

تحلیل زمین آماری اثر تغییر کاربری اراضی و رهاسازی بر شاخص کیفیت خاک در اکوسیستم جنگلی زاگرس جنوبی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز ده شیخ

چکیده

تغییر کاربری اراضی از عوامل کلیدی تخریب اکوسیستم‌ها و کاهش کیفیت خاک محسوب می‌شود. جنگل‌ها با ایجاد شرایط زیستی مناسب، نقش مهمی در پایداری محیط دارند، اما تبدیل آن‌ها به کاربری‌های دیگر، ساختار و عملکرد خاک را مختل می‌کند. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثر نوع کاربری و مدت زمان رهاسازی بر شاخص کیفیت خاک (SQI) و تحلیل الگوی مکانی آن با روش‌های پیشرفته کریجینگ، اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ در جنگل‌های زاگرس جنوبی (شهرستان دزپارت، استان خوزستان) انجام شد. برای این منظور، چهار تیپ جنگلی شامل اراضی با رهاسازی ۳، ۱۰ و ۲۵ ساله و جنگل‌های شاهد، انتخاب و در مجموع ۹۶ نمونه خاک جمع‌آوری شد. شاخص کیفیت خاک (IQI) با استفاده از روش وزن‌دهی تجمعی محاسبه و سپس، برای تهیه نقشه‌های کیفیت خاک، مدل‌سازی واریوگرام و انتخاب بهترین مدل از نرم‌افزار GS+ استفاده شد. در ادامه، درون‌یابی داده‌ها با روش‌های مختلف کریجینگ (معمولی، عمومی و ساده) در محیط GIS انجام گردید. نتایج نشان داد شاخص کیفیت خاک به طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع کاربری قرار دارد ($p < 0.05$)، به طوری که بیشترین مقدار آن در جنگل طبیعی (0.63 ± 0.06) و کمترین در آیش زراعت (0.06) مشاهده شد. در میان مدل‌های واریوگرام، مدل خطی برای جنگل، نمایی، برای رهاسازی‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت و مدل کروی برای آیش زراعت (رهاسازی ۳ ساله) مناسب‌ترین بودند. همچنین، در ارزیابی دقت درون‌یابی، کریجینگ ساده برای جنگل ($RMSE=0.97$) و رهاسازی بلندمدت ($RMSE=1.01$)، و کریجینگ معمولی برای رهاسازی کوتاه مدت ($RMSE=1.18$) و آیش زراعت ($RMSE=1.57$) بهترین عملکرد را داشتند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که تغییر کاربری و مدت رهاسازی بر کیفیت خاک مؤثر است و با مدل‌سازی واریوگرام و کاربرد کریجینگ می‌توان الگوی مکانی شاخص کیفیت خاک را با دقت مناسبی تحلیل کرد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که می‌توان از تکنیک‌های زمین‌آمار برای پایش و مدیریت اکوسیستم‌های جنگلی به خوبی بهره گرفت.

واژگان کلیدی: تغییر کاربری، کیفیت خاک، درون‌یابی، کریجینگ، مدل واریوگرام.

مقدمه

جنگل‌ها یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین اکوسیستم‌های طبیعی زمین به‌شمار می‌روند و نقش محوری در پایداری محیط‌زیست ایفا می‌کنند. این اکوسیستم‌ها با تثبیت خاک، کاهش فرسایش، تنظیم چرخه‌های آب و کربن و حفظ تنوع زیستی، خدمات گسترده‌ای ارائه می‌دهند (Wilpert, 2022; Ramachandra et al., 2025). جنگل‌ها همچنین با داشتن لایه‌های آلی غنی و ساختار خاک پیچیده، منبع مهمی برای کربن آلی و عملکردهای زیستی خاک محسوب می‌شوند (Kosanin et al., 2023). خاک به عنوان بستر حیات، نقشی اساسی در پایداری اکولوژیکی و تولید زیست‌توده ایفا می‌کند. کیفیت خاک مفهومی است که به توانایی خاک برای انجام عملکردهای کلیدی از جمله تأمین مواد غذایی برای گیاه، نگهداری آب، پشتیبانی از فعالیت‌های زیستی و حفظ کیفیت محیط‌زیست اشاره دارد (Corti et al., 2020). خاک‌های جنگلی به دلیل دارا بودن ماده آلی بالا، ساختار متخلخل و ظرفیت تبادل یونی مناسب معمولاً از کیفیت مناسبی برخوردار هستند (Carnicelli et al., 2025).

در دهه‌های اخیر، تغییر کاربری جنگل‌ها به زمین‌های زراعی از جمله در جنگل‌های زاگرس، از مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت خاک بوده است (Taghipour et al., 2022). مطالعات متعددی در ایران و سایر کشورها به بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک

مهدی حیدری^{۱*}

سینا عطار روشن^۲

نرگس پردل^۱

۱. گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

۲. گروه علوم محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات

m.heidari@ilam.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸

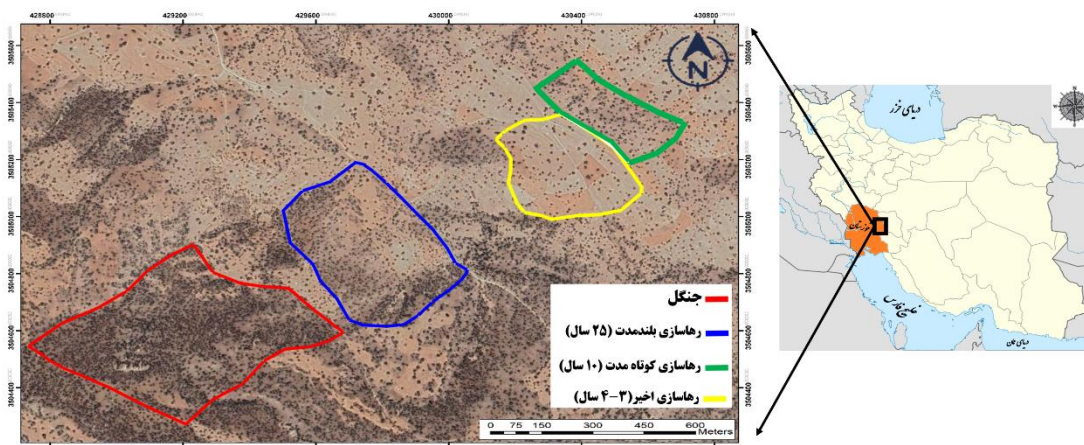
پرداخته‌اند. مطالعات انجام‌شده در جنگل‌های بلوط زاگرس نشان داده‌اند که تبدیل اراضی جنگلی به زراعی یا باغی موجب کاهش معنی‌دار ماده آلی و عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم و افزایش چگالی ظاهری و شوری و نهایتاً کاهش کیفیت خاک شده است (Mohmmadi Samani *et al.*, 2018; Taghipour *et al.*, 2022). در مطالعه‌ای دیگر نیز مشخص شد که تبدیل جنگل به زمین کشاورزی باعث کاهش ۵۰ درصدی ماده آلی و افزایش ۲۰ درصدی افزایش چگالی ظاهری و افت شدید عناصر غذایی گردیده است (Hajabbasi *et al.*, 2004). ارزیابی چنین تغییراتی در کیفیت خاک، نیازمند استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند شاخص کیفیت خاک (Soil Quality Index- SQI) است که با ترکیب ویژگی‌هایی چون ماده آلی، نیتروژن، فعالیت آنزیمی و تبادل کاتیونی، تصویری یکپارچه از وضعیت عملکردی خاک ارائه می‌دهد (Yang *et al.*, 2022). مطالعه‌ای در منطقه نیلگیری در هند نشان داد که تبدیل جنگل به زمین‌های زراعی موجب کاهش معنی‌دار شاخص کیفیت خاک، ماده آلی، نیتروژن، پتاسیم و فعالیت‌های آنزیمی خاک شده است، به‌ویژه در مزارع چای و زراعت‌های تجاری (Jagadesh *et al.*, 2024). در اتیوپی، تغییر کاربری جنگل به زمین کشاورزی منجر به کاهش معنی‌دار مواد آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، ازت و افزایش چگالی ظاهری شده است (Leul *et al.*, 2023). در ایران نیز نتایج تحقیقاتی مانند مطالعه (Raiesi & Salek-Gilani, 2020) در مناطق نیمه‌خشک مرکزی کشور نشان داد که پس از تبدیل مرتع طبیعی به اراضی کشاورزی، شاخص کیفیت خاک تا ۳۰٪ کاهش یافته است و با ترک کشاورزی و احیای طبیعی، بخشی از کیفیت خاک بازمی‌گردد. همچنین، در تحقیقی در استان آذربایجان غربی، مشخص شد که تغییر کاربری جنگل به باغ و اراضی کشاورزی موجب افت ۴۰ تا ۶۰ درصدی کربن آلی و کاهش شدید فعالیت میکروبی و شاخص‌های زیستی خاک شده است (Rasouli-Sadaghiani *et al.*, 2018). برای تحلیل تغییرات مکانی کیفیت خاک، استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی بسیار ارزشمند است. در این راستا، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان یکی از فناوری‌های نوین، نقش مهمی در پایش و بهینه‌سازی مدیریت و بهره‌برداری از منابع ایفا می‌کند. GIS بستری مناسب برای جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و نمایش داده‌های رقومی فراهم کرده است (Premsudha *et al.*, 2024). در این سیستم، اطلاعات مربوط به یک منطقه به‌صورت لایه‌های مجزا در یک پایگاه داده ذخیره می‌شود. از مهم‌ترین مزایای GIS، توانایی ترکیب لایه‌های اطلاعاتی و انجام تحلیل‌های مختلف بر اساس روابط میان آن‌ها است (Ghaisvandi, 2013; Akmal, 2024). روش‌های درون‌یابی مکانی، به‌ویژه تکنیک‌های کریجینگ (Kriging)، ابزاری کلیدی در ارزیابی مکانی شاخص‌های مرتبط با سلامت و وضعیت اکوسیستم از جمله خصوصیات خاک هستند. این روش‌ها بر پایه تحلیل آماری نقاط نمونه‌برداری شده، امکان تولید نقشه‌های دقیق از توزیع مکانی خصوصیات خاک را فراهم می‌کنند (Dindaroğlu, 2014; Oppong Sarkodie *et al.*, 2024).

این روش‌ها با مدل‌سازی ساختار همبستگی مکانی داده‌ها، قادر به برآورد مقادیر (در نقاط نمونه‌برداری نشده)، با دقت بالا هستند. روش‌های مختلفی از کریجینگ مانند (عام، معمولی و ساده) بسته به نوع داده‌ها و هدف مطالعه به کار می‌روند. کریجینگ به‌ویژه در مطالعات محیطی و خاک، نسبت به روش‌هایی نظیر IDW دقت بالاتری دارد زیرا بر پایه ساختار واریوگرام و ناهمگنی مکانی عمل می‌کند (Shao *et al.*, 2020). در برخی مطالعات در جنگل‌های ایران، کریجینگ عام (Universal Kriging) بالاترین دقت ($R^2=0.71$) را در تهیه نقشه‌های کیفیت خاک نشان داده است (Taghipour *et al.*, 2022). در روش کریجینگ، انتخاب مدل مناسب واریوگرام از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا دقت تخمین‌ها به طور مستقیم تحت تأثیر نوع مدل انتخابی قرار می‌گیرد. این انتخاب باید متناسب با نوع متغیر مورد بررسی و شرایط محیطی منطقه انجام شود (Huang *et al.*, 2023). مدل‌های مختلف واریوگرام از جمله مدل‌های کروی، نمایی و گوسی، هرکدام رفتار متفاوتی از تغییرات مکانی خصوصیات خاک را بازنمایی می‌کنند و انتخاب نادرست آن‌ها می‌تواند به کاهش دقت نتایج منجر شود (Ai *et al.*, 2018). جنگل‌های زاگرس به عنوان یکی از مهمترین اکوسیستم‌های طبیعی ایران از دیرباز در معرض تخریب گسترده و تغییر کاربری قرار داشته‌اند (Heydari *et al.*, 2013; Beygi Heidarlou *et al.*, 2021). یکی از اثرات این تخریب‌ها و اختلال‌ها، فرسایش و کاهش حاصلخیزی خاک است. پایش و آگاهی از تغییر مکانی کیفیت خاک در اکوسیستم می‌تواند پایه برنامه‌های مدیریتی و احیایی حال و آینده باشد. بررسی کارایی روش‌های درون‌یابی مناسب به منظور پهنه‌بندی شاخص کیفیت خاک در رابطه با تغییر کاربری در این جنگل‌ها، ابزار مناسب و مقرون به‌صرفه‌ای برای مدیریت این جنگل‌ها است که در گذشته چندان مورد توجه قرار نگرفته است. از این رو، پژوهش حاضر

با هدف بررسی تأثیر انواع کاربری اراضی (شامل جنگل، رهاشده از زراعت با دوره‌های زمانی مختلف) بر شاخص کیفیت خاک و تهیه نقشه‌های مکانی آن با استفاده از روش‌های کریجینگ در جنگل‌های زاگرس جنوبی انجام شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی مناسب برای مدیریت حفاظتی و احیایی اکوسیستم جنگلی زاگرس فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش (در اردیبهشت ماه ۱۴۰۳) در بخشی از جنگل‌های زاگرس جنوبی، واقع در شهرستان دزپارت استان خوزستان انجام شد (شکل ۱). جنگل‌های زاگرس با وسعتی در حدود ۵ میلیون هکتار، حدود ۴۰ درصد از کل جنگل‌های ایران را تشکیل می‌دهند و بزرگ‌ترین رویشگاه جنگلی کشور محسوب می‌شوند (Sagheb-Talebi *et al.*, 2014; Shiravand and Hosseini, 2020). شرایط اقتصادی و اجتماعی حاکم بر این منطقه، موجب وابستگی شدید جوامع محلی به منابع جنگلی برای تأمین معیشت (Heidarlou *et al.*, 2019; جعفری و شجاعی فرد، ۱۴۰۰)؛ و در نهایت، منجر به تخریب گسترده جنگل‌ها به‌ویژه برای توسعه کشاورزی شده است. در سال‌های اخیر، اداره منابع طبیعی استان خوزستان اقدامات مدیریتی متعددی را برای جلوگیری از تبدیل جنگل به اراضی کشاورزی اجرا نموده و این اقدامات، در کنار کاهش سودآوری کشاورزی سنتی، سبب رها شدن بسیاری از این اراضی و امکان بازگشت تدریجی پوشش گیاهی طبیعی شده است. مرحله اوج توالی طبیعی در این منطقه، جنگل‌های بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) است که مجموعه‌ای متنوع از گونه‌های چوبی و علفی را در خود جای داده است. ارتفاع متوسط منطقه ۱۶۳۰ متر از سطح دریا و میانگین بارندگی و دمای سالانه ۵۹۶ میلی‌متر و ۱۹/۱ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دوما رتن، منطقه مورد مطالعه در اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد (Mataji *et al.*, 2013). خاک غالب منطقه خاک‌های آهکی با عمق کم تا متوسط هستند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و خوزستان طراحی آزمایش و نمونه‌برداری

در مرحله نخست، با استفاده از بازدیدهای میدانی و مصاحبه با ساکنان محلی، زمین‌های جنگلی که سابقه طولانی کشت دیم (عمدتاً گندم) در زیراشکوب خود داشته‌اند، شناسایی شدند. سپس، جنگل‌های ثانویه‌ای که پس از رها شدن این زمین‌های زراعی به صورت طبیعی بازسازی شده بودند، انتخاب و نمونه‌برداری شدند. با توجه به تفاوت در زمان رهاسازی، این جنگل‌ها مراحل مختلفی از توالی ثانویه را نمایندگی می‌کنند. همچنین، جنگل‌های کمتر دست‌خورده و کهن‌سال که سابقه‌ای از کشت در آن‌ها ثبت نشده است به عنوان مرجع و نماینده مراحل بالاتر توالی در نظر گرفته شدند. بر این اساس، چهار تیپ جنگلی زیر مد نظر قرار گرفته شد:

۱. رهاسازی اخیر (۳ تا ۴ سال گذشته؛ آیش زراعت)؛ ۲. توده‌های جنگلی با رهاسازی کوتاه‌مدت (حدود ۱۰ سال)؛ ۳. توده‌های جنگلی با رهاسازی بلندمدت (حدود ۲۵ سال)؛ ۴. توده‌های جنگلی شاهد (بدون سابقه کشت). در هر تیپ، سه لکه جنگلی با وسعت تقریبی ۳ تا ۴ هکتار انتخاب شد. در هر لکه، دو ترانسکت عمود بر هم پیاده شد که روی هر ترانسکت، چهار نقطه نمونه‌برداری با فاصله ۲۵ متری از یکدیگر مشخص گردید. در مجموع، ۹۶ پلات مورد بررسی قرار گرفت (۴ تیپ یا حالت 3×8 لکه 8×3 قطعه نمونه). نمونه‌های خاک از منطقه

جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل گردید. در آزمایشگاه، پس از هواخشک کردن نمونه‌ها، خصوصیات خاک شامل (شن، رس، سیلت، چگالی ظاهری، تخلخل، درصد رطوبت در ظرفیت زراعی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، اسیدیته، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، تنفس میکروبی، کربن میکروبی، تنفس برانگیخته) اندازه‌گیری شد.

در این پژوهش ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک که در منابع مختلف به عنوان ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک معرفی شده‌اند، به عنوان مجموعه داده‌ها (Total data set; TDS) مدنظر قرار گرفت. بعد از تعیین وزن ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، شاخص کیفیت خاک با استفاده از معادله شاخص تجمعی کیفیت خاک (Taghipour *et al.*, 2022) تعیین شد:

$$IQI = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i$$

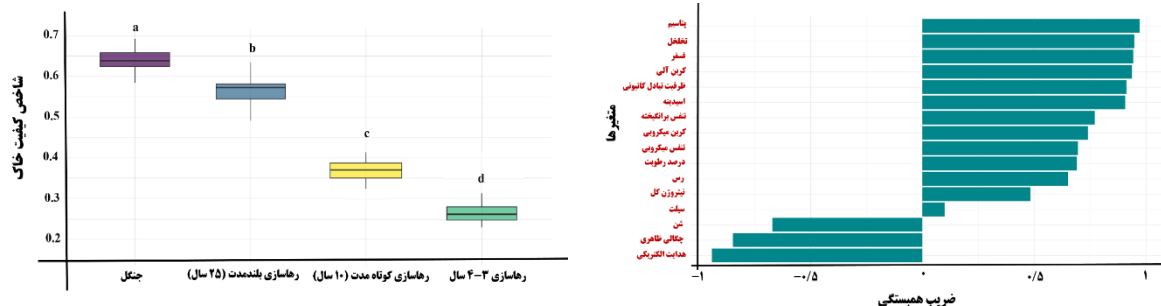
در این معادله W_i وزن تعلق یافته به هر ویژگی خاک؛ N_i : امتیاز تعلق یافته به هر ویژگی و n : تعداد نمونه‌ها برای تحلیل آماری شاخص کیفیت خاک، ابتدا نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها با آزمون لون بررسی شد. پس از تأیید این مفروضات، از آزمون ANOVA یک‌طرفه جهت مقایسه شاخص بین تیپ‌های مختلف استفاده شد و در صورت معنی‌دار بودن نتایج، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن (Duncan's Multiple Range Test) انجام شد. همچنین، برای بررسی تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک بر شاخص کیفیت، از تحلیل‌های آماری (همبستگی) استفاده شد تا روابط میان متغیرهای کلیدی خاک و شاخص کیفیت به صورت کمی و بصری مورد ارزیابی قرار گیرد. تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزاری SPSS نسخه ۲۳ (SPSS Inc، شیکاگو، IL) و R انجام گرفت. برای مقایسه مدل‌های مختلف درون‌یابی، گام اول، محاسبه واریوگرام است که سه مؤلفه کلیدی آن (Nugget و Range، Sill) به تحلیل ساختار مکانی داده‌ها کمک می‌کند (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۰). برای مدل‌سازی واریوگرام، از مدل‌های مختلفی مانند خطی، نمایی، گوسی و کروی استفاده شد که هر کدام ویژگی‌های متفاوتی در بازنمایی تغییرات مکانی دارند (Laun *et al.*, 2016). مدل بهینه واریوگرام با استفاده از نرم‌افزار GS+ انتخاب شد. این مدل کمترین مقدار RSS و بیشترین مقدار R^2 را دارد (Stateczny & Włodarczyk-Sielicka, 2012). سپس، روش‌های مختلف کریجینگ شامل معمولی، عمومی و ساده برای درون‌یابی به کار گرفته شدند که تفاوت اصلی آن‌ها در نحوه در نظر گرفتن میانگین داده‌ها است (Khan *et al.*, 2023; Rebholz & Almekkawy, 2020).

نتایج

نتایج تحلیل همبستگی بین خصوصیات خاک و شاخص کیفیت خاک نشان داد که بین خصوصیات مختلف خاک و شاخص کیفیت خاک همبستگی معنی‌داری وجود دارد، به طوری که شن (۰/۶۷-)، چگالی ظاهری (۰/۸۴-) و هدایت الکتریکی (۰/۹۴-) همبستگی منفی و سایر ویژگی‌های خاک با شاخص کیفیت خاک همبستگی مثبت داشتند (شکل ۲). در این میان پتاسیم (۰/۹۷)، تخلخل (۰/۹۴)، فسفر (۰/۹۴) و کربن (۰/۹۳) بیشترین همبستگی مثبت را با شاخص کیفیت خاک نشان دادند (شکل ۲).

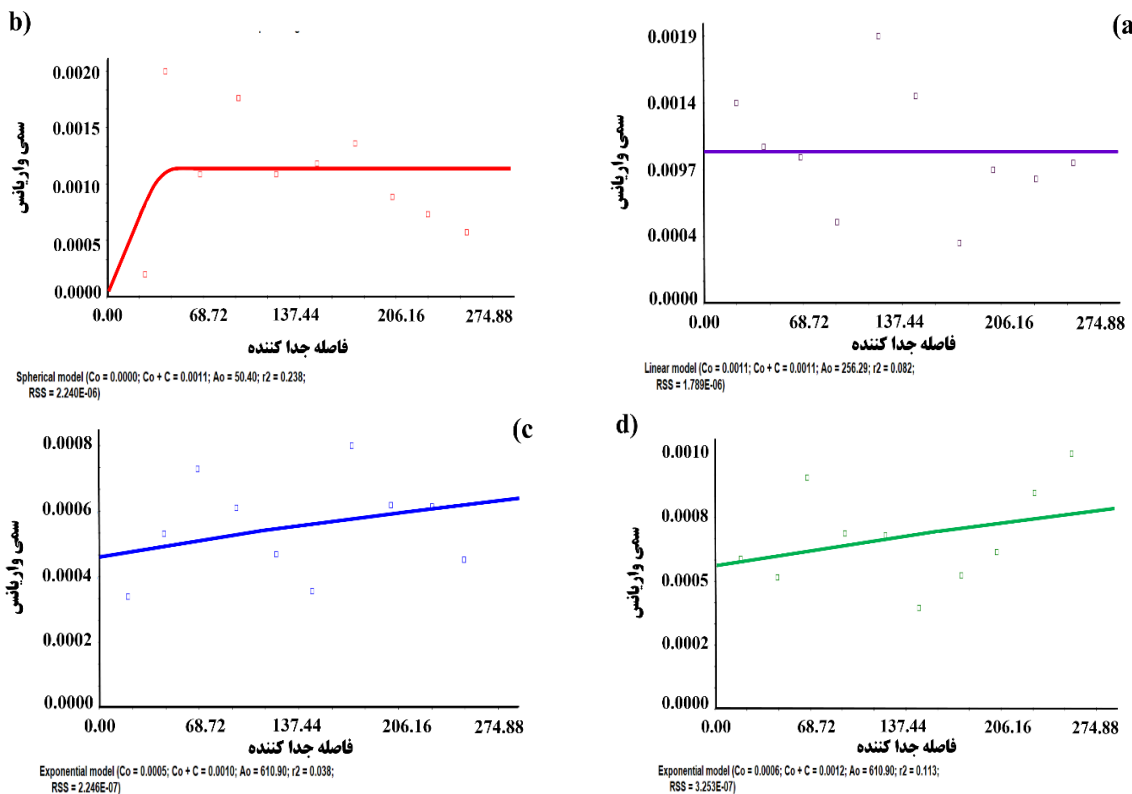
نتایج حاصل از مقایسه میانگین شاخص کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف (شکل ۳) نشان داد که منطقه یا تیپ مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری ($p < 0.05$) بر کیفیت خاک دارد. بالاترین مقدار این شاخص (0.63 ± 0.06) در جنگل ثبت شد که به طور معنی‌داری با سایر تیپ‌ها تفاوت داشت ($p < 0.05$) و نشان دهنده وضعیت مطلوب اکوسیستم جنگلی است. در ادامه، رهاسازی بلندمدت (۲۵ سال) با وجود بهبود نسبی (0.56 ± 0.06)، هنوز به سطح کیفیت خاک جنگل نرسیده و در مرتبه بعدی قرار گرفت. رهاسازی کوتاه‌مدت (۱۰ سال) نیز شاخص پایین‌تری (0.37 ± 0.05) نسبت به رهاسازی بلندمدت داشت، اما همچنان از رهاسازی اخیر (۳-۴ سال) وضعیت بهتری داشت. کمترین شاخص کیفیت خاک (0.26 ± 0.06) مربوط به رهاسازی ۳-۴ سال بود.

نتایج حاصل از واریوگرام‌های برازش شده در نرم‌افزار GS+ برای مدل‌های مختلف (کروی، نمایی، خطی و گوسین) در داده‌های شاخص کیفیت خاک نشان داد که برای شاخص کیفیت خاک در کاربری جنگل مدل خطی (Linear)، رهاسازی بلندمدت و کوتاه‌مدت مدل نمایی (Exponential) و آیش زراعت مدل کروی (Spherical) به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شده است (شکل ۴).



شکل ۲- ماتریس همبستگی بین خصوصیات خاک با شاخص کیفیت خاک

شکل ۳- مقایسه میانگین ($\pm$ اشتباه معیار) میزان شاخص کیفیت خاک در کاربری جنگل، رهاسازی بلندمدت، رهاسازی کوتاه‌مدت و آیش زراعت (رهاسازی ۳-۴ سال). حروف ناهمسان در ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ درصد است.

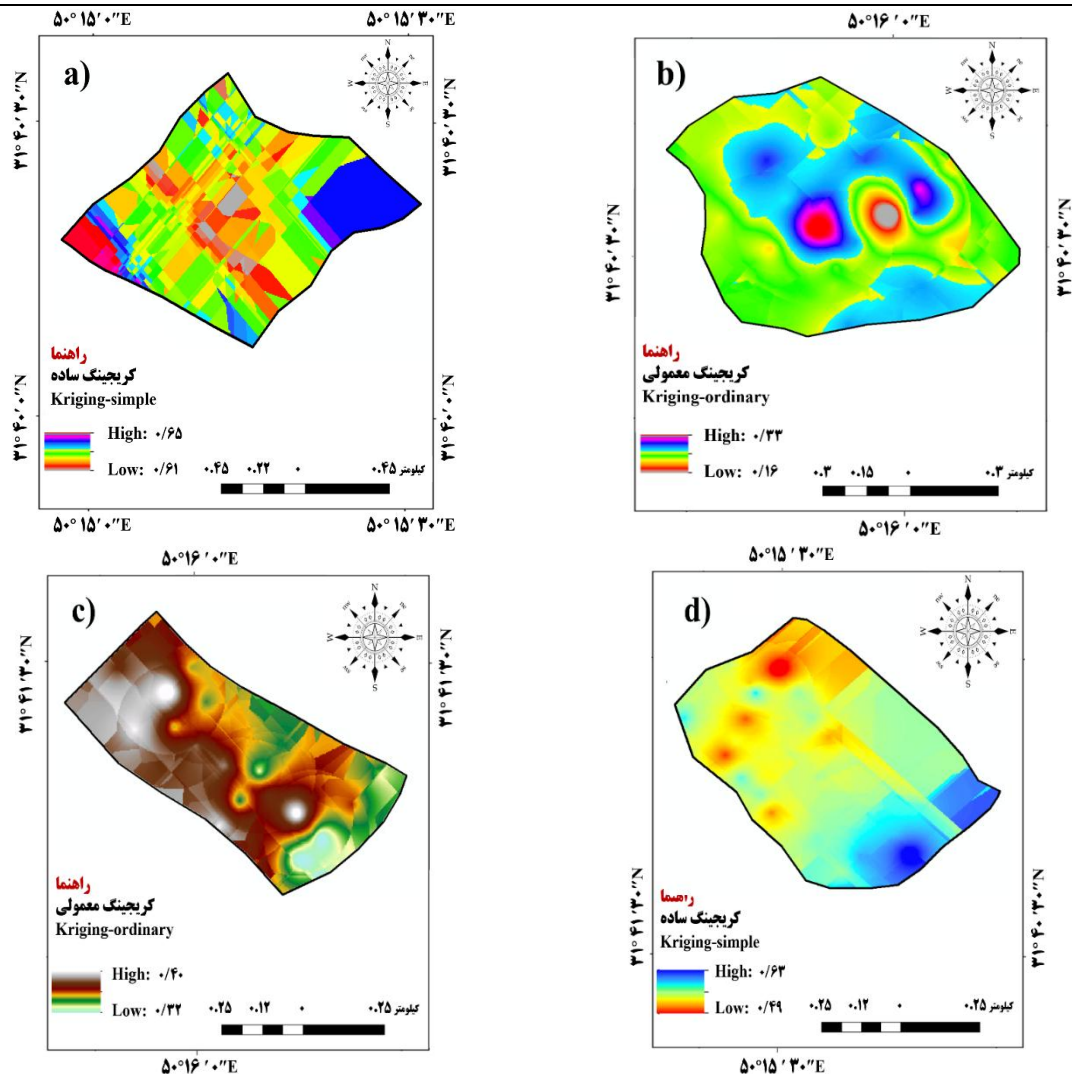


شکل ۴- واریوگرام برازش شده برای شاخص کیفیت خاک در کاربری جنگل (a)، آیش زراعت (b)، رهاسازی کوتاه‌مدت (c) و رهاسازی بلندمدت (d)

نتایج ارزیابی دقت روش‌های مورد بررسی (جدول ۱)، نشان داد که برای شاخص کیفیت خاک در کاربری جنگل ($RMSE=0/97$) و رهاسازی بلندمدت ($RMSE=1/01$) کریجینگ ساده با پایین‌ترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و در رهاسازی کوتاه‌مدت ($RMSE=1/18$) و آیش زراعت ($RMSE=1/57$) کریجینگ معمولی با پایین‌ترین میزان $RMSE$ بهترین روش برای درون‌یابی در این پژوهش می‌باشند. در نهایت با استفاده از کریجینگ معمولی و کریجینگ ساده در این تحقیق نقشه توزیع کیفیت خاک تهیه گردید (شکل ۵).

جدول ۱- نتایج صحت‌سنجی سرتاسری برای روش‌های مختلف درون‌یابی در کاربری جنگل، رهاسازی بلندمدت، رهاسازی کوتاه‌مدت و آیش زراعت

کاربری	Model مدل	مربع میانگین ریشه خطا برآورد (RMS)	معدل خطا استاندارد، خطای برآورد (ASE)	میانگین استاندارد شده خطا برآورد (MSE)	میانگین مربع ریشه خطا برآورد استاندارد (RMSE)
جنگل	کریجینگ معمولی	۰/۹۳	۱/۱	۰/۱۷	۱/۳۱
	کریجینگ ساده	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۹۷
	کریجینگ عام	۱/۰۴	۰/۷۹	۰/۱۳	۱/۲۹
رهاسازی بلندمدت (۲۵ سال)	کریجینگ معمولی	۱/۱۲	۰/۹۶	۰/۲۰	۱/۶۰
	کریجینگ ساده	۰/۳۰	۰/۲۳	۰/۱۱	۱/۰۱
	کریجینگ عام	۱/۰۹	۰/۷۹	۰/۱۸	۱/۵۷
رهاسازی کوتاه مدت (۱۰ سال)	کریجینگ معمولی	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۲۹	۱/۱۸
	کریجینگ ساده	۰/۳۳	۰/۶۵	۰/۳۷	۲/۴۱
	کریجینگ عام	۰/۵۷	۰/۷۱	۰/۳۳	۱/۲۹
آیش زراعت (۳-۴ سال)	کریجینگ معمولی	۱/۰۵	۰/۸۳	۰/۴۵	۱/۵۷
	کریجینگ ساده	۱/۱۳	۱/۵۸	۰/۶۷	۳/۴۰
	کریجینگ عام	۱/۰۹	۱/۳۳	۰/۶۱	۲/۶۹



شکل ۵- نقشه توزیع شاخص کیفیت خاک به روش کریجینگ در کاربری جنگل (a)، آیش زراعت (b)، رهاسازی کوتاه‌مدت (c) و رهاسازی بلندمدت (d)

بحث و نتیجه گیری

نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که ویژگی‌هایی نظیر پتاسیم، فسفر، کربن آلی و تخلخل دارای همبستگی مثبت قوی با شاخص کیفیت خاک هستند، در حالی که شن، چگالی ظاهری و هدایت الکتریکی رابطه منفی با آن دارند. این روابط علمی را می‌توان با عملکرد فیزیولوژیکی و محیط‌زیستی این ویژگی‌ها در خاک توضیح داد. برای مثال، پتاسیم و فسفر از عناصر غذایی اصلی برای رشد گیاه هستند و حضور آن‌ها در خاک به صورت مستقیم با افزایش حاصلخیزی و کیفیت خاک مرتبط است. همچنین، کربن آلی به عنوان شاخصی از فعالیت زیستی و ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی در خاک شناخته می‌شود که نقش مهمی در بهبود سلامت خاک ایفا می‌کند (Vasu *et al.*, 2024; Emami *et al.*, 2024). از سوی دیگر، تخلخل خاک با فراهم‌سازی فضا برای تبادل گازها، نفوذ آب و گسترش ریشه‌ها به ارتقاء کیفیت فیزیکی خاک کمک می‌کند و به همین دلیل با شاخص کیفیت خاک همبستگی مثبت دارد (Choudhury & Mandal, 2021). در مقابل، چگالی ظاهری بالا به معنی فشردگی خاک است که باعث کاهش تخلخل و محدودیت در رشد ریشه و تهویه می‌شود و کیفیت خاک را کاهش می‌دهد (Vasu *et al.*, 2016; Mukherjee & Lal, 2014). هدایت الکتریکی بالا نیز معمولاً به تجمع نمک‌ها در خاک اشاره دارد که می‌تواند رشد گیاه را مختل کرده و کیفیت خاک را پایین بیاورد (Triantafyllidis *et al.*, 2019). در مورد شن، به دلیل اینکه ذرات شن ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی پایینی دارند و باعث زهکشی سریع می‌شوند، افزایش میزان شن در خاک معمولاً با کاهش کیفیت کلی خاک همراه است (Shoumik *et al.*, 2024). سیلت نیز به دلیل موقعیت بینابینی خود از نظر اندازه ذرات، اثر نسبتاً خنثی یا ضعیفی بر شاخص کیفیت خاک می‌گذارد. نه مانند رس ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی دارد و نه مانند شن موجب زهکشی مؤثر می‌شود (Turgut *et al.*, 2021).

بررسی اثر کاربری و مدت زمان رهاسازی زمین بر کیفیت خاک نیز نشان داد که این عوامل بر شاخص کیفیت خاک اثر معنی‌داری وجود داشته‌اند. بالاترین مقدار شاخص کیفیت خاک در توده جنگلی مشاهده شد. این نتیجه می‌تواند به دلیل پایداری اکوسیستم، تراکم و تنوع بیشتر پوشش گیاهی و میزان بالاتر مواد آلی و فعالیت زیستی باشد (Raiesi & Salek-Gilani, 2020). پوشش گیاهی متراکم در جنگل‌ها موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند پایداری خاکدانه‌ها، ظرفیت نگهداری آب و تهویه مناسب می‌شود که همه این عوامل به بهبود کیفیت خاک منجر می‌شوند (Marzaioli *et al.*, 2010). در مقابل، رهاسازی زمین‌های کشاورزی اگرچه منجر به برخی تغییرات شرایط خاک در طول زمان می‌شود، اما این بهبود تدریجی وابسته به مدت زمان رهاسازی است (Lasanta *et al.*, 2020). در سال‌های ابتدایی رهاسازی خاک هنوز از نظر ساختاری ناپایدار است و کمبود مواد آلی و فعالیت‌های زیستی قابل انتظار است که این عوامل موجب تقلیل شاخص کیفیت خاک می‌شود (Toková *et al.*, 2022). سال‌های اولیه پس از رهاسازی، به عنوان مرحله انتقالی بین کاربری کشاورزی و بازسازی طبیعی در نظر گرفته می‌شود که در این دوره هنوز خاک از تخریب‌های گذشته رنج می‌برد. با گذشت زمان بیشتر (رهاسازی‌های بلندمدت) مثلاً بیش از دو دهه، شرایط خاک در مسیر بهبود قابل توجه قرار می‌گیرد، زیرا پوشش گیاهی طبیعی تثبیت شده و تجمع مواد آلی افزایش یافته است (Raiesi & Salek-Gilani, 2020). بعلاوه فعالیت‌های آنزیمی و میکروبی خاک که به تجزیه مواد آلی و بهبود چرخه عناصر غذایی خاک کمک می‌کنند، در طول زمان افزایش می‌یابند (Lichner *et al.*, 2023).

مطالعات نشان داده‌اند که نوع پوشش گیاهی پس از رهاسازی نیز در بهبود کیفیت خاک نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. به طور خاص، بازسازی با گونه‌های درختی نسبت به گونه‌های علفی به بهبود بیشتر کیفیت خاک منجر می‌شود، زیرا درختان دارای سیستم ریشه‌ای عمیق‌تر و پایداری هستند که به حفظ ساختار خاک و افزایش ذخیره کربن کمک می‌کنند (Sciubba *et al.*, 2021). این یافته با پژوهش‌هایی در منطقه مدیترانه نیز همخوانی دارد که نشان دادند، بیشترین افزایش در کربن آلی و نیتروژن خاک در مناطقی اتفاق افتاد که پس از رهاسازی، توسط درختچه‌ها یا جنگل‌های بومی اشغال شدند (Gabarron-Galeote *et al.*, 2015). در مواردی مشخص شده که کیفیت خاک در زمین‌های رها شده حتی از خاک‌های تحت مدیریت ضعیف کشاورزی بالاتر بوده است. به‌طوری‌که در مطالعه‌ای در چین، زمین‌های رها شده و تبدیل شده به پوشش طبیعی نسبت به زمین‌های کشاورزی تحت کشت، سطح بالاتری از کربن آلی، نیتروژن و فعالیت آنزیمی نشان دادند (Adingo *et al.*, 2021). این موضوع اهمیت مدیریت مناسب در بازسازی اکولوژیکی را برجسته می‌کند، چراکه استقرار و توسعه گونه‌های

با پوشش بیشتر و پایداری بیشتر مانند گونه‌های بوته‌ای، درختچه‌ای و درختی، به همراه مدت زمان مناسب رهاسازی، اثر قابل توجهی بر افزایش کیفیت خاک دارد.

نکته مهم دیگر این است که برخی خصوصیات خاک نظیر نفوذپذیری، هدایت هیدرولیکی و اسیدیته ممکن است در دوره‌های اولیه رهاسازی کاهش یابند، اما با تثبیت پوشش گیاهی، مجدداً بهبود پیدا می‌کنند (Toková *et al.*, 2022). این تغییرات نشان می‌دهند که فرآیند بازسازی خاک یک مسیر غیرخطی و پیچیده دارد و بسته به شرایط اقلیمی، نوع خاک و پوشش گیاهی، ممکن است الگوهای متفاوتی را دنبال کند. در مجموع می‌توان بیان کرد که جنگل طبیعی به دلیل ساختار اکوسیستمی پایدار در صورت کاهش دخالت انسانی، کیفیت خاک بالایی دارند که می‌تواند تضمین کننده عملکرد بالای آن باشد. زمین‌هایی که به‌تازگی رها شده‌اند، کیفیت خاک بسیار پایین‌تری دارند و دوره‌ای بین ۲۰ تا ۳۰ سال یا بیشتر نیاز است تا بتوانند به سطح مطلوبی از کیفیت خاک برسند.

نتایج حاصل از واریوگرام‌های برازش‌شده در نرم‌افزار GS+ برای شاخص کیفیت خاک نشان داد که مدل‌های مختلف برازش (کروی، نمایی، خطی و گوسین) بسته به نوع کاربری زمین و مدت زمان رهاسازی، عملکرد متفاوتی دارند. در کاربری جنگل، مدل خطی بهترین برازش را داشته، در حالی که برای رهاسازی بلندمدت و کوتاه‌مدت، مدل نمایی مناسب‌تر بوده و برای زمین‌های تازه رهاشده، مدل کروی بهترین انطباق را نشان داد. این تفاوت در نوع واریوگرام‌ها نمایانگر تفاوت در ساختار مکانی شاخص کیفیت خاک در انواع کاربری‌ها است. مدل خطی که در اراضی جنگلی بهترین تطابق را داشته، نشان‌دهنده نبود مرز مشخص در ساختار مکانی و روند تدریجی تغییرات در طول فاصله است. این رفتار معمولاً در خاک‌هایی مشاهده می‌شود که تغییرات یکنواخت و تدریجی در عوامل مؤثر بر کیفیت خاک مانند رطوبت، مواد آلی و فعالیت‌های زیستی دارند و فاقد نوسانات شدید مکانی هستند (Parvizi & Fatehi, 2024). این موضوع با طبیعت پایدار و توسعه یافته اکوسیستم جنگلی هم‌راستا است، جایی که دخالت انسانی کم و فرسایش فیزیکی و تغییرات شیمیایی کمتر است. در اراضی رها شده با مدت زمان بلند و کوتاه، مدل نمایی برازش بهتری داشته که نشان‌دهنده وجود ساختار مکانی منظم با وابستگی متوسط در فواصل کوتاه است، اما این وابستگی در فواصل دورتر کاهش می‌یابد. این الگو بیشتر در خاک‌هایی مشاهده می‌شود که به‌تازگی وارد مسیر احیا و بازسازی شده‌اند، جایی که پوشش گیاهی هنوز به ثبات نرسیده و عوامل مؤثر بر کیفیت خاک در حال تثبیت هستند (Azuka, 2020). در چنین شرایطی، تأثیر فعالیت‌های بیولوژیکی و فیزیکی هنوز پراکنده و ناپایدار است و مدل نمایی با در نظر گرفتن کاهش وابستگی در فواصل، به خوبی این وضعیت را منعکس می‌کند. در رهاسازی‌های اخیر (۳-۴ سال)، مدل کروی بهترین برازش را داشت که بیانگر وجود ساختار مکانی قوی در فاصله‌های مشخص و سپس کاهش ناگهانی آن است. این الگو معمولاً زمانی رخ می‌دهد که خاک دچار تغییرات موضعی شدید باشد و تأثیر عوامل انسانی مانند شخم، فشار مکانیکی یا تخریب سطحی هنوز در ساختار مکانی خاک غالب باشد (Imane *et al.*, 2022). در این مرحله، خاک هنوز دارای لکه‌بندی (patchiness) شدید است و فرآیند همگن‌سازی طبیعی آغاز نشده یا هنوز کامل نشده است. تغییر نوع مدل واریوگرام در طول دوره‌های مختلف رهاسازی نشان‌دهنده تحول تدریجی در ساختار مکانی خاک است. به‌طور کلی، تغییر از مدل کروی به نمایی و سپس خطی نشان دهنده تغییر تدریجی خاک از وضعیت ناپایدار و تخریب شده به سوی ثبات اکولوژیکی و همگنی مکانی است (Rosemary *et al.*, 2017). این یافته‌ها اهمیت تحلیل‌های ژئواستاتیکی و استفاده از واریوگرام‌ها را در بررسی و درک بهتر فرآیندهای بازسازی خاک به‌خوبی نشان می‌دهند. همچنین، نتایج ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی مختلف نشان داد که برای شاخص کیفیت خاک در کاربری جنگل و رهاسازی بلندمدت، کریجینگ ساده (Simple Kriging) عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشت، در حالی که در رهاسازی‌های کوتاه‌مدت و اخیر، کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging) دقت بالاتری ارائه داد. این نتایج بر اساس مقدار RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) حاصل شده‌اند که شاخصی استاندارد برای سنجش دقت پیش‌بینی‌ها در مدل‌های مکانی است. کریجینگ ساده در جنگل و رهاسازی بلندمدت عملکرد بهتری نشان داد، احتمالاً به این دلیل که در این کاربری‌ها، میانگین مقادیر شاخص کیفیت خاک در فضا ثابت یا نزدیک به مقدار کلی میانگین و واریانس ساختار مکانی نسبتاً منظم است. در اکوسیستم‌های جنگلی یا بازسازی‌شده در بلندمدت، تغییرات محلی نسبتاً کم و همگن هستند، بنابراین فرضیات آماری کریجینگ ساده، بهتر برآورده می‌شوند (Özkan *et al.*, 2023). در مقابل، در رهاسازی‌های کوتاه‌مدت یا بسیار اخیر که هنوز به تعادل اکولوژیکی نرسیده‌اند، تغییرات مکانی خاک شدیدتر و نامنظم‌تر است. در این شرایط، استفاده از کریجینگ

معمولی منطقی‌تر است، چون این روش میانگین داده‌ها را از خود مشاهدات محلی استخراج کرده و وابسته به فرض میانگین ثابت نیست. در مطالعه‌ای در مراکش، از کریجینگ معمولی برای برآورد شاخص کیفیت خاک استفاده شد و عملکرد موفق‌تری در مناطقی با پراکندگی مکانی نامنظم نشان داد (Sanad et al., 2024). مطالعات دیگر نیز نتایج مشابهی را نشان داده‌اند. به‌طور مثال، در بررسی‌ای که در چین انجام شد، کریجینگ معمولی دقت بهتری در مقایسه با روش‌های رگرسیون کریجینگ در مقیاس‌های درشت و داده‌های با تراکم کم ارائه داد (Li, 2010). با این حال، در صورت وجود داده‌های کمکی (مانند شاخص‌های پوشش گیاهی یا توپوگرافی)، روش‌هایی مانند رگرسیون کریجینگ (RK) یا کریجینگ وزنی جغرافیایی (GWRK) می‌توانند عملکرد بهتری ارائه دهند، به‌ویژه برای پارامترهایی مثل ماده آلی خاک (Yang et al., 2015). در مطالعه‌ای دیگر در ایران، مشخص شد که برای پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک، کریجینگ ساده و معمولی عملکرد مشابهی دارند، اما انتخاب بین آن‌ها باید با توجه به ساختار مکانی داده‌ها و همگنی منطقه صورت گیرد (Taghipour et al., 2022). به‌طور کلی، این نتایج اهمیت انتخاب روش مناسب درون‌یابی براساس ساختار مکانی و میزان همگنی مکانی داده‌ها را نشان می‌دهند. هرچه ساختار مکانی منظم‌تر و میانگین مشخص‌تر باشد، کریجینگ ساده ارجحیت دارد؛ اما در شرایط ناهمگن یا گذار (مانند رهاسازی‌های کوتاه‌مدت)، کریجینگ معمولی انتخاب بهتری است.

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع کاربری زمین و مدت زمان رهاسازی آن تأثیر معناداری بر شاخص کیفیت خاک (SQI) دارد ($p < 0.05$)، به‌طوری‌که جنگل‌های طبیعی با میانگین SQI معادل 0.63 ± 0.06 بالاترین کیفیت و اراضی آیش زراعی با 0.26 ± 0.06 پایین‌ترین مقدار را داشتند. همچنین، بررسی مدل‌های واریوگرام نشان داد که مدل کروی مناسب‌ترین گزینه برای اراضی تازه رهاسده، مدل نمایی برای رهاسازی‌های میان‌مدت و بلندمدت و مدل خطی برای جنگل طبیعی است. این تحول مدل‌ها بیانگر بهبود تدریجی ساختار مکانی و ثبات اکولوژیکی خاک در اثر افزایش زمان رهاسازی است. ارزیابی دقت درون‌یابی نیز نشان داد که در مناطق همگن مانند جنگل طبیعی و رهاسازی بلندمدت، کریجینگ ساده عملکرد بهتری دارد، درحالی‌که در اراضی با ساختار ناهمگن مانند آیش زراعت و رهاسازی کوتاه‌مدت، کریجینگ معمولی مناسب‌تر است. این یافته‌ها بر اهمیت زمان توالی در فرآیند بازسازی خاک و ضرورت انتخاب مدل درون‌یابی متناسب با وضعیت مکانی تأکید دارند و به‌روشنی به اهداف پژوهش پاسخ می‌دهند، چراکه نشان دادند نه تنها نوع کاربری و مدت زمان رهاسازی می‌توانند کیفیت خاک را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهند، بلکه تکنیک‌های زمین‌آمار مانند کریجینگ قادرند این تغییرات را با دقت بالا مدل‌سازی کنند و خلأ اطلاعات مکانی در ارزیابی سلامت خاک را جبران نمایند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود مدیران منابع طبیعی و سیاست‌گذاران، نقشه‌های شاخص کیفیت خاک را در برنامه‌ریزی‌های حفاظت، احیا و ارزیابی کاربری اراضی به‌کار گیرند. همچنین، توسعه سامانه‌های پایش بلندمدت، تلفیق داده‌های سنجش از دور با زمین‌آمار و بررسی توزیع عمقی شاخص‌های زیستی خاک می‌تواند مسیر مناسبی برای پژوهش‌های آتی باشد. از جمله محدودیت‌های این پژوهش، نبود داده‌های عمقی بلندمدت‌تر و تمرکز تنها بر لایه سطحی خاک بود که در مطالعات آینده می‌توان با گسترش بازه زمانی، تنوع اقلیمی و بررسی فرایندهای زیستی خاک، دقت و جامعیت ارزیابی را افزایش داد.

منابع

- جعفری، ا. و شجاعی‌فرد، ع.، ۱۴۰۰. ارزیابی توان اکولوژیک و ارائه راهبردهای معیشت پایدار در منطقه زاگرس با تأکید بر جنبه‌های حقوقی و محیط‌زیستی (مطالعه موردی: منطقه آبخیز دنا): نشریه علمی مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، جلد ۱۶، شماره ۴ (پیاپی ۵۷): صفحات ۹۵۰-۹۳۵.
- شعبانی، ا.، متین‌فر، ح. و آرخی، ص.، ۱۳۹۰. مدلسازی فاکتور فرساینده‌ی باران با استفاده از روش زمین‌آمار (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد ایلام). مجله GIS و سنجش از دور، جلد ۲، شماره ۲.
- Adingo, S., Yu, J. R., Xuelu, L., Jing, S., Li, X. and Xiaoning, Z., 2021. Land-use change influence soil quality parameters at an ecologically fragile area of YongDeng County of Gansu Province, China. PeerJ, 9, e12246. <https://doi.org/10.7717/peerj.12246>
- Ai, C., Zhang, S., Zhang, X., Guo, D., Zhou, W., & Huang, S. 2018. Distinct responses of soil bacterial and fungal communities to changes in fertilization regime and crop rotation. Geoderma, 319, 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.010>

- Akmal, K., 2023.** The Role of Geographic Information Systems (GIS) in Location-Based Decision Making. *Journal Informatic, Education and Management*, 5(1), 26–30. <https://doi.org/10.61992/jiem.v5i1.73>
- Azuka, C. V. and Igué, A. M., 2020.** Spatial variability of soil properties under different land uses in the Koupendri catchment, Benin. *Spanish Journal of Soil Science*, 10(1), 42–58. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2020.V10.N1.04>
- Beygi Heidarlou, H., Banj Shafiei, A., Erfanian, M., Tayyebi, A. and Alijanpour, A., 2021.** Land cover changes in Northern Zagros forests (Nw Iran) before and during implementation of energy policies. *Journal of Sustainable Forestry*, 40(3), 234–248.
- Carnicelli, S., Chelli, S., Cecchini, G., Ciampalini, R., Campetella, G. and Andreetta, A., 2025.** 30 Years of forest soil monitoring: Results from the Italian ICP-Forests network. *Forests*, 16(2), Article 231. <https://doi.org/10.3390/f16020231>
- Choudhury, B., & Mandal, S. 2021.** Indexing soil properties through constructing minimum datasets for soil quality assessment of surface and profile soils of intermontane valley (Barak, North East India). *Ecological Indicators*, 123, 107369. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107369>
- Corti, G., Urbinati, C., Cocco, S., Casucci, C., Toscano, G., Finco, A. and Vitali, A., 2020.** Forests and soils: Sustainable products and ecosystem services for human well-being. In *Forests*, 617–630. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33832-9_39
- Dindaroğlu, T., 2014.** The use of the GIS Kriging technique to determine the spatial changes of natural radionuclide concentrations in soil and forest cover. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, 1–11.
- Emami, N., Chavoshi, E., Ayoubi, S., Honarjoo, N., & Zeraatpisheh, M. 2024.** Comprehensive assessment of soil quality in various land uses: a comparative analysis of soil quality index models. *Environmental Earth Sciences*. 83(17). DOI:10.1007/s12665-024-11789-7
- Gabarron-Galeote, M. A., Trigalet, S. and Wesemael, B., 2015.** Effect of land abandonment on soil organic carbon fractions along a Mediterranean precipitation gradient. *Geoderma*, 249, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.007>
- Ghaisvandi, A., 2013.** GIS in natural studies. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (Sepehr)*, 22(85), 98–101. doi:20.1001.1.25883860.1392.22.851.14.3
- Hajabbasi, M., Jalalian, A. and Karimzadeh, H., 2004.** Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. *Plant and Soil*, 190(2), 301–308. <https://doi.org/10.1023/A:1004243702208>
- Heidarlou, H.B., Shafiei, A.B., Erfanian, M., Tayyebi, A. and Alijanpour, A., 2019.** Effects of preservation policy on land use changes in Iranian Northern Zagros forests. *Land Use Policy*, 81, 76–90.
- Heydari, M., Rostamy, A., Najafi, F. and Dey, D.C., 2017.** Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests in Iran. *Journal of Forestry Research*, 28, 95–104.
- Huang, L., Zhao, P. and Wang, R., 2023.** Variogram modeling and kriging interpolation for soil characteristics in forested landscapes. *Geoderma*, 432, 117214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.117214>
- Imane, H., Benslama, M., Benbrahim, F., Kraïmat, M., Chikhi, F. and Darem, S., 2022.** Spatial variability of soil properties in palm groves of the Central Algerian Sahara (Case of Zelfana). *Al-Qadisiyah Journal for Agriculture Sciences*. <https://doi.org/10.33794/qjas.2022.132994.1028>
- Jagadesh, M., Selvi, D., & Thiyageshwari, S. 2024.** Exploring the impact of land use change on soil quality under different ecosystems – a case study in the Nilgiri Hill region of Western Ghats global biodiversity hotspot. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04958-y>
- Khan, M., Almazah, M.M.A., Elahi, A., Niaz, R., Al-Rezami, A.Y. and Zaman, B., 2023.** Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary Kriging and Universal Kriging. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), p.2190853. <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2190853>
- Kosanin, O., Markić, Z. G., Ljubičić, J. and Nešić, M., 2023.** The importance of forests in the environment. <https://doi.org/10.7251/oru2309579k>
- Lasanta, T., Sánchez-Navarrete, P., Medrano-Moreno, L. M., Khorchani, M. and Nadal-Romero, E., 2020.** Soil quality and soil organic carbon storage in abandoned agricultural lands: Effects of revegetation processes in a Mediterranean mid-mountain area. *Land Degradation & Development*, 31(20), 2830–2845. <https://doi.org/10.1002/ldr.3655>
- Laun, S., Rösch, N., Breunig, M. and Doori, M.A., 2016.** Implementation of kriging methods in mobile GIS to estimate damage to buildings in crisis scenarios. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 211–216. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b2-211-2016>
- Leul, Y., Assen, M. A., Damene, S., & Legass, A. 2023.** Effects of land use types on soil quality dynamics in a tropical sub-humid ecosystem, western Ethiopia. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110024>

- Li, Y., 2010. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information. *Geoderma*, 159, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.06.017>
- Lichner, L., Šurda, P., Toková, L., Hološ, S., Kollár, J. and Igaz, D., 2023. Impact of duration of land abandonment on soil properties. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71(2), 148–155. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0011>
- Marzaioli, R., D'Ascoli, R., Pascale, R. A. D. and Rutigliano, F. A., 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*, 44(3), 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.12.007>
- Mataji, A., Daliri, H.K., Babaie, S., Jafari, S. and Roshan, S.A., 2013. Flora diversity in burned forest areas in Dehdez, Iran. *Folia Forestalia Polonica. Series A. Forestry*, 55(1), 33–41. 10.2478/ffp-2013-0005
- Mohmmadi Samani, K., Pordel, N., Hosseini, V. and Shakeri, Z., 2018. Effect of land-use changes on chemical and physical properties of soil in western Iran (Zagros oak forests). *Journal of Forestry Research*, 31(2), 637–647. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0799-y>
- Montes, L., Rubio, J. L. and López, M. V., 2018. Spatial variability of soil properties using semivariogram models. *Catena*, 171, 259–270.
- Mukherjee, A., & Lal, R. 2014. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. *PLoS ONE*, 9.
- Oppong Sarkodie, V.Y., Vašát, R., Němeček, K., Šrámek, V., Fadrhonsová, V., Neudertová Hellebrandová, K., Borůvka, L. and Pavlů, L., 2024. Spatial distribution of forest soil base elements (Ca, Mg and K): a regression kriging prediction for Czechia. *Forests*, 15(7), p.1123.
- Özkan, B., Dengiz, O., Alaboz, P. and Kaya, N.S., 2023. A new hybrid approach to assessing soil quality using neutrosophic fuzzy-AHP and support vector machine algorithm in sub-humid ecosystem. *Journal of Mountain Science*, 20, 3186–3202. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7749-z>
- Parvizi, Y. and Fatehi, S., 2024. Modeling and digital mapping of soil quality indicators in different land uses (a case study: Ravansar-Sanjabi Plain, Kermanshah). *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2), p.184. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12349-z>
- Raiesi, F. and Salek-Gilani, S., 2020. Development of a soil quality index for characterizing effects of land-use changes on degradation and ecological restoration of rangeland soils in a semi-arid ecosystem. *Land Degradation & Development*, 31, 1533–1544. <https://doi.org/10.1002/ldr.3553>
- Raiesi, F., & Salek-Gilani, S. 2020. Development of a soil quality index for characterizing effects of land-use changes on degradation and ecological restoration of rangeland soils in a semi-arid ecosystem. *Land Degradation & Development*, 31, 1533–1544. <https://doi.org/10.1002/ldr.3553>
- Ramachandra, T.V., Negi, P., Mondal, T. and Ahmed, S.A., 2025. Insights into the linkages of forest structure dynamics with ecosystem services. *Scientific Reports*, 15(1), p.15606.
- Rasouli-Sadaghiani, M., Barin, M., Moghaddam, S. S., Damalas, C., & Ghodrati, K. 2018. Soil quality of an Iranian forest ecosystem after conversion to various types of land use. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(9), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6815-z>
- Rebholz, B. and Almekkawy, M., 2020. Efficacy of Kriging interpolation in ultrasound imaging: Subsample displacement estimation. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 2020*, 2137–2141. <https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9175457>
- Rosemary, F., Vitharana, U., Indraratne, S., Weerasooriya, R. and Mishra, U., 2017. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. *Catena* 150, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.017>
- Sagheb Talebi, K., Sajedi, T. and Pourhashemi, M., 2014. *Forests of Iran: a treasure from the past, a hope for the future* (No. 15325). Springer Netherlands.
- Sanad, H., Moussadek, R., Mouhir, L., Ouelid Lhaj, M., Dakak, H., El Azhari, H., Yachou, H., Ghanimi, A. and Zouahri, A., 2024. Assessment of soil spatial variability in agricultural ecosystems using multivariate analysis, soil quality index (SQI), and geostatistical approach: a case study of the Mnasra region, Gharb Plain, Morocco. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061112>
- Sciubba, L., Mazzon, M., Cavani, L., Baldi, E., Toselli, M., Ciavatta, C. and Marzadori, C., 2021. Soil response to agricultural land abandonment: a case study of a vineyard in Northern Italy. *Agronomy* 11(9), p.1841. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091841>
- Shao, G., Ai, J., Sun, Q., Hou, L. and Dong, Y., 2020. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China. *Ecological Indicators* 115, 106439. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106439>
- Shiravand, H. and Hosseini, S.A., 2020. A new evaluation of the influence of climate change on Zagros oak forest dieback in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 141, 685–697.

- Shoumik, B. A. A., Błońska, E., & Lasota, J. 2024.** Soil Quality Index According to Diverse Land Use Systems Across the Europe. *Land Degradation & Development*. 36(5). 1467-1482. <https://doi.org/10.1002/ldr.5438>
- Stateczny, A. and Włodarczyk-Sielicka, M., 2012.** Test results of bathymetric data processing obtained by swath sounder GS+. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej* 53(4), 105–118.
- Taghipour, K., Heydari, M., Kooch, Y., Fathizad, H., Heung, B. and Taghizadeh-Mehrjardi, R., 2022.** Assessing changes in soil quality between protected and degraded forests using digital soil mapping for semiarid oak forests, Iran. *Catena* 213, p.106204. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106204>
- Toková, L., Hološ, S., Šurda, P., Kollár, J. and Lichner, Ľ., 2022.** Impact of duration of land abandonment on infiltration and surface runoff in acidic sandy soil. *Agriculture* 12(2), p.168. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020168>
- Triantafyllidis, V., Kontogeorgos, A., Kosma, C., & Patakas, A. 2019.** An Assessment of the Soil Quality Index in a Mediterranean Agro Ecosystem. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. vol. 30, no. 12, Jan. 2019, pp. 1042-50, <https://doi.org/10.9755/ejfa.2018.v30.i12.1886>
- Turgut, B., Ateş, M., & Akıncı, H. 2021.** Determining the Soil Quality Index in the Batumi Delta, Georgia. *Agrociencia*, 55, 1–18.
- Vasu, D., Singh, S., Ray, S., Duraisami, V. P., Tiwary, P., Chandran, P., Nimkar, A. M., & Anantwar, S. G. 2016.** Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma*, 282, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>
- Vasu, D., Tiwary, P., & Chandran, P. 2024.** A novel and comprehensive soil quality index integrating soil morphological, physical, chemical, and biological properties. *Soil and Tillage Research*. 244. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106246>
- Wilpert, K., 2022.** Forest soils—What's their peculiarity? *Soil Systems* 6(1), Article 5. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6010005>
- Yang, K., Diao, M., Zhu, J., Lu, D. and Zhang, W., 2022.** A global meta-analysis of indicators for assessing forest soil quality through comparison between paired plantations versus natural forests. *Land Degradation & Development* 33(15), 3603–3616. <https://doi.org/10.1002/ldr.4411>
- Yang, S., Zhang, H., Guo, L. and Ren, Y., 2015.** Spatial interpolation of soil organic matter using regression kriging and geographically weighted regression kriging. *Journal of Applied Ecology* 26(6), 1649–1656.
- Zarafshar, M., Bazot, S., Matinzadeh, M., Bordbar, S.K., Rousta, M.J., Kooch, Y. and Negahdarsaber, M., 2020.** Do tree plantations or cultivated fields have the same ability to maintain soil quality as natural forests? *Applied Soil Ecology* 151, 103536. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103536>

Analysis of the effect of land use change and release duration on soil quality index with geostatistics in the southern Zagros forests, Deh Sheikh watershed

Mehdi Heydari^{1*}
Sina Attarroshan²
Nargees Pordel¹

1. Department of forest sciences,
College of Agriculture, Ilam
University, Ilam, Iran.

2. Department of Environment, Ahvaz
Branch, Islamic Azad University,
Ahvaz, Iran.

*Corresponding author:
m.heidari@ilam.ac.ir

Received date: May/23/2025
Reception date: July/09/2025

Abstract

Land use change is one of the main factors in reducing soil quality and destroying ecosystems. Forests play an important role in environmental sustainability by creating suitable biological conditions, but their conversion to other uses disrupts soil structure and function. Therefore, this study aimed to investigate the effect of land use type and release duration on soil quality index (SQI) and analyze its spatial pattern using advanced kriging methods in the forests of the Southern Zagros. This study was conducted in the forests of the Southern Zagros (Dezpart County, Khuzestan Province). For this purpose, four forest types including 3, 10, and 25-year-old abandoned lands and control forests were selected and soil sampling was conducted from a total of 96 plots. Soil quality index (IQI) was calculated using the cumulative weighting method. Then, in order to perform spatial analysis and prepare soil quality maps, variogram modeling and selection of the best model were performed using GS+ software. Subsequently, data interpolation was performed using different kriging methods (ordinary, general, and simple) in the GIS environment. The results showed that the soil quality index was significantly affected by land use type ($p < 0.05$), with the highest value observed in natural forest (0.63 ± 0.006) and the lowest in fallow land (0.26 ± 0.006). Among the variogram models, the linear model for forest, exponential for long-term and short-term releases, and spherical model for agricultural fallow (3-year release) were the most appropriate. Also, in evaluating the interpolation accuracy, simple kriging for forest (RMSE=0.97) and long-term release (RMSE=1.01), and ordinary kriging for short-term release (RMSE=1.18) and agricultural fallow (RMSE=1.57) performed best. In general, the results showed that land use change and release period are effective on soil quality, and by variogram modeling and the use of kriging, the spatial pattern of the soil quality index can be analyzed with appropriate accuracy; these results can be useful for natural resource managers in monitoring soil changes and planning forest restoration.

Keywords: Land-use change, Soil quality, Spatial interpolation, Kriging, Variogram modeling