0۳۰$ $t h MJ^{-1}$ شد. اگرچه ارتباط معنی‌دار نسبتاً خوبی ($R^2=0/۲۶۹$) بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده وجود داشت، با این حال رابطه‌ی

ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) در برآورد فرسایش پذیری از کارایی خوبی برخوردار نبود و به به مقدار 0.13 t h MJ^{-1} (عرض از مبدأ معادله خط) بیش برآوردی داشت. بر اساس نتایج، رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) در برآورد فرسایش-پذیری دارای بیش برآوردی بوده و به طور میانگین مقدار فرسایش پذیری را ۲ برابر بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. بر این اساس استفاده از معادله ویشمایر و اسمیت که برای خاک‌های آمریکا توسعه یافته است جهت برآورد فرسایش پذیری خاک‌های ایران پیشنهاد نمی‌گردد. نفوذپذیری خاک بیشترین همبستگی معنی‌دار ($r = 0.77$) را با فرسایش پذیری خاک داشت که اثر مهم این پارامتر بر فرسایش پذیری خاک و به دنبال آن هدر رفت خاک را نشان می‌دهد. مدل نمائی واریوگرام با دامنه تأثیر ۳۳۹۹ و ۵۴۳۹ متر به ترتیب برای فرسایش پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده با معادله ویشمایر (۱۹۷۸) بهترین برازش را داشت. تغییرات مکانی فرسایش پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده شبیه به هم بوده و از روند یکسانی تبعیت می‌کند. بدین سان که از قسمت‌های مسطح و مرکزی دشت به سمت قسمت‌های حاشیه‌ای دشت و در ارتفاعات و تپه‌ماهورها مقدار فرسایش پذیری افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه دولتی شهرکرد جهت تأمین منابع مالی این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم. همچنین از آقایان جاسم و جواد استواری که در فراهم آوردن وسیله ایاب و ذهاب و نیز ایجاد کارت‌های استاندارد کمک‌های شایان توجهی داشتند کمال تشکر را داریم.

منابع

- احمدالی خ. نیک‌مهر س. و لیاقت ع. ۱۳۸۸. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد مکانی در برآورد سوری، اسیدپته و درصد آهک خاک. مجله آب‌و خاک، سال بیست و سوم، شماره ۲.
- احمدی ح و سادات فیض‌نیا. ۱۳۸۵. سازندهای دوره کوتاه‌تر (مبانی نظری و کاربردی آن در منابع طبیعی). انتشارات دانشگاه تهران. چاپ دوم با تجدیدنظر و اضافات، ۶۲۰ صفحه.
- آرخی ص. و نیازی ی. ۱۳۸۹. بررسی کاربرد *GIS* و *RS* برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل *RUSLE* (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۷(۲): ۱-۲۸.
- ایوبی ش. و حسینی زاده م. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات مکانی فرسایش پذیری خاک با استفاده از روش زمین‌آمار و *GIS* (مطالعه موردی حوضه آبخیز مهر سوزوار). نشریه دانشکده منابع طبیعی، ۶۰(۲): ۳۶۹-۳۸۲.
- استواری ی. بیگی ح. و داودیان ع ر. ۱۳۹۰. ارزیابی و بررسی تغییرات مکانی و پهنه‌بندی برخی از شاخص‌های کیفی آب برای کاربرد طراحی آبیاری قطره‌ای در دشت لردگان. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۲(۵): ۲۴۲-۲۵۴.
- رفاهی ح. ۱۳۸۵. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، ۶۸۰ صفحه.
- فریدی پ. و رضائی م. ۱۳۹۲. بررسی تغییرات مکانی فاکتور فرسایش پذیری خاک به روش زمین‌آمار (مطالعه موردی حوضه آبخیز گابریک- جنوب خاوری استان هرمزگان. دومین همایش ملی توسعه پایدار کشاورزی و محیط‌زیست سالم. همدان - شرکت هم‌اندیشان محیط‌زیست فردا
- محمدی ج. ۱۳۸۵. پدومتری ۱ (آمار کلاسیک). انتشارات پلک. ۵۳۱ صفحه.
- Alexakis D. Diofantos G. Hadjimitsis A. 2013. Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus. *Atmospheric Research: 1-13*.
- Arnoldus J.M.J. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Food, Agric. Org., Soils Bull.* 34, 39-51.

- Blake G.R. and Hartge K.H. 1986. Bulk density. In *Met*, 2nd edn. Ed. A Klute. pp. 363– 375, American Society of Agronomy, Madison.
- Cambardella C. A. , Moorman T. B., Novak J. M., Parkin T. B., Karlen D. L., Turco R. F., and Koropaka A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1501-1511.
- ESRI Inc. 2008. ArcMap™. Version 9.3. www.esri.com.
- Hengel T. Huvelink G. B. M. and Stein A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* , 120:75-93.
- Hui L. Xiaoling C. Lim C. and Xiaobin C. 2010. Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao watershed, Jiangxi Province, China, using USLE, GIS, and RS. *Journal of Earth Science* 2(6): 941–953.
- Irvem A. Topaloglu F. and Uygur V. 2007. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan River Basin in Turkey. *Journal of Hydrology* ,336, 30– 37.
- Kouli M. Soupios P. and Vallianatos F. 2009. Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environ Geol* 57:483–497.
- Pimental D. 2006. Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability* 8: 119-137.
- Renard K.G. and Ferreira V. A. 1993. RUSLE model description and database sensitivity. *Journal of Environmental Quality* 22: 458-466.
- Santos F.L. Reis J.L. Martins O.C. Castanheira N.L. and Serralheiro R.P. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils. *Biosystems Engineering* 86:355–364.
- Shi J. Wang H. Xu J. Wu J. Liu X. Zhu H and Yu C. 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of changxing, china, *Environ Geol*. 52:1-10.
- StatSoft .2007. STATISTICA(data analysis software system). Version 8. www.statsoft.com.
- US EPA .1991. GeoEas 1.2.1 (Geostatistical environmental assessment software). User's guide, 186 pages.
- Tejada M. and Gonzalez J.L. 2006. The relationships between erodibility and erosion in a soil treated with two organic amendments. *Soil and Tillage Research* 91: 186–198.
-
- Vaezi A. R. Bahrami H.A. Sadeghi S.H. and Mahdian M. H. 2010. Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal of Agriculture Science Technology* 12: 241-252.
- Vaezi A. R. Sadeghi S.H. Bahrami H. A and Mahdian M., 2008. Spatial variations of runoff in a part of calcareous soils of semi-arid region in North West of Iran. *J Agr Sci Nat Resour* 15, 213-225.
- Walky A. and Black I.A. 1934. An examination of Degtareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. 1. *Experimental. Soil Science Society of America Journal* 79: 459-465.
- Wang G. Gertner G. Z. Liu X. and Anderson A. B. 2001. Uncertainty Assessment of Soil Erodibility Factor For Revised Universal Soil Loss Equation, *Catena* . 46: 1-14.
- Wischmeier W.H. Smith D.D .1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA, Agriculture Handbook No. 537, Washington, DC.
- Yu, D.S.; Shi, X. Z.; Weindorf, D.C. 2006. Relationship between permeability and erodibility of cultivated Acrisols and Cambisols in subtropical China. *Pedosphere* 16: 304–311.
-