بررسی تغییرپذیری مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از برخی روش‌های زمین‌آماری(مطالعه موردی: حوزه آبخیز نومه رود)

محمدرضا جوادی*[۱]، غلامرضا زهتابیان[۲]، حسن احمدی[۲]، شمس الله ایوبی[۳]، محمد جعفری[۲]

۱-گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲-گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳-گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۷/۲۳ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

چکیده

تغییرات مکانی در خصوصیات خاک به دلیل تغییر در فاکتورهای زمین‌شناسی و خاک‌شناسی دخیل در تشکیل خاک جزء ذاتی آن به شمار می‌رود. هدف از این مطالعه بررسی تغییرپذیری مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک در حوزه آبخیز نومه رود واقع در شهر نور استان مازندران می‌باشد. بدین منظور ابتدا منطقه مورد نظر به شبکه‌های یک کیلومتر مربعی (۱۰۰۰متر*۱۰۰۰متر) تقسیم‌بندی شد و در هر شبکه از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری به تعداد ۲ الی ۳ نمونه خاک و جمعا ۱۳۵ نمونه خاک از کل منطقه اخذ گردید. سپس پارامتر ساختمان خاک، درصد مواد آلی، نفوذپذیری، درصد شن درشت، درصد شن خیلی‌ریز + سیلت اندازه‌گیری شدند و فاکتور فرسایش‌پذیری خاک تعیین گردید. پس از بررسی و آزمون نرمال بودن داده‌ها، تغییرپذیری مکانی فرسایش-پذیری خاک با استفاده از تغییرنما و نسبت اثر واریانس اثر قطعه‌ای به واریانس کل مورد بررسی قرار گرفت. سپس مناسب‌ترین مدل تئوری به داده‌های تجربی برازش داده شد. جهت انتخاب مدل درون‌یابی مناسب از تخمینگرهای کریجینگ و روش‌های معین (IDW و RBF) در محیط نرم افزاری GS^+ استفاده به عمل آمد. انتخاب بهترین روش و مدل براساس کم‌ترین خطای MAE و RMSE صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که از بین روش‌های مورد بررسی، روش کریجینگ (RMSE=0/۰۳۲۰) به عنوان مناسبترین روش درون‌یابی و الگوی گوسی نیز به عنوان بهترین مدل برازش داده شده برای داده‌های فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در منطقه شناخته شده است. دامنه وابستگی مکانی برای این متغیر نیز براساس بهترین روش حدود ۳۵۰۰ متر به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: حوزه آبخیز نومه رود، خصوصیات فیزیکی خاک، روش‌های درون یابی، عامل فرسایش‌پذیری.

*- نویسنده مسئول: Email: m_javadi@iaunour.ac.ir

مقدمه

شرایط مورد نیاز موجودات زنده در طبیعت به وسیله ماده‌ای تأمین و کنترل می‌شود که به آن خاک می‌گویند (علیزاده، ۱۳۶۸). تغییرات مکانی خصوصیات خاک از مولفه‌های ذاتی دخیل در آن به شمار می‌روند که با توجه به تغییرات در ویژگی-های زمین‌شناسی، خاک‌شناسی و اقلیم هر ناحیه منجر به تشکیل خاک‌های مختلفی می‌گردند (جعفریان و شعبانزاده، ۱۳۹۶). با توجه به اثرات متقابل فاکتورهای موثر در تشکیل خاک، تغییر در خصوصیات خاک از یک مکان به مکان دیگر و حتی برای یک نوع خاک نیز امری بدیهی خواهد بود (جوادی و فرنوش، ۱۳۹۹). توجه به ارزش اقتصادی خاک و اهمیت آن در حیات انسان، روشن می‌سازد که سرمنشأ تولید تمامی مایحتاج اولیه بشر و تأمین کننده نیازهای کلیه موجودات زنده، خاک است که زندگی انسان وابسته به آنان است (حق نیا و کوچکی، ۱۳۷۶). به‌طور کلی، عمده فرسایش خاک و رسوبات، در بالادست حوضه به‌وقوع می‌پیوندد که در نتیجه عملیاتی نظیر تغییر کاربری اراضی و یا استفاده‌های نامناسب در اراضی کشاورزی، بهره-وری‌های بی‌رویه از جنگل‌ها و مراتع (جنگل‌تراشی و چرای بی‌رویه دام)، جاده‌سازی صورت می‌پذیرد (ضیایی، ۱۳۸۹) به منظور تغییرپذیری خاک، دو رویکرد مهم آماری که از نظر شیوه آنالیز داده‌ها با یکدیگر متفاوتند، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (اولیور، ۲۰۰۷). آمار کلاسیک که نیاز به برآورده شدن فرضیات پایه‌ای همچون استقلال بین مشاهدات و در نتیجه تصادفی بودن تغییرات از یک نقطه به نقطه دیگر دارد و در مقابل، رویکرد زمین-آماری، که بر پایه متغیرهای ناحیه‌ای استوار است و قادر به تفسیر نتایج بر مبنای ساختار طبیعی تغییرات و در نظر گرفتن همبستگی مکانی آنها می‌باشد (حسنی پاک، ۱۳۹۲). زمین‌آمار هم دارای ابزار تفسیر(واریوگرام) و هم ابزار تخمین(به عنوان مثال کریجینگ) برای مطالعه تغییرپذیری مکانی خاک است (سامرا، ۲۰۰۹) و آنالیز همبستگی براساس ساختار سمی‌واریوگرام که بیانگر وجود همبستگی مکانی است به شکل گسترده‌ای برای ارزیابی تغییرات مکانی در مطالعات خاک مورد استفاده قرار گرفته است (نخعی، ۱۳۸۹). ایران از جمله کشورهایی است که از نظر فرسایش خاک دارای مشکلات عدیده‌ای می‌باشد به‌طوری که هر ساله میلیون‌ها تن از خاک غنی و حاصلخیز به علت مدیریت غلط و غیراصولی از محل اصلی خود تحت فرسایش قرار گرفته و از دسترس خارج می‌شود. ادامه این روند در طی سنوات اخیر منجر به ایجاد مشکلات حاد زیست محیطی شده است که می-بایستی راه کارهای اصولی و منطقی برای عدم تشدید و ادامه این روند اتخاذ نمود (باقکار، ۱۳۸۹۶). از عواقب فرسایش شدید در عرصه‌های طبیعی هدر رفت قابل‌ملاحظه خاک و نابودی بخش اعظمی از عرصه‌های منابع طبیعی می‌باشد که متعاقب آن خسارات جبران ناپذیری را به بخش‌های اقتصادی و اجتماعی وارد خواهد نمود (جوادی و فرنوش، ۱۳۹۹). طبق تعریف، فرسایش پذیری خاک، مقاومت خاک در برابر جدا شدن و انتقال ذرات است (رفاهی، ۱۳۹۴). محققین متعددی در رابطه با فرسایش‌پذیری خاک، تعاریف متفاوتی را ارائه نموده‌اند که تعاریف زیر از آن جمله اند:

بویکوس که فرسایش پذیری خاک را با نسبت مجموع درصد شن و درصد سیلت به درصد رس متناسب دانسته و بیان نموده است که در خاک-هایی که این مقدار کوچکتر است، فرسایش کمتر می‌باشد. البته این رابطه بیشتر در مورد خاک‌های حاوی کانی‌های مقاوم به فرسایش(کائولونیت) بوده است. بریان، شاخص فرسایش‌پذیری را در مقدار خاکدانه‌هایی دانسته است که قطر آنها بیش از ۰/۵

میلی‌متر می‌باشد و هر چه این مقدار بیشتر باشد، خاک مقاومت بیشتری نسبت به فرسایش نشان می‌دهد. ویشیمایر و همکاران، فرسایش‌پذیری خاک را در ارتباط با درصد سیلت+ شن خیلی‌ریز، درصد شن، مواد آلی، ساختمان و قابلیت نفوذ خاک دانسته‌اند (کریم‌پور ریحان، ۱۳۸۸). روش‌های زمین‌آماری به دلیل اینکه بهترین برآورد خطی را برای تعیین مقادیر مجهول در مناطق نمونه برداری نشده به دست می‌دهند در مطالعات مربوط به علوم زمین از جمله خاک‌شناسی به وفور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های درون‌یابی با استفاده از تئوری آماری همبستگی مکانی برای پیش‌بینی متغیرهای مورد بررسی در مکان‌هایی به‌کار گرفته می‌شود که نمونه برداری از آنجا صورت نگرفته و ارزیابی و برآورد آن غیردقیق می‌باشد (محمدی، ۱۳۸۵). در طی سالیان اخیر بررسی تغییرات مکانی خصوصیات مختلف خاک با استفاده از روش‌های درون‌یابی توسط محققان مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. که از آن جمله می‌توان به موراد زیر اشاره نمود:

مقایسه کارایی چند روش زمین‌آماری برای تخمین برخی ویژگی‌های فیزیکی در حوزه آبخیز دره ویسه توسط محمودی و همکاران (۱۳۹۱) صورت پذیرفت. بدین منظور، منطقه به شبکه‌های منظم یک کیلومترمربعی تقسیم شد و در مجموع ۷۸ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری از منطقه اخذ گردید. به منظور درون‌یابی از روش کریجینگ معمولی، عکس فاصله وزن‌دار و روش توابع شعاعی استفاده به عمل آمد. همچنین برای ارزیابی روش-های درون‌یابی از پارامترهای میانگین مطلق خطا(MAE) و میانگین اریب خطا(MBE) استفاده شد نتایج این مطالعه نشان داد که برای متغیرهای سیلت، شن و وزن مخصوص ظاهری؛ روش کریجینگ و برای متغیر رس، روش توابع شعاعی از دقت بیشتری برخوردار بوده است. در برخی از مطالعات که از روش‌های زمین‌آماری به بررسی تغییرپذیری مکانی متغیر فرسایش‌پذیری خاک پرداخته شده گزارش شده است که استراتژی نمونه‌برداری به منظور بهبود دقت پیش‌بینی عامل فرسایش‌پذیری خاک موثر می‌باشد (باتوفوکو و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین بررسی تغییرپذیری مکانی خاکدانه‌ها و عوامل موثر در خاکدانه‌ای شدن خاک با استفاده از روش کریجینگ در بخشی از حوزه آبخیز طالقان مورد بررسی قرار گرفته است که در بخش کلاسیک نتایج حاکی از موثر بودن برخی از خصوصیات فیزیکو- شیمیایی بر پایداری خاکدانه بوده و در بخش آمار مکانی نیز نتایج حاکی از وجود ساختار مکانی ضعیف تا متوسط اکثر عوامل موثر در خاکدانه‌ای شدن خاک داشته است (آرمین و همکاران، ۱۳۹۳). از جمله قابلیت‌های تکنیک زمین‌آمار در پهنه‌بندی خصوصیات خاک من جمله عامل فرسایش‌پذیری در نقاط مختلف می‌باشد و مطالعاتی که در این ارتباط صورت گرفته با توجه به خصوصیات مناطق مختلف نتایج مختلفی را گزارش داده‌اند به عنوان مثال پژوهش و داودیان دهکردی (۱۳۹۳) در پهنه‌بندی عامل فرسایش-پذیری خاک با استفاده از تکنیک زمین‌آمار گزارش نمودند که الگوی کروی برای عامل فرسایش‌پذیری خاک و درصد سیلت به عنوان بهترین مدل برازش برای این متغیرها می‌باشد. همچنین دامنه مکانی این متغیرها بین ۲ تا ۲/۳ کیلومتر برآورد شد در نهایت این گزارش بیان گردید که الگوی تغییرپذیری مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک به مواد مادری و نوع خاک وابسته می‌باشد. در تحقیق دیگری رضا و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی توزیع مکانی بافت خاک پرداختند، گزارش آنها حاکی از مناسب بودن مدل نمایی جهت برازش بر داده‌ها و ضعیف بودن الگوی مکانی شن، سیلت متوسط و

رس بوده است که زیاد بودن وسعت منطقه مورد مطالعه در این نتیجه تاثیر داشته است. همچنین در مطالعه‌ای دیگر بررسی پراکنش مکانی برخی خصوصیات خاک در مراتع اشتهارد با استفاده از برخی روش‌های درون‌یابی توسط ناصری و همکاران (۱۳۹۵) صورت پذیرفت که با مد نظر قرار دادن پارامترهای MAE و MBE مشخص شد که روش کریجینگ نسبت به روش IDW از دقت بالاتری در منطقه برخوردار بوده است. در بسیاری از مطالعات دیگر تغییرپذیری مکانی سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گفته است که در هر یک با توجه به شرایط موجود نتایجی متفاوت به دست آمده است. در این رابطه روزمری و همکاران (۲۰۱۷) از روش‌های زمین‌آماری به منظور بررسی تغییرپذیری مکانی برخی از خصوصیات خاک (شامل شوری- اسدیته- ظرفیت تبادلی کاتیونی و بافت خاک) در کاربری‌های مختلف در خاک‌های آلفی سول در سریلانکا استفاده کردند و گزارش نمودند که دامنه وابستگی مکانی خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه با هم تفاوت دارد به‌طوری که شوری و اسیدیته دارای وابستگی مکانی قوی و سایر متغیرهای مورد بررسی وابستگی مکانی ضعیفی داشته‌اند. در مطالعه دیگر توزیع مکانی برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در مسیر زابل زاهدان توسط بهنام و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از روش‌های زمین-آماری مورد بررسی قرار گرفت در این تحقیق، تعداد ۲۵۲ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۲۰ سانتیمتری در کل محدوده مورد مطالعه اخذ گردید و سپس ویژگی‌های مورد نظر با روش‌های مکان‌یابی کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، کریجینگ گسسته، کوکریجینگ، عکس فاصله وزن‌دار تخمین زده شدند. نتایج نشان داد که بهترین مدل برای کربن آلی، مدل گوسی و برای سایر پارامترها مدل نمایی بوده است. همچنین روش کوکریجینگ برای متغیرهای رس، کربنات کلسیم و کربن آلی، روش عکس فاصله وزن‌دار برای متغیر سیلت و شوری خاک و روش کریجینگ معمولی برای متغیر شن مناسب‌ترین روش‌ها بوده‌اند. بررسی کارایی روش-های زمین‌آماری در پهنه‌بندی برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک در اراضی واقع در شرق کارون توسط غلامی و همکاران (۱۳۹۹) صورت پذیرفت. تعداد ۶۲ نمونه خاک بدین منظور از منطقه برداشت شد و از روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ برای تهیه نقشه درون‌یابی استفاده به عمل آمد. انتخاب بهترین مدل براساس کمترین مقدار MAE و RMSE صورت پذیرفت. در نهایت آنها گزارش کردند که برای متغیرهای شن، سیلت، رس، کربنات کلسیم، ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت جذب سدیم مدل گوسی، ماده آلی مدل نمایی، فسفر قابل جذب و نیتروژن مدل کروی و تخمینگر کریجینگ و برای سایر متغیرها تخمینگر کوکریجینگ بهترین روش بوده است. از روش‌های درون یابی می‌توان برای بررسی تغییرپذیری خصوصیات سطحی و زیر سطحی متغیرهای مختلف خاک نیز استفاده به عمل آورد از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه طاعتی و همکاران (۱۳۹۹) اشاره نمود که در آن پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های سطحی و عمقی پروفیل خاک با استفاده از تکنیک زمین‌آمار در بخشی از اراضی قزوین مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا منطقه مورد مطالعه با فواصل ۱۳۰۰ در ۱۳۰۰ متر شبکه‌بندی شد و ۶۱ نمونه خاک از دوعمق ۰ تا ۳۰ و۳۰ تا ۷۰ سانتیمتری اخذ گردید. از تخمینگر کریجینگ برای تهیه نقشه درون‌یابی استفاده شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بهترین مدل برای متغیر اسیدیته و سیلت در دو عمق مدل نمایی و برای هدایت الکتریکی عصاره اشباع رس و سیلت مدل گوسی

می‌باشد. همچنین وابستگی مکانی برای متغیرهای مورد بررسی متوسط تا قوی بوده است. بررسی‌های انجام شده در ارتباط با نقش کاربری‌های مختلف بر روی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک دلالت بر آن دارد که مقادیر فرسایش‌پذیری خاک در کاربری‌های مختلف می‌تواند اختلاف معنی‌داری از خود نشان دهد که این امر ناشی از خصوصیات مختلف خاک و نحوه مدیریت در انواع کاربری‌ها خواهد بود. بدین منظور، تحقیق مورد نظر با هدف بررسی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در کاربری‌های مختلف موجود در حوزه آبخیز نومه رود و تهیه نقشه پهنه-بندی آن با استفاده از مناسب‌ترین روش درون‌یابی به انجام رسیده است.

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز نومه رود از جمله حوزه‌های آبخیز در دامنه شمالی رشته کوه‌های البرز و در فاصله حدودا ۴۰ کیلومتری شهر نور واقع است. این حوزه آبخیز از شمال به شهر نور و دریای خزر از شرق به حوزه آبخیز وازرود از غرب به حوزه آبخیز نور رود و از طرف جنوب به حوزه آبخیز هراز محدود می‌شود. مساحت این حوزه آبخیز در حدود ۵۰ کیلومتر مربع است. حداقل ارتفاع ۶۵۰ متر در خروجی و حداکثر آن ۳۴۰۵ متر در قلعه زاغن کوه می‌باشد. اقلیم کل منطقه براساس دمارتن اصلاح شده مرطوب سرد است که در ارتفاعات به مرطوب فرا سرد یا ارتفاعی تغییر می‌یابد. متوسط بارندگی سالانه در آن ۶۱۳ میلیمتر است. منطقه مورد مطالعه بین عرض‌های شمالی تقریبی ۴۰۱۴۰۰۰ تا ۴۰۲۷۱۰۰ و طول های شرقی تقریبی ۵۹۰۳۰۰ تا ۵۹۷۰۰۰ (در سیستم utm) واقع شده است. این منطقه از نظر سنگ‌شناسی دارای سازند نسن، شمشک و الیکا است که مساحت تحت‌تاثیر آنها به ترتیب حدود ۱، ۶۵ و ۳۴ درصد از کل منطقه می‌باشد. وسعت اراضی با کاربری‌های مختلف در منطقه به شرح زیر است:

الف) جنگل انبوه (۷۰ تا ۱۰۰ درصد تاج پوشش) با مساحتی در حدود ۳۱۲۹/۴۸ هکتار

ب) جنگل نیمه‌انبوه (۴۰ تا ۶۹ درصد تاج پوشش) با مساحتی در حدود ۶۲۳ هکتار

ج) جنگل تنک (۱۰ تا ۳۹ درصد تاج پوشش) با مساحتی درحدود ۵۱/۳ هکتار

د) مرتع با مساحتی در حدود ۹۱۷/۸ هکتار

ر) اراضی کشاورزی رها شده حاشیه روستا با مساحتی در حدود ۱۹۸/۱۶هکتار

ل) مناطق مسکونی با مساحتی در حدود ۱۶/۹ هکتار

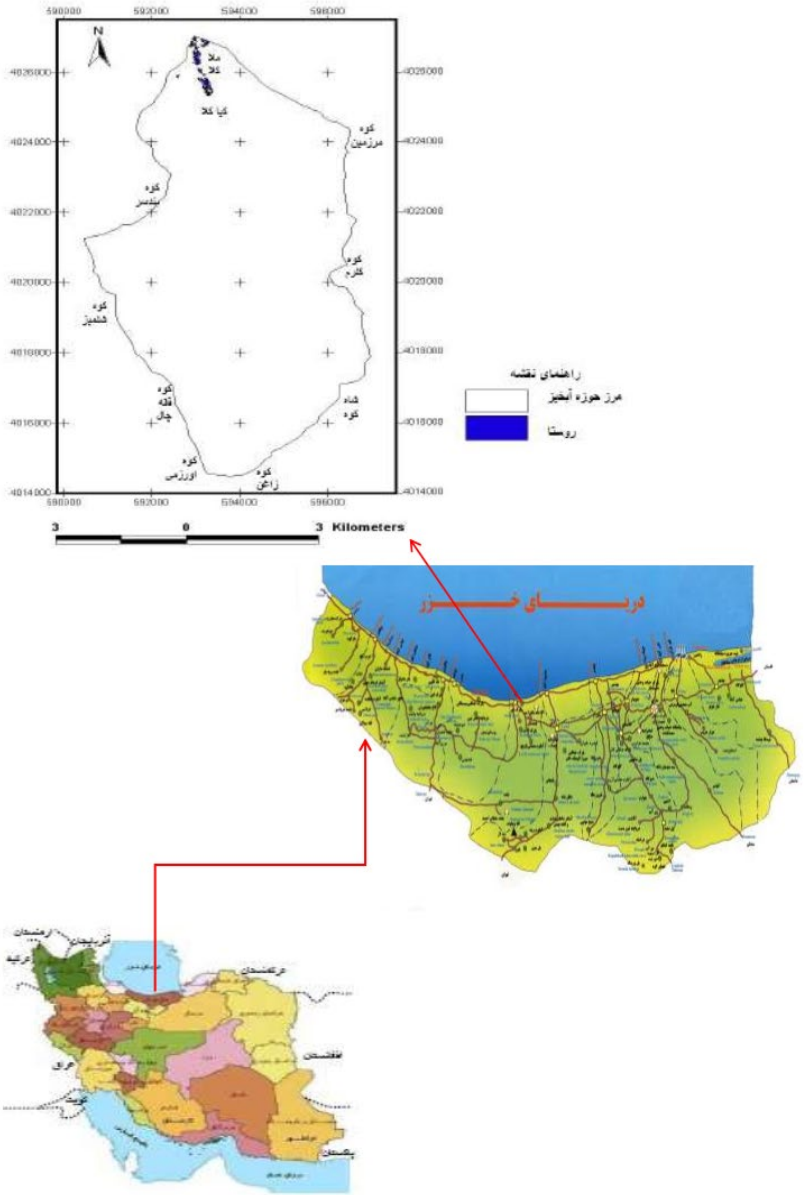
در منطقه مورد مطالعه عمده خاک‌های موجود عبارتند از رگوسل- لیتوسل-کمبی سل- چرنوزم و کاستانوزم که هر یک در انواع خاصی از کاربری‌ها براساس شرایط موجود، قابل مشاهده می‌باشند. سیمای عمومی آن در شکل ۱ آورده شده است.

مواد و روش‌ها

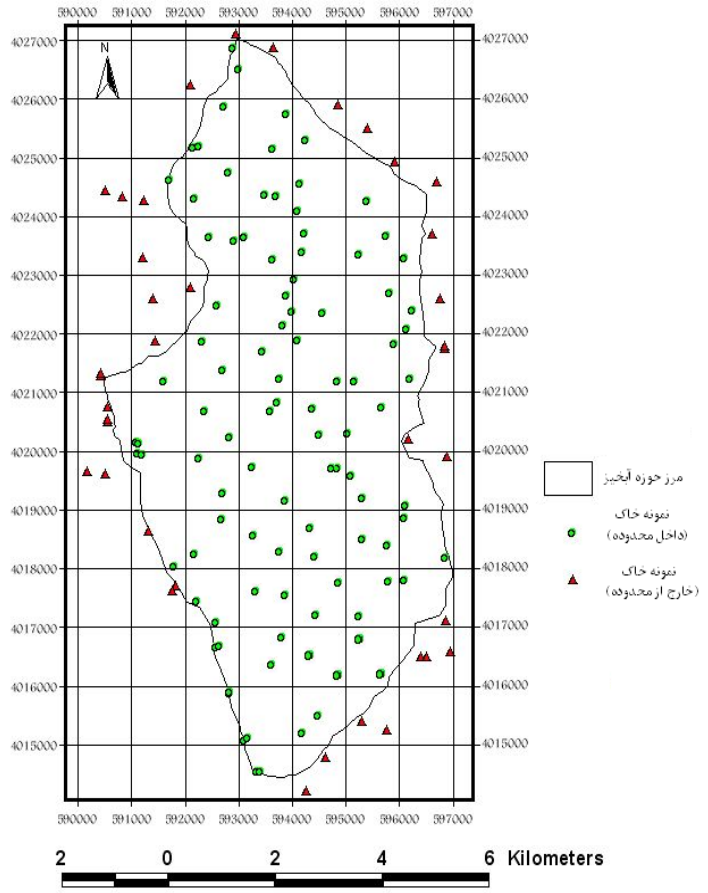
روش نمونه‌برداری و آنالیز آزمایشگاهی نمونه‌های خاک

در ابتدا موقعیت جغرافیایی منطقه، محدوده و مساحت آن تعیین شد. سپس با مدنظر قرار دادن شرایط کلی منطقه، طرح و الگوی نمونه‌برداری تعیین گردید که الگوی نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده تصادفی مدنظر قرار گرفت. بدین منظور کل منطقه به شبکه‌های یک کیلومترمربعی (۱۰۰۰ متر*۱۰۰۰متر) تقسیم گردید و در داخل هر شبکه، بنا به شرایط دسترسی به بخش‌های مختلف منطقه و همگنی در سایر خصوصیات (توپوگرافی- سنگ‌شناسی- کاربری اراضی و خاک‌شناسی) دو الی سه نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری به‌طور تصادفی اخذ گردید. همچنین با استفاده از

دستگاه موقعیت یاب جهانی[1] مختصات نقاط نمونه-گیری تعیین شد. ساختمان خاک به‌طور مستقیم در صحرا به کمک اطلاعات موجود در دفترچه رنگ خاک و مقایسه آن با خاک برداشت شده تعیین گردید. پس از جمع‌آوری نمونه‌های خاک از منطقه، اقدام به حمل و انتقال آنها به آزمایشگاه خاک شناسی گردید و در آنجا نمونه‌ها در هوای آزاد خشک و خرد شد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس پارامترهای، درصد شن درشت(به روش الک)، سیلت + خیلی شن ریز(به روش الک)، ماده آلی(به روش والکی بلاک)، ساختمان خاک(در صحرا) و نفوذپذیری خاک(با استفاده از رابطه بافت خاک و گروه هیدرولوژیکی) تعیین و نهایتا مقدار فاکتور فرسایش‌پذیری خاک برای هر محل نمونه-برداری به دست آمد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و مازندران



شکل ۲: نقاط و الگوی نمونه‌برداری خاک در منطقه مورد مطالعه

در مطالعات آمار مکانی(زمین‌آمار) سه مرحله به منظور پهنه‌بندی برای هر متغیر مورد بررسی به انجام می‌رسد که عبارتند از:

مرحله اول که در طی آن، مطالعات آماری و نمونه برداری و اخذ داده‌ها بدون مدنظر قرار دادن توزیع جغرافیایی آنها صورت می‌گیرد. بررسی داده‌ها، حذف و کنار گذاشتن داده‌های پرت و تعیین خصوصیات آماری داده‌ها نیز در این مرحله انجام می‌شود (جوادی و فرنوش، ۱۳۹۹). مرحله دوم مرتبط به بررسی ساختار مکانی داده‌ها است که در طی آن توزیع مکانی داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی مکانی و جغرافیایی داده‌ها از طریق نیم تغییرنما انجام می‌شود. نیم تغییرنما بیان کننده سیر کاهش وابستگی مکانی بین دو نقطه از فضا در زمانی است که فاصله بین این دو نقطه در حال زیاد شدن می‌باشد (نخعی، ۱۳۸۹). اجزای تغییرنما شامل اثر قطعه‌ای(عرض از مبدا منحنی)، دامنه تاثیر(فاصله مکانی یا زمانی بین نمونه‌ها که پس از آن متغیر ناحیه‌ای در نقاط همسایگی هم، تاثیر چندانی بر روی یکدیگر نخواهند داشت و مقداری تقریبا ثابت است که دارای تغییرات تصادفی می‌باشد) و حد آستانه(معادل با واریانس کلی متغیر مورد بررسی است) می‌باشد (محمدی، ۱۳۸۵). مرحله سوم، بررسی پیش‌بینی درون‌یابی با استفاده از روش‌های موجود است. در این زمینه روش‌های متعددی وجود دارند که انواع کریجینگ، معکوس فاصله وزن‌دار و توابع شعاعی از آن جمله می‌باشند (ایوبی و حسینعلیزاده، ۱۳۸۶). برای انتخاب مناسب‌ترین روش از شاخص‌های متعددی نظیر میانگین مطلق خطا (MAE)، میانگین اریب خطا

(MBE) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) جهت ارزیابی متقاطع استفاده می‌شود (داوودیان دهکردی و همکاران، ۱۳۹۳).

ساختار روش‌های درون‌یابی مورد استفاده در تحقیق

در این تحقیق از روش‌های کریجینگ[۲] (معمولی) و روش‌های معین(عکس فاصله وزن‌دار و توابع شعاعی) برای پهنه‌بندی متغیر فرسایش‌پذیری خاک در منطقه مورد نظر استفاده به عمل آمد.

الف) ساختار روش کریجینگ معمولی

این تخمینگر از جمله روش‌های زمین‌آماری است که براساس میانگین متحرک وزنی استوار است. این روش بهترین برآورد کننده ناااریب خطی است که شرط ناااریب بودن در سایر روش‌های تخمین را نیز مدنظر قرار می‌دهد اما خصوصیتی که این روش دارد آن است که در عین حال نا اریب بودن، واریانس تخمین نیز در آن کمترین مقدار است. از اینرو انجام کریجینگ برای برآورد هر متغیر با بیان مقدار خطای تخمین نیز همراه خواهد بود. بنابراین با کمک این ویژگی می‌توان بخش‌هایی که واجد خطای زیادی هستند مشخص کرده و برای کاهش خطای آنها داده‌های به مراتب بیشتری را مورد بررسی قرار داد.

رابطه این تخمینگر به شرح زیر است:

رابطه ۱)

$$z^* = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i . Z_{(x_i)}$$

که در آن؛

z^*: مقدار متغیر مکانی برآورد شده

$Z_{(x_i)}$: مقدار متغیر مشاهداتی در نقطه x_i

λ_i : وزن آماری نسبت داده شده به نمونه مربوط به نقطه x_i

در این جا توجه به این نکته ضروریست که در صورتی که متغیر مورد نظر دارای توزیع نرمال نباشد می‌بایستی از روش کریجینگ خطی استفاده نمود مگر آنکه با استفاده از روش‌های تبدیل داده، توزیع داده‌های متغیر مورد بررسی را به توزیع نرمال تبدیل نمود.

ب) روش عکس فاصله وزن‌دار

این روش، روشی ساده به منظور برآورد متغیر مورد بررسی در نقاط فاقد داده و نهایتا میانیابی متغیر مورد نظر در یک پهنه و سطح مورد بررسی می‌باشد. در این روش، تخمین متغیر در نقطه‌ی فاقد داده از طریق استفاده از داده‌های معلوم موجود در اطراف متغیر مورد نظر و با توجه به وزن‌های مختلفی که متناسب با عکس فاصله آنها تا محل نقطه مجهول است صورت می‌گیرد. رابطه مورد استفاده این تخمینگر به شرح زیر می‌باشد:

رابطه ۲)

$$\lambda_i = \frac{{D_i}^{-a}}{\sum_{i=1}^{n} {D_i}^{-a}}$$

که در آن؛

λ_i: وزن اختصاص داده شده به نقطه i ام

D_i: فاصله نقطه مشاهده شده i ام تا نقطه تخمین زده شده

a: توان وزن-دهی فاصله

n: تعداد نقاط همسایگی

ج) روش توابع شعاعی

تابعی به صورت $\Phi_j(x) = \Phi(\|X - x_j\|)$ می‌باشد که وابسته به فاصله بین $x \varepsilon R^d$ و نقطه ثابت $x_j \varepsilon R^d$ است. در این تابع Φ پیوسته و وابسته به هر زیر مجموعه $\Omega \varepsilon R^d$ می باشد. γ نشان دهنده فاصله اقلیدوسی بین هر جفت نقطه در مجموعه Ω است. در این تحقیق از توابع شعاعی با تابع کرنلRBF[۳] استفاده به عمل آمده است.

معیارهای اعتبارسنجی

برای تخمین مقادیر فرسایش‌پذیری خاک در کل منطقه از نرم افزار $ArcGIS_{ver9.1}$ استفاده شد. در پایان نیز با مدنظر قرار دادن مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده، دقت روش‌های مورد نظر با توجه به شاخص‌های میانگین خطای مطلق (MAE)

میانگین خطای انحراف (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش-پذیری خاک در منطقه از نرم افزار $ArcGIS_{ver9.1}$ استفاده گردید.

رابطه ۳)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|P_i|-|O_i|}{n}$$

رابطه ۴)

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}[P_i-O_i]}{n}$$

رابطه ۵)

$$RMSE = \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}$$

که در آن؛

P_i : مقدار برآورده شده

O_i: مقداراندازه‌گیری شده

n : تعداد نمونه(داده‌ها)

بحث و نتایج

وسعت کاربری اراضی در منطقه از بیشترین به کمترین به ترتیب مربوط به اراضی جنگلی، اراضی مرتعی، کشاورزی رها شده حاشیه روستا و نهایتا اراضی مسکونی می‌باشد. با توجه به وجود انواع اراضی در منطقه شاهد دامنه وسیعی در بین حداقل و حداکثر مقادیر پارامترهای مورد بررسی و دخیل در فاکتور فرسایش‌پذیری خاک می‌باشیم. ساختمان خاک در منطقه عمدتا دانه‌ای اسفنجی بوده است. از نظر نفوذپذیری خاک، غالبا نفوذپذیری در رده متوسط تا کم بوده است (سرعت نفوذپذیری بین ۱/۰۱۵ تا ۸/۰۸۴) مقدار ماده آلی بین ۰/۳ تا ۵/۴، سیلت در منطقه ۴ تا ۶۲ درصد، رس ۲ تا ۵۱ درصد، شن ۱۴ تا ۷۲ درصد و مقادیر فاکتور فرسایش‌پذیری بین ۰/۰۵ تا ۰/۶ بوده است. ضریب تغییرات (CV) معیاری از تغییرپذیری نسبی است. چنانچه این ضریب کوچکتر و یا مساوی ۲۰ درصد باشد به معنی تغییرپذیری اندک، اگر مساوی یا بزرگتر از ۲۱ درصد و کمتر از ۵۰ درصد باشد نشانگر تغییرپذیری متوسط، چنانچه مساوی و یا بزرگتر از ۵۱ درصد و کوچکتر از ۱۰۰ درصد باشد تغییرپذیری زیاد و اگر مساوی و یا بیشتر از ۱۰۰ درصد باشد تغییرپذیری بسیار زیاد متغیر مورد نظر را در منطقه نشان می‌دهد (نخعی، ۱۳۸۹). نتایج مختصر از خصوصیات مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: خلاصه آماری مربوط به پارامترهای اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه

متغیر	تعداد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)	چولگی
شن درشت	۱۳۵	۱۴	۷۲	۴۷/۸۳	۱۰/۷	۲۲/۳	-۰/۰۷
شن بسیار ریز + سیلت	۱۳۵	۷	۶۵	۳۶/۶۲	۸/۵۸	۲۳/۴۲	۰/۱۸
ماده آلی	۱۳۵	۰/۳	۵/۴	۱/۴۸	۰/۹	۶۰/۸۱	۱/۹۵
فاکتور فرسایش‌پذیری	۱۳۵	۰/۰۵	۰/۶	۰/۱۳	۰/۰۶	۴۶/۱۵	۵/۵

وجود تفاوت در مقادیر حداقل و حداکثر پارامترهای مورد نظر در جدول حکایت از تغییرات در مقادیر این پارامترها در سطح منطقه مورد مطالعه دارد که با توجه به انواع کاربری‌های مختلف اراضی که در سطح منطقه مورد مطالعه وجود دارد، این امر بدیهی می‌باشد. با توجه به آزمون کولموگراف - اسمیرنوف داده‌های مربوط به فاکتور فرسایش-پذیری خاک در منطقه دارای توزیع نرمالی نبودند از اینرو با استفاده روش‌های تبدیل، داده‌ها دارای توزیع نرمال گردیدند (جدول ۲). با توجه به این امر تمامی پردازش‌های درون‌یابی با استفاده از داده‌های تبدیلی صورت پذیرفت.

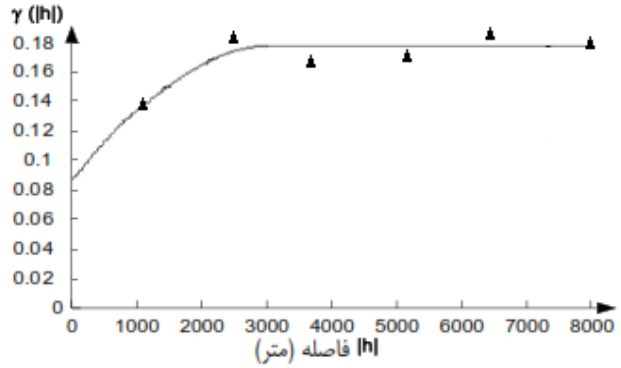
جدول ۲: خلاصه آماری مربوط به داده‌های خام و تبدیلی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک برای استفاده در روش‌های دورن‌یابی

متغیر	تعداد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	چولگی
فاکتور فرسایش‌پذیری خاک(داده‌های بدون تبدیل)	۱۳۵	۰/۰۵	۰/۶	۰/۱۳	۰/۰۶	۵/۵
فاکتور فرسایش‌پذیری خاک(تبدیل به روش لوگ نرمال)	۱۳۵	-۳/۲۲	-۰/۴۹	-۲/۰۷	۰/۲۹۶	۰/۹۱

پس از تحلیل آماری داده‌ها تغییرنمای(واریوگرام) تجربی برای متغیر مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار $ArcGIS_{ver9.1}$ تهیه گردید. واریوگرام مناسب به داده‌های فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در هر یک از مدل‌های دایره-ای- کروی- نمایی و گوسی برازش داده شد و از بین مدل‌های برازش داده شده، مدل گوسی (شکل ۳) انتخاب گردید. بررسی تغییرنما، حاکی از عدم وجود ناهمسانگردی در جهت خاصی بوده است. تغییر نمای متغیر مورد مطالعه در شکل ۳ و پارامترهای آن در جدول ۳ آورده شده است. دامنه وابستگی مکانی برای فاکتور فرسایش‌پذیری خاک نیز در این جدول آورده شده است. طبق تعریف، وابستگی مکانی یک متغیر، بیان کننده تاثیرات همسایگی موقعیت جغرافیایی و مکانی نقاط مختلف بر مقادیر خصوصیت مورد بررسی در منطقه می‌باشد و در ارتباط با خصوصیات خاک چگونگی پراکنش جغرافیایی مواد مادری و واحدهای فیزیوگرافی و سایر عوامل موثر بر این خصوصیات را بیان می‌کند. درجه و شدت وابستگی مکانی یک متغیر ناحیه‌ای از تقسیم اثر قطعه‌ای بر مقدار واریانس کل(حد آستانه) به دست می‌آید. به‌طوری که چنانچه این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد نشانگر کلاس وابستگی مکانی قوی، اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد بیانگر کلاس وابستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بیشتر از ۷۵ درصد باشد کلاس وابستگی مکانی ضعیف را نشان خواهد داد. با توجه به جدول ۳، درصد وابستگی مکانی متغیر فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در منطقه برابر با ۶۰/۷ درصد می‌باشد که در کلاس وابستگی مکانی متوسط قرار دارد.

جدول ۳: پارامتر تغییرنمای فاکتورفرسایش‌پذیری خاک در منطقه مورد مطالعه

متغیر مورد بررسی	مدل	دامنه(متر)	اثر قطعه‌ای	حد آستانه	درصد وابستگی مکانی	کلاس وابستگی مکانی
فاکتورفرسایش‌پذیری	گوسی	۳۵۷۲	۰/۰۸۵	۰/۱۴	۶۰/۷	متوسط



شکل ۳: تغییرنمای فاکتورفرسایش‌پذیری خاک در منطقه مورد مطالعه

بررسی اعتبارسنجی روش‌های مورد بررسی و پهنه-بندی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در منطقه
همانطور که بیان شد به منظور تخمین مقادیر متغیر فرسایش‌پذیری خاک از نرم افزار $ArcGIS_{ver9.1}$ استفاده شد. در نهایت با توجه به مقادیر مشاهده شده و مقادیر برآورد شده، دقت روش‌های مورد بررسی در این تحقیق (عکس فاصله وزن‌دار، توابع شعاعی و کریجینگ معمولی) با مدنظر قرار دادن شاخص میانگین مطلق خطا (MAE) و میانگین اریب خطا (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه گردید (جدول ۴). همچنین جهت رسم نقشه پراکنش مکانی فرسایش‌پذیری خاک در منطقه مورد مطالعه با استفاده از بهترین روش منتخب از نرم افزار $ArcGIS_{ver9.1}$ استفاده گردید.

جدول ۴: اعتبارسنجی روش‌های درون یابی در برآورد فرسایش‌پذیری خاک در منطقه مورد مطالعه

متغیر مورد بررسی	روش‌های درون‌یابی	MAE	MBE	RMSE
فاکتور فرسایش‌پذیری خاک	عکس فاصله وزن‌دار(Idw)	۰/۰۸۹۵	۰/۰۰۰۹	۰/۵۴۸
	توابع شعاعی(RBF)	۰/۰۲۸۱	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴۷۵
	کریجینگ معمولی(OK)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۳۲۰

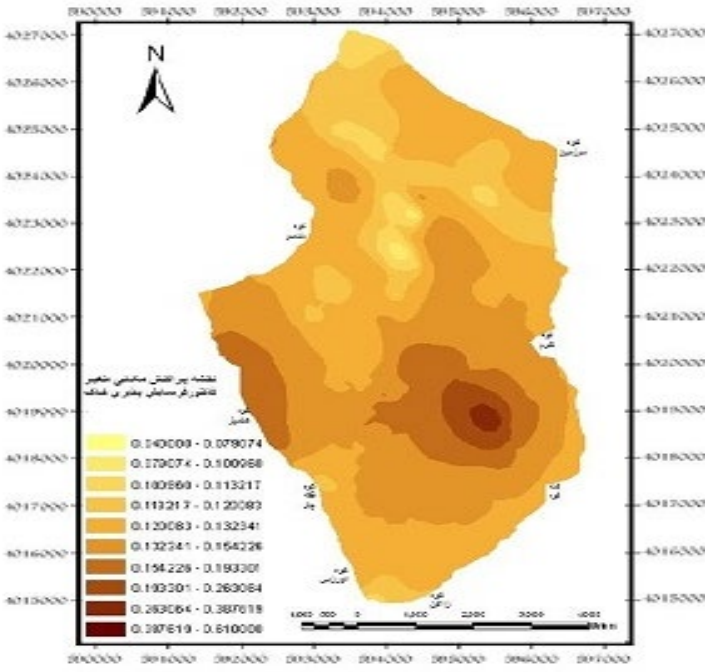
در این ارتباط بایستی بیان کرد که هر چقدر مقدار (MAE) برابر با صفر و یا نزدیکتر به صفر باشد نشان دهنده آن است که روش مورد استفاده برآورد دقیق‌تری را نسبت به مقادیر واقعی ارائه می‌نماید. در ارتباط با مقادیر پارامتر MBE و RMSE نیز بایستی گفت که هر چقدر این مقادیر به صفر نزدیکتر باشند، نیز دقت برآورد روش مورد نظر بیشتر خواهد بود. با توجه به جدول ۴ و با مد نظر قرار دادن این سه شاخص، مشخص گردید که روش کریجینگ نسبت به سایر روش‌های مورد مطالعه از دقت و صحت بالاتری برخوردار می‌باشد. شکل ۴، نقشه پهنه‌بندی فاکتورفرسایش‌پذیری خاک با استفاده از روش کریجینگ را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. این نقشه بیانگر یک سری تغییرات از منظر حساسیت خاک به فرسایش در نقاط مختلف در سطح منطقه می‌باشد که تاثیر سایر عوامل نظیر نوع کاربری و پوشش اراضی، نوع خاک و اجزاء تشکلیل دهنده آن (رس، سیلت و شن)، خصوصیات سنگ‌شناسی و .... را به خوبی در این رابطه بیان می‌کند. با توجه به دامنه مقادیر فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در منطقه می‌توان بیان نمود که به طور کلی منطقه مورد مطالعه براساس جدول ۵ به چهار کلاس فرسایش‌پذیری(خیلی‌کم- کم- متوسط و زیاد) تقسیم می‌شود.

جدول ۵: کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری خاک براساس مقادیر K (علی‌پور و همکاران، ۱۳۹۵)

مقدار K	کلاس فرسایش‌پذیری خاک
>۰/۷	خیلی زیاد
۰/۵-۰/۷	زیاد
۰/۲۵-۰/۵	متوسط
۰/۱۳-۰/۲۵	کم
<۰/۱۳	خیلی کم

همان‌طور که نقشه مذکور نشان می‌دهد به جز بخش‌های مرکزی در منطقه که دارای کاربری اراضی جنگلی انبوه و نیمه‌انبوه می‌باشند سایر بخش‌های منطقه حساسیت بالاتری به فرسایش

خاک دارند که این امر عمدتا ناشی از کاهش نفوذپذیری خاک، بیشتر بودن مقادیر سیلت، کمتر بودن مقادیر رس و شن و وجود سازندهای حساس-تر به فرسایش و .... است که همراه با تاثیر عوامل تخریبی نظیر چرای مفرط دام در مراتع(حاشیه روستا و اراضی مرتعی بالادست)، تخریب مناطق جنگلی(تنک) در اثر ورود و چرای دام در این مناطق و همچنین استفاده غیر اصولی از این اراضی به منظور فعالیت‌های تفرجگاهی و قاچاق چوب از یک طرف و عدم دسترسی به مناطق جنگلی بایر و کوهستانی از طرف دیگر(مناطق مرکزی) می‌باشد. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج تحقیقات متقیان و همکاران (۱۳۸۸)، بحرآسمانی و همکاران (۱۳۹۱)، پژوهش و داوودیان دهکردی (۱۳۹۳)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۴)، علی‌پور و همکاران (۱۳۹۵)، صوفی و امامی (۱۳۹۶)، لو و همکاران (۲۰۰۴)، کولی و همکاران (۲۰۰۹)، مبنی بر اثرگذاری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک، ویژگی‌های سنگ‌شناسی، نوع کاربری و پوشش اراضی، توسعه مناطق روستایی و صنعتی، چرای مفرط دام در اراضی مرتعی، استفاده غیراصولی مناطق جنگلی به صورت تفرجگاهی و فعالیت‌های دامداری، قاچاق چوب و .... بر فاکتور فرسایش-پذیری خاک مطابقت دارد.



شکل ۴: پهنه‌بندی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از روش کریجینگ

به منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک و جلوگیری از فرسایش خاک در نقاط مختلف در مقیاس حوزه آبخیز، لازم و ضروریست تا برنامه-ریزی صحیح و اصولی در قالب مدیریت یکپارچه حوزه‌های آبخیز در دستور کار قرار گیرد تا ضمن شناخت جامع از شرایط کلی سطح منطقه از مناطق بالادست تا مناطق پایین دست حوزه آبخیز مورد نظر، بتوان اقدامات موثر را در این رابطه انجام داد. برای تحقق این امر، در دست داشتن اطلاعات اولیه جامع و کامل از خصوصیات مختلف حوزه آبخیز ضروری به نظر می‌رسد که از جمله مهم‌ترین این اطلاعات می‌توان به نقشه‌های پهنه‌بندی خصوصیات خاک، خصوصیات سنگ‌شناسی، پوشش‌های گیاهی و .... اشاره نمود که در ارتباط با

حساسیت خاک به فرسایش و تخریب، نقش بسزایی می‌توانند داشته باشند. لذا با استعانت از روش‌های درون‌یابی مختلف(انواع کریجینگ، کوکریجینگ، عکس فاصله وزن‌دار، توابع شعاعی و ...) ضمن استفاده بهینه از تعداد نمونه‌های اخذ شده در ارتباط با متغیرهای مورد نظر، با صرفه جویی وقت و هزینه می‌توان به بهترین شکل ممکن به نقشه-های دقیق و قابل اطمینانی در این زمینه دست یافته و نتایج قابل قبولی را به دست آورد. در تحقیقات بسیاری، وجود ساختارهای مکانی برای اکثر خصوصیات خاک گزارش شده است و مدل‌های کروی و گوسی جهت بررسی تغییرپذیری مکانی خصوصیات مختلف خاک و تخمین آنها با استفاده از انواع روش‌های درون‌یابی من جمله کریجینگ به اثبات رسیده است که در این رابطه می‌توان به مطالعات متقیان و همکاران (۱۳۸۸)، محمودی و همکاران (۱۳۹۱)، پژوهش و داوودیان دهکردی (۱۳۹۳)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۴)، کیانی هرچگانی و همکاران (۱۳۸۸)، غلامی و همکاران (۱۳۹۹)، مبنی بر بیشترین کاربرد مدل‌های گوسی و یا کروی و روش کریجینگ در درون‌یابی خصوصیات مختلف خاک من جمله خصوصیات فیزیکی آن اشاره نمود که مطابق با نتایج حاصل از این بخش از تحقیق می‌باشد.

نتیجه‌گیری

زمین‌آمار ابزار ارزشمندی در تعیین وابستگی مکانی و میزان این وابستگی مکانی می‌باشد و تلفیق آن با سیستم‌های اطلاعات مکانی برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی توزیع متغیرهای مکانی مختلف(نظیر خصوصیات خاک) نقش مهمی را ایفا می‌نماید. نتایج اکثر تحقیقات انجام شده بیانگر آن است که روش بهینه و مناسب به منظور برآورد و تخمین داده‌ها بسته به متغیر می‌تواند متفاوت باشد که در این بین متغیرهای زیادی هستند که در انتخاب بهترین و بهینه‌ترین روش تخمین موثر می‌باشند. عدم همگنی منطقه از منظر عوامل مختلف تاثیرگذار در خصوصیات خاک نظیر، شرایط توپوگرافی، سازندهای زمین‌شناسی و خصوصیات سنگ‌شناسی، انواع کاربری‌های مختلف اراضی، وسعت محدوده مورد مطالعه، تعداد نمونه‌ها و فواصل نمونه‌برداری و ..... می‌تواند در انتخاب روش تخمین در مباحث زمین‌آماری نیز موثر باشد. با توجه به شرایط و وضعیت تخریب در عرصه‌های منابع طبیعی کشور برآورد و تعیین فاکتور فرسایش‌پذیری خاک و متعاقب آن استفاده از آن در مدل‌های مختلف فرسایش خاک امری مهم و ضروری به شمار می‌رود. هدف در این پژوهش تهیه نقشه پهنه‌بندی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از برخی روش‌های درون‌یابی بوده است. بر طیق شاخص‌های دقت‌سنجی روش کریجینگ تخمین دقیق‌تری از فاکتور فرسایش پذیری خاک نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی در منطقه از خود نشان داده است. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که در بین روش‌های مختلف درون‌یابی روش کریجینگ از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. طبق نظر برخی از پژوهشگران نیز این روش به عنوان بهترین روش درون‌یابی و تخمین در نقاط فاقد آمار در مناطق همگین عمل می‌کند. در ایران از روش کریجینگ استفاده‌های زیادی به‌ویژه برای ساخت نقشه‌های مختلف می‌شود. این روش نیاز به محاسبه قبلی و تعیین نحوه همبستگی مکانی داده‌های صحرایی دارد که با ترسیم سمی واریوگرام تجربی و انتخاب مدل ریاضی مناسب که بتواند بر نقاط آن برازش شود قابل انجام است. از مزایای نقشه‌های تولیدی، کمی کردن نتایج حاصل می‌باشد که منجر به توانمندی در باز تولید و بهنگام‌سازی اطلاعات به دست آمده می‌گردد. با توجه به ماهیت کمی این

گونه نقشه‌ها از آنها می‌توان به عنوان لایه‌های مختلف اطلاعاتی استفاده نمود. قابل ذکر است که نتیجه حاصل از این پژوهش را می‌توان فقط برای منطقه مورد مطالعه مذکور مناسب دانست و نمی‌توان آن را برای مناطق دیگر استفاده نمود و تعمیم داد. لذا توصیه می‌گردد به منظور بررسی تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک در سایر مناطق مشابه با منطقه مورد مطالعه، تحقیقات مستقل و جداگانه‌ای صورت گیرد تا ضمن شناخت و تعیین چگونگی توزیع تغییرات مکانی خصوصیات خاک در منطقه مورد نظر نتایج را با نتایج سایر مطالعات انجام شده مطابقت داد.

پانوشت

1-GPS(Globa Position System)
2-Ordinery Kriging
3-Completely Regulazed Spline

منابع

-آرمین، م.، مهدیان، م.ح.، احمدی، ح.، روحی‌پور، ح.، سلاجغه، ع. و قربان‌نیا خبیری، و.، ۱۳۹۳. بررسی تغییرپذیری خاکدانه‌ها و عوامل موثر در خاکدانه‌ای شدن خاک با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ(مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز طالقان)، پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۱۰۴، ص ۱۰۷-۱۲۲.

-امیدوار، ا.، کاویان، ع.، سلیمانی، ک. و مشاری، س.، ۱۳۹۴. بررسی قابلیت استفاده از نقشه واحدهای خاک به منظور برآورد تغییرات مکانی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، نشریه مهندسی اکوسیستم‌های بیابان، شماره ۹، ص ۹۵-۱۰۷.

-ایوبی، ش. و حسینعلی‌زاده، م.، ۱۳۸۶. بررسی تغییرات مکانی فرسایش پذیری خاک با استفاده از روش زمین آمار و GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز مهر سبزوار)، مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۲، ص ۳۶۹-۳۸۲.

-بافکار، ع. و مجردی، ح.، ۱۳۹۶. حفاظت آب و خاک، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه رازی، کرمانشاه، ۲۳۸ ص.

-بحرآسمانی کوهستانی، س.، میکائیلی تبریزی، ع.، سلمان ماهینی، ع. و کامیاب، ح.، ۱۳۹۱. محاسبه و تعیین فاکتور فرسایش پذیری خاک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی(منطقه توسکستان-چهارباغ در استان گلستان)، سومین همایش ملی مقابله با بیابانزایی و توسعه پایدار تالاب‌های کویری ایران، اراک، ص ۷۵۵-۷۵۹.

-بسالت‌پور، ع.ا.، ایوبی، ش. و حاج‌عباسی، م.ع.، ۱۳۹۳. تعیین روابط خطی و غیرخطی فاکتورفرسایش‌پذیری خاک با ویژگی‌های اثرگذار بر آن در یک حوزه آبخیز کوهستانی با فرسایش خاک شدید، فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، جلد ۱۶، شماره ۴، ص ۴۹-۶۳.

-بهرامی، ح.، پَر نلخ، ت. و طهماسبی، ن.، ۱۳۸۴. بررسی عامل فرسایش‌پذیری خاک در کاربری‌ها و تیپ‌های اراضی مختلف در حوزه آبخیز چم انجیر، مجموعه مقالات سومین همایش فرسایش و رسوب ایران، یزد، ص ۵۰۱-۵۰۸.

-بهنام، و.، غلامعلی‌زاده آهنگر، ا.، رحمانیان، م. و بامری، ا.، ۱۳۹۸. بررسی توزیع مکانی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های زمین آماری(مطالعه موردی: مسیرزابل به زاهدان)، نشریه محیط زیست و مهندسی آب، شماره ۳، ص۲۵۱-۲۶۳.

-پژوهش، م. و داوودیان دهکردی، ع.، ۱۳۹۳. پهنه-بندی عامل فرسایش پذیری خاک با استفاده از تکنیک زمین آمار (مطالعه موردی: دشت لاله استان چهارمحال و بختیاری)، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۳، شماره ۱، ص۱۴۷-۱۵۸.

-تاجگردان، ت.، ایوبی، ش.، خرمالی، ف. و شتایی، ش.، ۱۳۸۶. بررسی تغییر پذیری مکانی و همبستگی برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به کمک تکنیک زمین آمار (مطالعه موردی: بخشی از اراضی شمال آق قلا)، مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج، ص۲۷۱-۲۷۲.

-تقی‌زاده، ر.، محمودی، ش.، زارعیان جهرمی، م. و حیدری، ا.، ۱۳۸۶. شناسایی پراکنش مکانی بافت خاک با استفاده از روش‌های زمین آماری و تکنیک GIS(مطالعه موردی منطقه خضر آباد یزد)، مجموعه مقالات چهارمین همایش آبخیزداری ایران، کرج، ص ۱۱۲۸-۱۱۳۵.

-جوادی، م.ر. و فرنوش، م.، ۱۳۹۹. راهنمایی برای ارزیابی فرسایش خاک و رسوبگذاری با استفاده از رادیونو کلوئیدهای زیست محیطی، ترجمه، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی مازندران، ساری، ۳۵۶ ص.

-جعفریان، ز. و شعبانزاده، س.، ۱۳۹۶. تاثیر جهت شیب بر تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه کیاسر مازندران، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۷، شماره ۴، ص ۲۲۵-۲۳۵.

-حسنی پاک، ع.ا.، ۱۳۹۲. زمین آمار(ژئواستاتیستیک)، چاپ ۴، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۲۸ ص.

-حسینعلی‌زاده، م.، ایوبی، ش. و شتایی، ش.، ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی در برآورد برخی خصوصیات خاک سطحی (مطالعه موردی حوزه آبخیز مهر سبزوار)، نشریه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۳، شماره ۵، ص۱۵۲-۱۶۲.

-حق نیا، غ.ح. و کوچکی، ع.، ۱۳۷۶. مدیریت پایدار خاک، ترجمه، چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد، ۲۰۴ ص.

-دلبری، م.، خیاط خلقی، م. و مهدیان، م.ح.، ۱۳۸۳. ارزیابی روش های زمین آماری در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق شیب آب و پشت آب پایین دشت سیستان، مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۵، شماره ۱، ص ۱-۱۲.

-رفاهی، ح.، ۱۳۹۴. فرسایش آبی و کنترل آن، چاپ ۷، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۶۷۴ ص.

-صوفی، م.ب. و امامی، ح.، ۱۳۹۶. ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک در حوضه سد طرف مشهد، فلصنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، جلد ۲۷، شماره ۳، ص ۲۵-۳۸.

-ضیایی، ح.، ۱۳۸۹. اصول مهندسی آبخیزداری، چاپ ۳، انتشارات دانشگاه امام رضا، مشهد، ۵۴۸ ص.

-طاعتی، ع.، سرمدنیا، ف.، متقیان، ح. و موسوی، ر.، ۱۳۹۹. پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های سطحی و عمقی پروفیل خاک با استفاده از تکنیک زمین آمار در بخشی از اراضی دشت قزوین، فصلنامه انسان و محیط‌زیست، شماره ۱، ص ۶۷-۸۱.

-علی‌پور، ح.، ملکیان، ا.، خیرخواه‌زرکش، م.م. و قره‌چلو، س.، ۱۳۹۵. برآورد شدت فرسایش و رسوب حوزه آبخیز ایور با استفاده از روش تجربی MPSIAC، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۵، ص ۲۴۳-۲۶۸.

-علیزاده، ا.، ۱۳۶۸. فرسایش و حفاظت خاک، ترجمه، چاپ اول، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، ۲۵۷ ص.

-غلامی، ع.، ولی‌پور، پ. و نورزاده حداد، م.، ۱۳۹۹. بررسی کارایی روش‌های زمین‌آماری در پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک(مطالعه موردی: اراضی شرق کارون)، فصلنامه فضای جغرافیایی، شماره ۶۹، ص ۱-۱۵.
-کریم پورریحان، م. و کیانیان، م.ک.، ۱۳۸۸. مبانی خاک‌ها، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۳۹۸ ص.
-کیانی هرچگانی، م.، صادقی، ح. و فلاحتکار، س.، ۱۳۹۸. تحلیل مقایسه‌ای فرسایش‌پذیری خاک در حوزه آبخیز شازند، اکوهیدرولوژی، دوره ۶، شماره ۱، ص ۱۵۳-۱۶۳.
-متقیان، ح.، محمدی، ج. و کریمی، ا.، ۱۳۸۸. پهنه‌بندی زمین آماری فرسایش‌پذیری خاک در مقیاس حوزه آبخیز، یازدهمین کنگره علوم خاک ایران، گرگان، ۲۱-۲۴ تیر، ص ۱۸۳۵-۱۸۴۱.
-محمدی، ج.، ۱۳۸۵. پدومتری(آمار مکانی)، جلد ۲، چاپ ۱، انتشارات پلک، تهران، ۵۳۲ ص.
-محمودی، ج.، زارعیان، ف.، جوادی، م. و خرسندی، ن.، ۱۳۹۱. مقایسه کارایی چند روش زمین‌آماری برای تخمین برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ۱، شماره ۴، ص ۶۷-۷۶.
-ناصری حصار، ن.، زارع چاهوکی، م.ع. و جعفری، م.، ۱۳۹۵. بررسی پراکنش مکانی برخی خصوصیات خاک مراتع اشتهارد با استفاده از روش‌های آمار مکانی، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان، شماره ۲، ص ۲۹۹-۳۱۰.
-نخعی، م.، ۱۳۸۹. مقدمه‌ای بر زمین آمار، چاپ ۲، انتشارات امید انقلاب و کهکشان دانش، تهران، ۲۳۴ ص.

-Buttafuoco, G., Conforti, M.P.P.C., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G. & Scarciglia, F., 2012. Assessing Spatial Uncertainty in Mapping Soil Erodibility Factor Using Geostatistical Stochastic Simulation, Environ Earth Sci, v. 66, p. 1111-1125.
-Karimi Nezhad, M.T., Tabatabaii, S.M. and Gholami, A., 2015. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz Iran. J. Geochem Explor, v. 152, p. 91-109.
-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, v. 57, p. 483-497.
-Lu, D., Li, G., Valladares, G.S. and Batistella, M., 2004. Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia using RUSLE, Remote sensing and GIS.Land Degrad.Devel, v. 15, p. 499-512.
-Oliver, M.A., 2007. Geostatistics and its application to soil science, Soil use and management, v. 3(1), p. 8-20.
-Reza, S.K., Nayak, D.C., Mukhopadhyay, S., Chattopadhyay, T. and Singh, S.K., 2017. Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system, Archives of Agronomy and Soil Science.
-Rosemary, F., Vitharana, U.W.A., Indraratne, S.P., Weerrasooriya, R. and Mishra, U., 2017. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena, Catena, v. 150, p. 53-61.
-Sarma, D.O., 2009. Geostatistics with Applications in earth sciences, Second edition, copublished by Springer, 205 p.