



University of Tehran

Analysis of soil property spatial patterns in Zagros oak forests using geostatistical and kriging models

Mohammad Abbasi¹ | Jaafar Hosseinzadeh^{2*} | Mehdi Heydari³ |
Masoud Bazgir⁴ | Nargess Pordel⁵

1. Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. Email: m.abbasi3966@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. Email: j.hosseinzadeh@ilam.ac.ir
3. Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. Email: m_heydari23@ilam.ac.ir
4. Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. Email: masoud.bazgir@ilam.ac.ir
5. Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. Email: nargess.po@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 13 April 2025
Revised: 30 April 2025
Accepted: 23 May 2025
Published online: 17 June 2025

Keywords:
*Interpolation,
Modeling,
Soil,
Variogram.*

ABSTRACT

Soil property assessment is vital for sustainable forest management, especially in the heterogeneous and mountainous Zagros forests. This study aimed to model and analyze the spatial distribution of soil properties using kriging methods within a Geographic Information System (GIS) environment. The research was conducted in the Manesht and Ghalarange forests in northeastern Ilam. Soil samples (0–20 cm depth) were collected across two forest types (seedling and coppice) and two canopy covers (open and dense). Spatial modeling was carried out using ordinary, simple, and universal kriging, and the best variogram models were selected using GS+ software. Model accuracy was evaluated using root mean square error (RMSE). Results showed that the highest bulk density (1.61) and lowest moisture (44.69%) occurred in seedling stands with open canopy, while the highest electrical conductivity (0.26) and organic matter (7.16) were in seedling stands with dense canopy. Most soil properties followed a spherical variogram model, while clay and organic matter fit better with an exponential model. Ordinary kriging provided the lowest RMSE for most variables, including sand, silt, pH, EC, bulk density, and moisture. In contrast, simple kriging was more accurate for clay (0.98) and organic matter (0.99). The study confirms the significant effects of forest type and canopy cover on soil properties and highlights the value of kriging-based interpolation for producing detailed soil maps. These findings support informed decision-making for resource management and sustainable forest planning in the Zagros region.

Cite this article: Abbasi, M., Hosseinzadeh, J., Heydari, M., Bazgir, M., Pordel, N. (2025). Analysis of soil property spatial patterns in Zagros oak forests using geostatistical and kriging models. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (1), 89-104. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.393126.1345>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.393126.1345>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: <https://jfw.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

تحلیل الگوهای مکانی ویژگی‌های خاک در جنگل‌های بلوط زاگرس با استفاده از مدل‌های زمین‌آماري و کریجینگ

محمد عباسی^۱ | جعفر حسین‌زاده^{۲*} | مهدی حیدری^۳ | مسعود بازگیر^۴ | نرگس پردل^۵

۱. گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: m.abbasi3966@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: j.hoseinzadeh@ilam.ac.ir

۳. گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: m_heydari23@ilam.ac.ir

۴. گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: masoud.bazgir@ilam.ac.ir

۵. گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: nargess.po@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

ناهمگنی خاک و وضعیت کوهستانی جنگل‌های زاگرس، تحلیل این جنگل‌ها را به روش‌های دقیق‌تر و پیشرفته‌تری نیازمند کرده است. بر این اساس، هدف این پژوهش، مدل‌سازی و تحلیل الگوی پراکنش مکانی خصوصیات خاک با بهره‌گیری از روش‌های کریجینگ در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در جنگل‌های مانشت و قلا رنگ (واقع در شمال شرقی ایلام) بود. نمونه‌برداری از دو فرم رویشی دانه‌زاد و شاخه‌زاد و دو نوع تاج‌پوشش جنگلی تنک و متراکم و در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری خاک صورت گرفت. مدل‌سازی مکانی داده‌ها با روش‌های کریجینگ (عام، معمولی و ساده) انجام و مدل بهینه واریوگرام با نرم‌افزار GS+ تعیین شد. دقت مدل‌ها با خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) ارزیابی شد. بیشترین میزان وزن مخصوص ظاهری (۱/۶۱) در دانه‌زاد با تاج تنک، بیشترین میزان هدایت الکتریکی (۰/۲۶) در دانه‌زاد با تاج متراکم و کمترین میزان رطوبت (۴۴/۶۹) نیز در دانه‌زاد با تاج تنک مشاهده شد. بیشترین مقدار ماده آلی در توده دانه‌زاد با تاج متراکم (۷/۱۶) و کمترین میزان آن در توده شاخه‌زاد با تاج تنک (۶/۸۴) اندازه‌گیری شد. نتایج واریوگرام‌های برازش شده نشان داد که بیشتر ویژگی‌های خاک با مدل کروی و رس و ماده آلی با مدل نمایی انطباق بیشتری داشتند. ارزیابی دقت مدل‌ها نیز نشان داد که کریجینگ معمولی برای اکثر ویژگی‌های خاک، کمترین RMSE را دارد. در مقابل، کریجینگ ساده با کمترین RMSE برای رس (۰/۹۸) و ماده آلی (۰/۹۹) دقیق‌تر بود. این پژوهش تأثیر متفاوت نوع توده جنگلی و تاج‌پوشش بر خصوصیات خاک را تأیید کرد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

کلیدواژه:

خاک،

درون‌یابی،

مدل‌سازی،

واریوگرام.

استناد: عباسی؛ محمد، حسین‌زاده؛ جعفر، حیدری؛ مهدی، بازگیر؛ مسعود، پردل؛ نرگس (۱۴۰۴). تحلیل الگوهای مکانی ویژگی‌های خاک در جنگل‌های بلوط زاگرس با استفاده از مدل‌های زمین‌آماري و کریجینگ. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۱)، ۸۹-۱۰۴. DOI: <https://10.22059/jfw.2025.393126.1345>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfw.2025.393126.1345>



۱. مقدمه

خاک‌های جنگلی نقشی اساسی در پایداری اکوسیستم‌های جنگلی ایفا می‌کنند و از طریق حفظ تنوع زیستی، تنظیم چرخه‌های آب و عناصر غذایی و پشتیبانی از فرآیندهای محیط زیستی، به پایداری جنگل‌ها کمک می‌کنند [۵، ۵۲]. ارزیابی دقیق ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک برای مدیریت بهینه و پایدار جنگل‌ها ضروری است، زیرا این پارامترها می‌توانند شاخص‌های کلیدی بهره‌وری بوم‌سازگان باشند [۴۷]. ساختار و پویایی توده‌های جنگلی، تأثیرات قابل توجهی بر خصوصیات خاک دارند و تغییرات در ترکیب و تراکم پوشش گیاهی می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اثرگذار باشد [۵، ۲۱]. تاج پوشش درختان به عنوان یک عنصر حیاتی در بوم‌سازگان جنگلی، باعث افزایش ماده آلی خاک، بهبود ساختار آن، تعدیل فعالیت‌های زیستی و حاصلخیزی خاک می‌شود [۱۳]. همچنین، تفاوت‌های ساختاری میان توده‌های رویشی دانه‌زاد و شاخه‌زاد موجب تغییراتی در سیستم ریشه‌ای آنها شده و این تفاوت‌ها می‌تواند بر خصوصیات خاک تأثیرگذار باشد [۵۰، ۵۳].

تغییرات خصوصیات خاک تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند نوع پوشش گیاهی، کاربری اراضی، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های زمین‌شناسی قرار دارد و این تغییرات در سطوح مختلفی از محیط، از جمله نواحی وسیع‌تری مانند جنگل‌ها تا مناطق خاص و محدودتر، مشاهده می‌شود [۲۰، ۳۲]. مطالعه و برآورد خصوصیات خاک در شرایط محیطی مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است، اما با توجه به محدودیت‌های موجود در نمونه‌برداری میدانی از جمله هزینه بالا و زمان‌بر بودن فرآیند جمع‌آوری داده‌ها، استفاده از روش‌های درون‌یابی مکانی، به‌ویژه تکنیک‌های زمین‌آمار می‌تواند راهکاری مناسب برای تخمین ویژگی‌های خاک باشد [۵۵]. در این میان، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل و مدیریت داده‌های مکانی مرتبط با خصوصیات خاک است. استفاده از GIS در مطالعات خاک به پژوهشگران امکان می‌دهد تا الگوهای مکانی را شناسایی کرده و تغییرات خصوصیات خاک را در مقیاس‌های مختلف ارزیابی کنند [۳۹]. در GIS، روش‌های مختلفی برای درون‌یابی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آنها روش کریجینگ است. روش کریجینگ با در نظر گرفتن ساختار مکانی و همبستگی داده‌ها، دقت بالایی در برآورد ویژگی‌های خاک نشان داده است [۱۶، ۴۱]. در روش کریجینگ، انتخاب مدل واریوگرام مناسب، اهمیت ویژه‌ای دارد و بسته به نوع متغیر مورد بررسی و شرایط محیطی منطقه، می‌تواند تأثیر مستقیمی بر دقت تخمین‌ها داشته باشد [۲۲]، زیرا مدل‌های مختلف واریوگرام مانند کرو، نمایی و گوسی، رفتار متفاوتی از تغییرات مکانی خصوصیات خاک را شبیه‌سازی می‌کنند [۳۴].

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه ارزیابی و پایش مدل‌های کریجینگ نشان می‌دهند که این روش در پیش‌بینی دقیق‌تر داده‌های محیطی در شرایط مختلف تأثیر چشمگیری دارد. به عنوان مثال، Mahmoodi و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای، به بررسی پراکنش مکانی ماده آلی خاک در دشت قروه با استفاده از شاخص‌های توپوگرافی و تکنیک شبکه عصبی مصنوعی-کریجینگ پرداختند. نتایج نشان داد که روش ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی-کریجینگ توانست ۸۹ درصد از تغییرات مکانی ماده آلی را نشان دهد [۳۳]. Nguyen و همکاران (۲۰۲۱) نیز در مطالعه‌ای نشان دادند که مدل‌های کریجینگ با واریوگرام نمایی دقت بالایی در پیش‌بینی ویژگی‌های شیمیایی خاک دارند [۳۶]. همچنین Gómez و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود تأیید کردند که روش کریجینگ در مقایسه با سایر تکنیک‌های درون‌یابی، دقت بیشتری در تحلیل تغییرات مکانی خصوصیات خاک دارد [۱۷].

به‌طور کلی، کاربرد روش‌های کریجینگ در مطالعه خاک‌های جنگلی، علاوه بر ارائه تخمین‌های دقیق‌تر، می‌تواند به بهبود برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی، حفاظت از منابع خاک و مدیریت پایدار جنگل‌ها کمک کند. با توجه به افزایش فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی، استفاده از این تکنیک‌ها می‌تواند نقش کلیدی در ارزیابی و حفاظت خاک‌های جنگلی ایفا کند [۸].

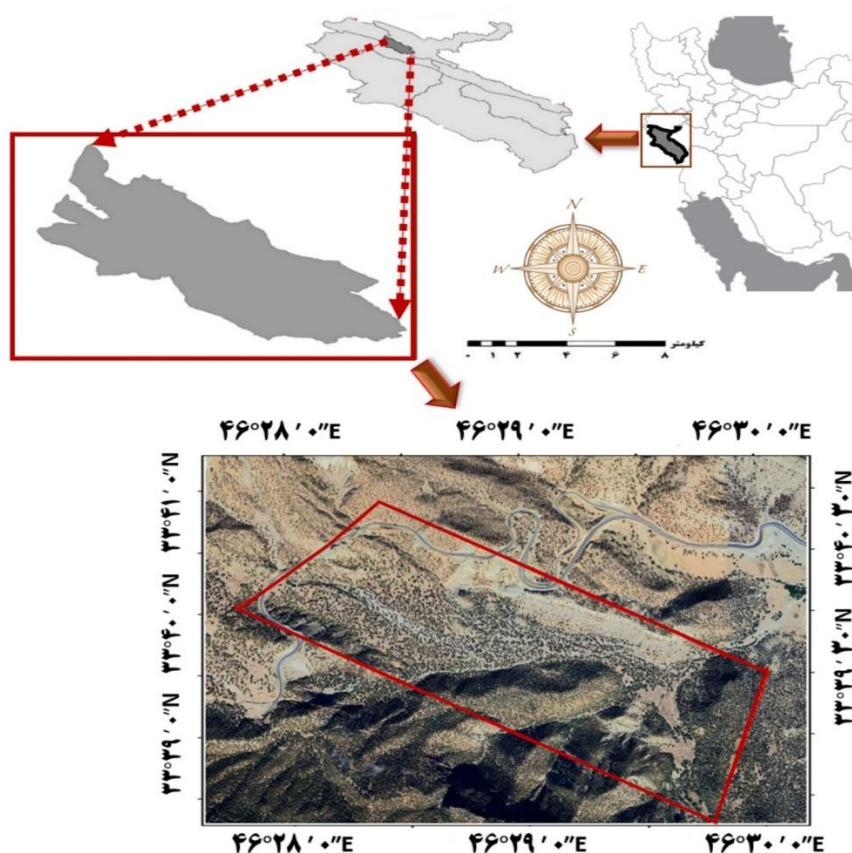
جنگل‌های زاگرس با وسعتی بالغ بر چند میلیون هکتار در نوار غربی ایران گسترده شده‌اند و به عنوان یکی از برجسته‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی کشور و منطقه شناخته می‌شوند [۳، ۲۵]. به دلیل شرایط جغرافیایی پیچیده، کوهستانی بودن و صعب‌العبور بودن این جنگل‌ها، بررسی کامل و میدانی تمامی بخش‌های آنها بسیار دشوار است. این ویژگی‌ها باعث شده است که روش‌های سنتی مطالعه خاک و پوشش گیاهی، در این جنگل‌ها ناکارآمد یا بسیار پرهزینه باشند [۱۵]. در این راستا، استفاده از فناوری‌های نوین مانند GIS و روش‌های درون‌یابی مانند کریجینگ، امکان بررسی تغییرات خصوصیات خاک و پوشش گیاهی را در مقیاس وسیع و با دقت بالا فراهم می‌کند [۴۰]. این فناوری‌ها به محققان اجازه می‌دهند تا بدون نیاز به بررسی میدانی تمامی نواحی، با

استفاده از داده‌های مکانی و مدل‌سازی‌های پیشرفته، اطلاعات دقیقی درباره وضعیت خاک، فرسایش و تغییرات محیط زیستی در جنگل‌ها به دست آورند [۱۶]. بنابراین، این تحقیق با هدف بررسی تأثیر نوع واریوگرام بر دقت پیش‌بینی روش‌های درون‌یابی ویژگی‌های خاک انجام شده است. همچنین، نقش ویژگی‌های مختلف خاک بر میزان دقت مدل‌های درون‌یابی مورد ارزیابی قرار گرفته است و در نهایت، عملکرد سه روش درون‌یابی شامل کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و کریجینگ عام در پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف خاک مقایسه شده است. بکارگیری این روش‌ها برای مدیریت پایدار و حفاظت از این بوم‌سازگان ارزشمند، به‌ویژه در برابر تهدیداتی مانند تغییرات اقلیمی و تخریب انسانی، ضروری است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه (با مساحت حوزه آبریز حدود ۱۱۵۰ هکتار و محدوده مورد مطالعه حدود ۴۰۰ هکتار) بخشی از جنگل‌های مانشت و قلارنگ در محدوده زاگرس است و در ۵ کیلومتری شمال شرقی شهر ایلام قرار دارد. این منطقه در محدوده طول جغرافیایی $31^{\circ} 46'$ تا $31^{\circ} 46'$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 33'$ تا $41^{\circ} 33'$ واقع شده است و متوسط ارتفاع آن از سطح دریا ۱۷۰۰ متر می‌باشد (شکل ۱). براساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌مدیترانه‌ای است. طبق داده‌های ۳۵ ساله ایستگاه هواشناسی ایلام (۱۹۸۶ تا ۲۰۲۱)، میانگین بارندگی سالانه این منطقه، ۵۹۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن، $16/7^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. خاک‌های غالب آن لیتوسول‌ها هستند؛ این خاک‌ها براساس طبقه‌بندی فائو دارای عمق کم، ظرفیت نگهداری آب و حاصلخیزی پایین هستند. منطقه مورد مطالعه بر روی چهار سازند زمین‌شناسی پابده، گورپی، پابده شیل و کوآترنر قرار گرفته است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و ایلام

۲-۲. روش نمونه‌برداری و اندازه‌گیری خصوصیات خاک

در این تحقیق، تهیه نقشه پراکنش مکانی خصوصیات خاک با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی (کریجینگ ساده، عام و معمولی) انجام شد. برای انتخاب توده‌های مورد مطالعه، از نقشه‌ها و اطلاعات موجود در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان ایلام و جنگل گردشی استفاده شد. محدوده‌هایی از جنگل‌های منطقه با ساختار دانه‌زاد و شاخه‌زاد شناسایی و انتخاب شد. براساس داده‌ها، تعداد کمتر از ۲۰۰ اصله درخت در هکتار (با میانگین ۱۴۴ اصله) به عنوان توده تنک و بیشتر از ۲۰۰ اصله درخت در هکتار (با میانگین ۳۱۳ اصله)، به عنوان توده متراکم در نظر گرفته شد. سپس با انجام بازدید میدانی، توده‌های جنگلی با شرایط فیزیوگرافی مشابه و تاج‌پوشش تنک و متراکم انتخاب شدند. برای نمونه‌برداری در هر کدام از توده‌های مورد بررسی (دانه‌زاد با تاج تنک، دانه‌زاد با تاج متراکم، شاخه‌زاد با تاج تنک و شاخه‌زاد با تاج متراکم)، ۱۲ قطعه نمونه با ابعاد ۲۰ در ۲۰ متر به صورت تصادفی پیاده شد. در هر قطعه نمونه سه نمونه خاک ترکیبی از عمق صفر تا ۲۰ سانتی متر به طور تصادفی برداشت شد و برای بررسی خصوصیات خاک به آزمایشگاه منتقل شد. ویژگی‌های خاک شامل رطوبت اشباع با استفاده از روش وزنی و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد [۴۵]، چگالی ظاهری به روش کلوخه و برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب [۲۳]، بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری، شوری (EC) با دستگاه هدایت سنج الکتریکی با نسبت ۱:۱ خاک و آب مقطر، اسیدیته (pH) به وسیله دستگاه pH متر و مخلوط ۱:۳ خاک و آب مقطر و ماده آلی با روش والکی-بلاک اندازه‌گیری شد.

۲-۲۳. تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌های خاک، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها با آزمون لون بررسی شد. سپس، تأثیر خصوصیات مرتبط با فرم رویشی، میزان تاج‌پوشش و تعامل آنها بر ویژگی‌های مختلف خاک از طریق مدل‌های خطی عمومی (GLM) بررسی شد. به منظور مقایسه میانگین گروه‌ها از آزمون دانکن استفاده شد. تمامی تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۳.۰، SPSS Inc، شیکاگو، IL) انجام شد.

به منظور مقایسه مدل‌های مختلف درون‌یابی، از ۷۰ درصد داده‌ها برای تحلیل همبستگی مکانی و از ۳۰ درصد باقیمانده برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده شد. جهت استخراج پارامترهای درون‌یابی، واریوگرام محاسبه گردید که شامل سه مؤلفه کلیدی است: Sill (حداکثر واریانس بین نقاط)، Range (حد فاصل همبستگی مکانی) و Nugget (واریانس در فواصل کوتاه ناشی از خطا یا تغییرات جزئی) [۴۶]. برای تعیین ضرایب کریجینگ، مدل‌های مختلف واریوگرام از جمله خطی، نمایی، گوسی و کروی بررسی شدند. هر مدل، ویژگی‌های خاصی در توزیع واریانس دارد و بسته به ساختار داده‌ها انتخاب می‌شود [۳۰]. انتخاب مدل بهینه با نرم‌افزار GS+ انجام شد که بهترین مدل را براساس کمترین مقدار RSS و بیشترین R^2 مشخص می‌کند [۴۹]. همچنین، بررسی توزیع داده‌ها و ارزیابی نرمال بودن آنها با این نرم‌افزار انجام شد [۱۹]. پس از تعیین مدل واریوگرام، روش‌های کریجینگ معمولی، عمومی و ساده برای درون‌یابی و تهیه نقشه خصوصیات خاک بکار رفتند. کریجینگ معمولی فرض می‌کند میانگین ثابت است و وزن‌های تخمین را براساس واریوگرام محاسبه می‌کند [۲۶]. کریجینگ عمومی، که میانگین را تابعی از مختصات می‌داند، برای داده‌های دارای روند فضایی مناسب است. کریجینگ ساده نیز یک روش تصادفی است که فرض می‌کند میانگین مشخص و بدون روند است [۴۲]. روش‌های کریجینگ به تحلیل نیم‌تغییرنا وابسته‌اند و بهترین مدل کمترین RMSE را دارد [۱۴]. در نهایت، ۳۰ درصد داده‌های باقی‌مانده برای اعتبارسنجی در GIS وارد و مقادیر تخمینی خصوصیات خاک استخراج شد. مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی در SPSS انجام شد تا دقت مدل ارزیابی و میزان تطابق نقشه با داده‌های واقعی بررسی شود [۱، ۲۶]. در نهایت، برای هر کدام از خصوصیات خاک، براساس روشی که کمترین RMSE را داشت، نقشه تهیه شد.

۳. یافته‌های پژوهش

نتایج تجزیه واریانس اثرات تاج‌پوشش و فرم رویشی بر خصوصیات خاک نشان داد که اثر تاج‌پوشش بر وزن مخصوص ظاهری، رطوبت اشباع، ماده آلی و EC معنی‌دار بود ($P < 0.05$) (جدول ۱). فرم رویشی نیز تنها بر میزان ماده آلی خاک تأثیر معنی‌داری داشت. اثر متقابل تاج‌پوشش $\times$ فرم توده تأثیر معنی‌داری نشان نداد.

جدول ۱. نتایج مدل‌های خطی عمومی (GLM) برای آزمون اثرات تاج‌پوشش و فرم رویشی بر خصوصیات خاک

خصوصیات خاک	سیلت (درصد)			شن (درصد)			رس (درصد)		
	MS	F-value	P-value	MS	F-value	P-value	MS	F-value	P-value
تاج‌پوشش	۰/۰۲۰	۰/۶۳۳	۰/۹۳۴	۰/۰۰۷	۰/۱۹۵	۰/۷۴۶	۰/۱۰۷	۱/۵۳	۰/۱۰۷
فرم توده	۰/۲۰۹	۶/۵۷	۰/۹۶۱	۰/۰۰۲	۰/۰۷۰	۰/۴۶۰	۰/۵۶۱	۸/۰۰	۰/۴۶۰
تاج‌پوشش × فرم توده	۰/۵۹۷	۱۸/۷۵	۰/۴۸۰	۰/۵۱۲	۱۴/۴۴	۰/۸۸۹	۰/۰۲۰	۰/۲۸	۰/۴۴۶
	اسیدیته			رطوبت (درصد)			وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)		
	MS	F-value	P-value	MS	F-value	P-value	MS	F-value	P-value
تاج‌پوشش	۰/۰۱۶	۱/۱۲۹	۰/۰۱۱	۷/۳۵۴	۲۲۲/۶۰	۰/۰۰۵	۹/۲۳۲	۰/۲۵	۰/۲۹۷
فرم توده	۰/۶۸۳	۵۹/۱۵	۰/۱۷۳	۱/۹۵۴	۵۹/۱۵۰	۰/۲۰۳	۱/۷۰۰	۰/۰۴	۰/۴۱۶
تاج‌پوشش × فرم توده	۰/۰۱۸	۱/۲۵۸	۰/۰۵۳	۴/۰۷۲	۱۲۳/۲۵	۰/۰۶۱	۳/۸۱۹	۰/۱۰	۰/۲۷۲
	ماده آلی (درصد)			هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)					
	MS	F-value	P-value	MS	F-value	P-value	MS	F-value	P-value
تاج‌پوشش	۱۵/۶۲۶	۰/۳۱۳	۰/۰۰۰	۴/۷۶۸	۰/۰۰۷	۰/۰۳۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰
فرم توده	۵/۷۷۳	۰/۱۱۶	۰/۰۲۳	۰/۰۰۴	۵/۲۸۵-۶	۰/۹۵۳	۰/۰۰۴	۵/۲۸۵-۶	۰/۰۲۳
تاج‌پوشش × فرم توده	۰/۴۰۶	۰/۰۰۸	۰/۵۲۹	۰/۱۵۹	۰/۰۰۳	۰/۱۵۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۵۲۹

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات خاک نشان داد که بیشترین میزان وزن مخصوص ظاهری (۱/۶۱) در دانه‌زاد با تاج تنک و بیشترین میزان هدایت الکتریکی (۰/۲۶) در دانه‌زاد با تاج متراکم مشاهده شد (جدول ۲). کمترین میزان رطوبت (۴۴/۶۹) نیز در دانه‌زاد با تاج تنک و بیشترین مقدار ماده آلی در توده دانه‌زاد با تاج متراکم (۷/۱۶) و کمترین میزان آن در توده شاخه‌زاد با تاج تنک (۶/۸۴) مشاهده شد (جدول ۲). از نظر میزان رس، شن، سیلت و اسیدیته اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.

جدول ۲. میانگین $\pm$ اشتباه معیار خصوصیات خاک تحت تأثیر فرم رویشی و تاج‌پوشش

فرم توده	تاج‌پوشش	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	رس (درصد)
دانه‌زاد	تنک	۱/۶۱ $\pm$ ۰/۰۶ a	۴۰/۵۶ $\pm$ ۱/۶۴ a	۴۶/۰۰ $\pm$ ۱/۳۴ a	۱۳/۴۳ $\pm$ ۱/۶۵ a
	متراکم	۱/۳۲ $\pm$ ۰/۰۵ b	۳۸/۷۵ $\pm$ ۲/۴۰ a	۴۷/۱۸ $\pm$ ۲/۴۴ a	۱۴/۰۶ $\pm$ ۱/۰۴ a
	تنک	۱/۴۲ $\pm$ ۰/۰۶ b	۳۸/۱۲ $\pm$ ۱/۲۵ a	۴۷/۲۵ $\pm$ ۱/۹۳ a	۱۴/۶۲ $\pm$ ۱/۲۲ a
شاخه‌زاد	متراکم	۱/۳۶ $\pm$ ۰/۰۴ b	۳۹/۳۷ $\pm$ ۲/۳۶ a	۴۵/۷۵ $\pm$ ۱/۳۴ a	۱۴/۸۷ $\pm$ ۱/۳۴ a
فرم توده	تاج‌پوشش	ماده آلی (%)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	رطوبت (درصد)	اسیدیته
دانه‌زاد	تنک	۶/۹۳ $\pm$ ۰/۰۷ bc	۰/۲۱ $\pm$ ۰/۰۱ b	۴۴/۶۹ $\pm$ ۱/۰۲ b	۶/۴۷ $\pm$ ۰/۰۴ a
	متراکم	۷/۱۶ $\pm$ ۰/۰۴ a	۰/۲۶ $\pm$ ۰/۰۲ a	۵۳/۸۹ $\pm$ ۲/۴۱ a	۶/۴۷ $\pm$ ۰/۰۳ a
	تنک	۶/۸۴ $\pm$ ۰/۰۳ c	۰/۲۳ $\pm$ ۰/۰۰۸ ab	۵۱/۳۳ $\pm$ ۱/۰۲ a	۶/۳۹ $\pm$ ۰/۰۶ a
شاخه‌زاد	متراکم	۷/۰۱ $\pm$ ۰/۰۴ b	۰/۲۴ $\pm$ ۰/۰۰۶ ab	۵۲/۶۸ $\pm$ ۱/۱۲ a	۶/۴۸ $\pm$ ۰/۰۲ a

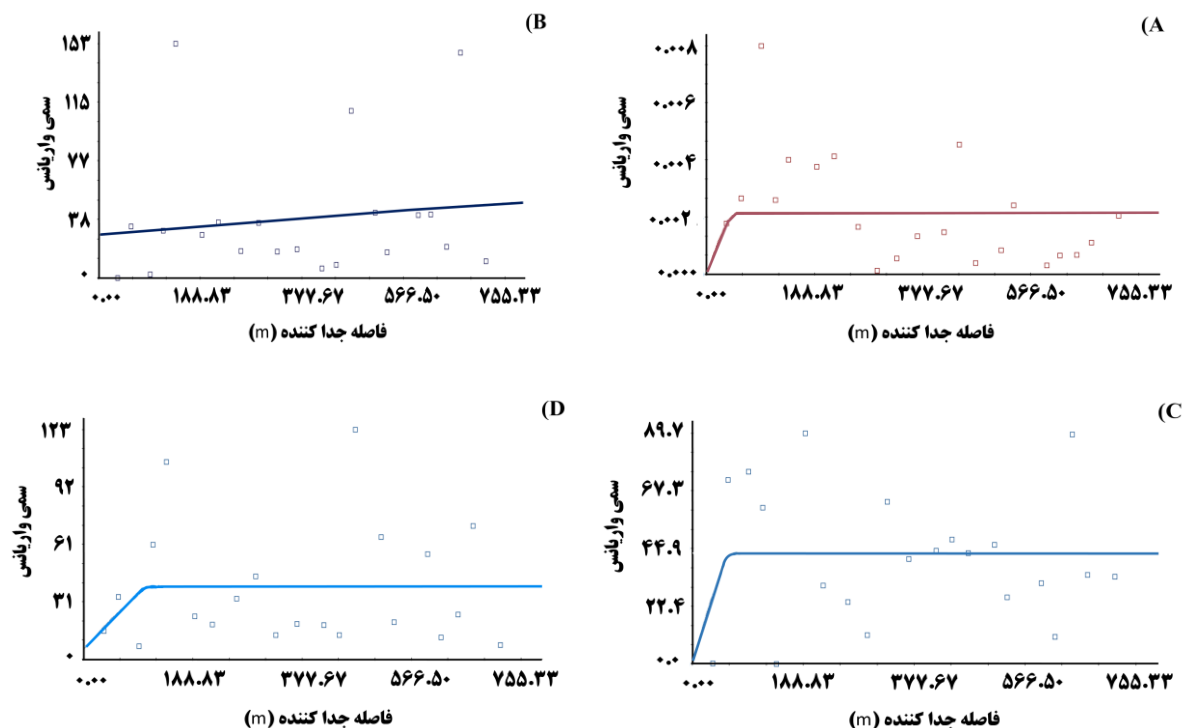
حروف کوچک، تفاوت‌های معنی‌دار بر اساس آزمون چندگانه دانکن ($P < ۰/۰۵$) را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از واریوگرام‌های برازش شده در نرم‌افزار GS+ برای مدل‌های مختلف (کروی، نمایی، خطی و گوسین) نشان داد که ساختار تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های مختلف خاک برای هر متغیر با یک مدل خاص بهتر توصیف می‌شود (جدول ۳). مدل

کروی برای شن، سیلت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته، رطوبت و هدایت الکتریکی خاک مناسب‌تر بوده در حالی که برای رس و ماده آلی مدل نمایی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شده است (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهند که الگوی تغییرات مکانی این ویژگی‌ها متفاوت است و هر یک از این مدل‌ها بهترین روش برای توصیف ساختار همبستگی مکانی آن ویژگی خاص محسوب می‌شود (شکل ۲).

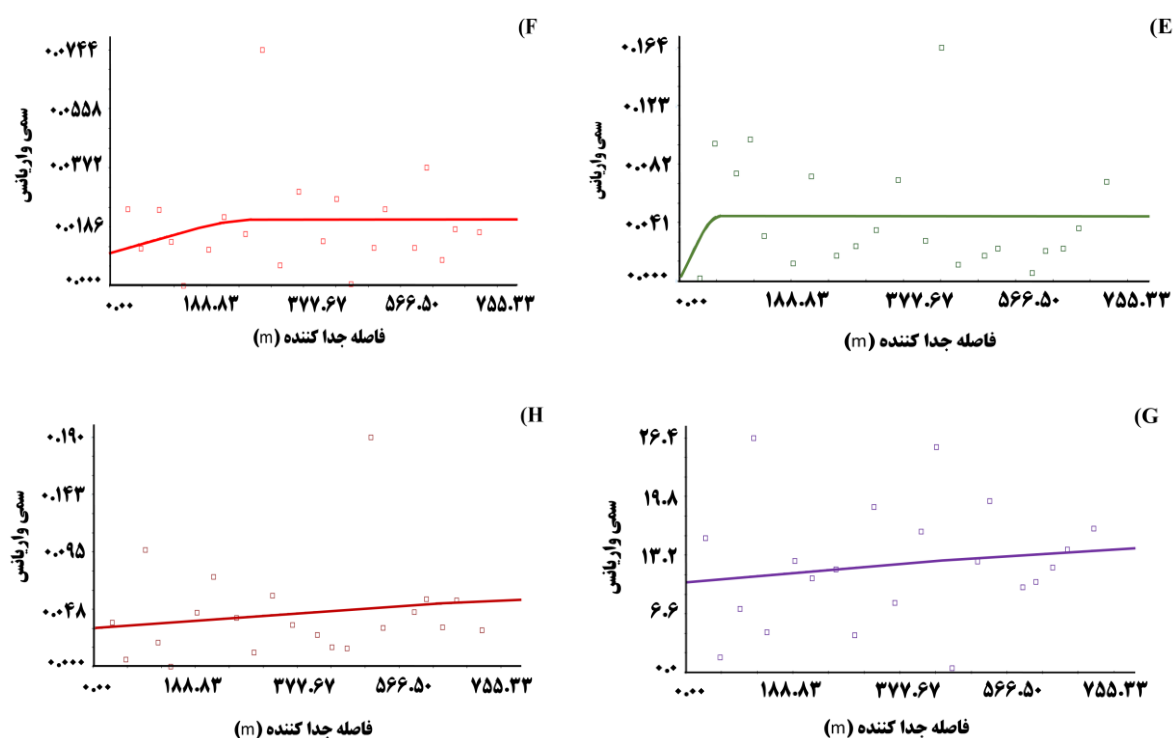
جدول ۳. پارامترهای تأثیر قطعه‌ای و سقف واریوگرام برای واریوگرام‌های برازش شده

خصوصیات خاک	مدل	R ²	نسبت C/(Co+C)	فاصله مؤثر	حد فاصل همبستگی مکانی (Range)	حداکثر واریانس بین نقاط (Sill)	واریانس در فواصل کوتاه ناشی از خطا (Nugget)
رس	نمایی	۰/۰۲	۰/۵	۴۹۴۷	۱۶۴۹	۲۰/۳۳	۱۰/۱۶
شن	کروی	۰/۰۱	۰/۵	۱۵۵۶	۱۵۵۶	۵۹	۲۸/۰۵
سیلت	کروی	۰/۰۳	۰/۸۷	۱۴۶	۱۴۶	۳۹/۲	۵/۱
وزن مخصوص ظاهری	کروی	۰/۰۳	۰/۹۹	۷۰	۷۰	۰/۰۴	۱/۰۰۳
اسیدیته	کروی	۰/۰۱	۰/۵	۳۱۹	۳۱۹	۰/۰۲	۰/۰۱
رطوبت	کروی	۰/۰۹	۰/۹۹	۷۸	۷۸	۴۲/۸۷	۰/۱
هدایت الکتریکی	کروی	۰/۰۰۲	۱	۵۶	۵۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱
ماده آلی	نمایی	۰/۰۲	۰/۶۱	۳۶۴۵	۱۲۱۵	۰/۰۸	۰/۰۳



شکل ۲. واریوگرام برازش شده برای خصوصیات مختلف خاک:

EC (A)، شن (B)، رطوبت (C)، سیلت (D)، وزن مخصوص ظاهری (E)، PH (F)، رس (G) و ماده آلی (H)



ادامه شکل ۲.

نتایج ارزیابی دقت روش‌های مورد بررسی نشان داد که کریجینگ معمولی با پایین‌ترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای شن (۱/۴۱)، سیلت (۱/۱۸)، هدایت الکتریکی (۱/۴۳)، اسیدیته (۱/۷۶)، وزن مخصوص ظاهری (۱/۳۳) و رطوبت خاک (۱/۴۷) و کریجینگ ساده با پایین‌ترین میزان RMSE برای رس (۰/۹۸) و ماده آلی (۰/۹۹) بهترین روش برای درون‌یابی در این پژوهش می‌باشند (جدول ۴ و ۵ و شکل ۳).

جدول ۴. نتایج صحت‌سنجی سرتاسری برای سه واریوگرام کریجینگ معمولی، ساده و عام

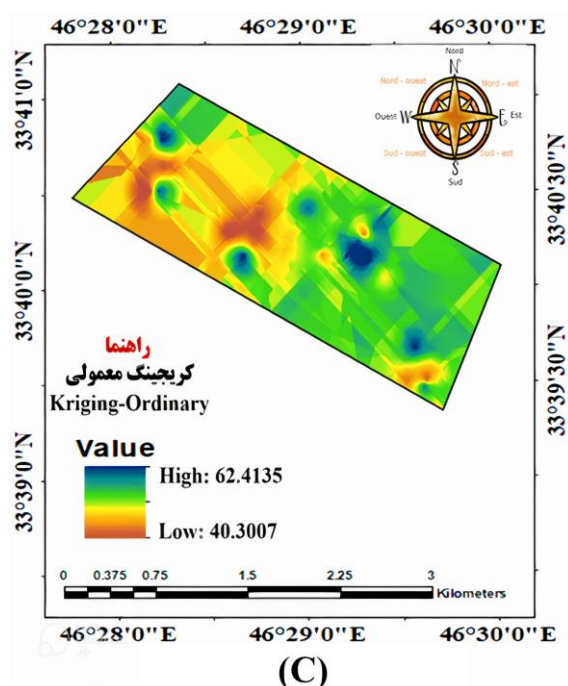
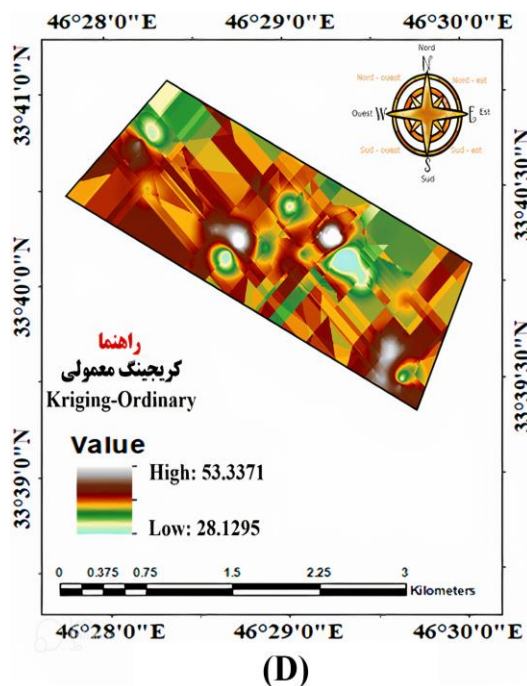
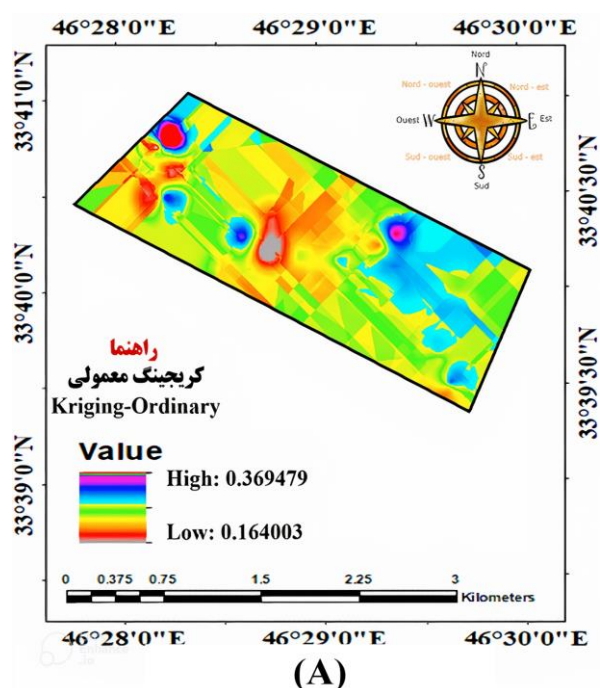
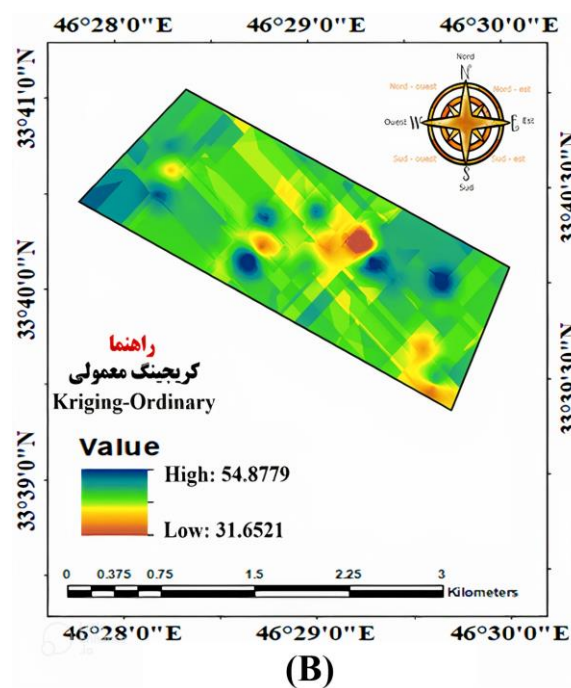
خصوصیات خاک	مدل	مربع میانگین ریشه خطا برآورد (RMS)	معدل خطا استاندارد، خطای برآورد (ASE)	میانگین استاندارد شده خطا برآورد (MSE)	خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)
رس	کریجینگ معمولی	۳/۲۹	۳/۰۴	۰/۱۶۸	۱/۰۹
	کریجینگ ساده	۳/۶۲	۳/۶۶	۰/۰۷۱	۰/۹۸
	کریجینگ عام	۳/۰۸	۲/۹۷	۰/۰۹۸	۱/۱۲
شن	کریجینگ معمولی	۵/۹۳	۵/۴۶	۰/۲۲	۱/۴۱
	کریجینگ ساده	۵/۳۸	۳/۵۵	۰/۴۴	۱/۶۰
	کریجینگ عام	۵/۶۱	۳/۸۹	۰/۲۷	۱/۵۳
سیلت	کریجینگ معمولی	۶/۷	۶/۱۸	۰/۳۳	۱/۱۸
	کریجینگ ساده	۶/۲۹	۳/۲۷	۰/۳۰	۲/۰۸
	کریجینگ عام	۶/۱۹	۳/۸۷	۰/۳۱	۱/۸۵
وزن مخصوص ظاهری	کریجینگ معمولی	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۰۹	۱/۳۳
	کریجینگ ساده	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۱۰	۱/۸۶
	کریجینگ عام	۰/۱۹	۰/۱۰	۰/۱۲	۱/۵۹
اسیدیته	کریجینگ معمولی	۰/۱۶۸	۰/۱۱	۰/۰۰۶	۱/۷۶
	کریجینگ ساده	۰/۱۶۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۲/۳۹
	کریجینگ عام	۰/۱۶۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	۱/۸۷

ادامه جدول ۴.

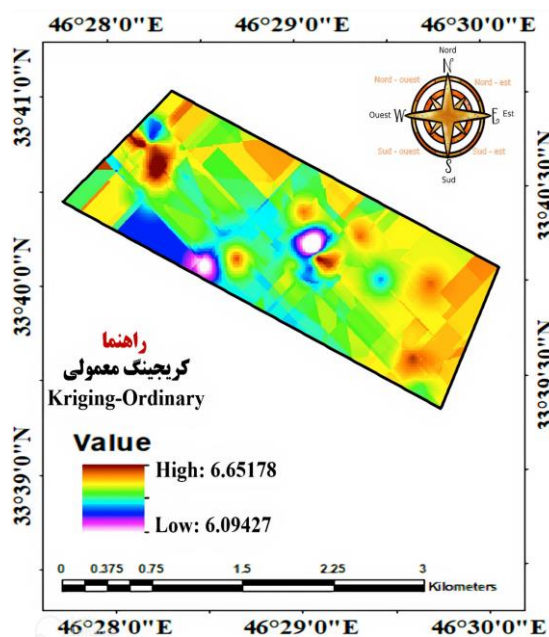
خصوصیات خاک	مدل	مربع میانگین ریشه خطا برآورد (RMS)	معدل خطا استاندارد، خطای برآورد (ASE)	میانگین استاندارد شده خطا برآورد (MSE)	خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)
رطوبت	کریجینگ معمولی	۷/۸	۵/۹۱	۰/۰۸	۱/۴۷
	کریجینگ ساده	۷/۷	۴/۱۶	۰/۱	۲/۳۱
	کریجینگ عام	۷/۹۲	۵/۷۶	۰/۰۹	۱/۵۹
هدایت الکتریکی	کریجینگ معمولی	۰/۰۴۶	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۱/۴۳
	کریجینگ ساده	۰/۰۶۷	۰/۱۲	۰/۰۰۳	۱/۵۱
	کریجینگ عام	۰/۰۴۵	۰/۱۴	۰/۰۰۳	۱/۵۰
ماده آلی	کریجینگ معمولی	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۰۱	۱/۲۷
	کریجینگ ساده	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۰۷	۰/۹۹
	کریجینگ عام	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۰۹	۱/۳۰

جدول ۵. نتایج ارزیابی دقت برای سه واریوگرام کریجینگ معمولی، ساده و عام با مقادیر واقعی خصوصیات خاک

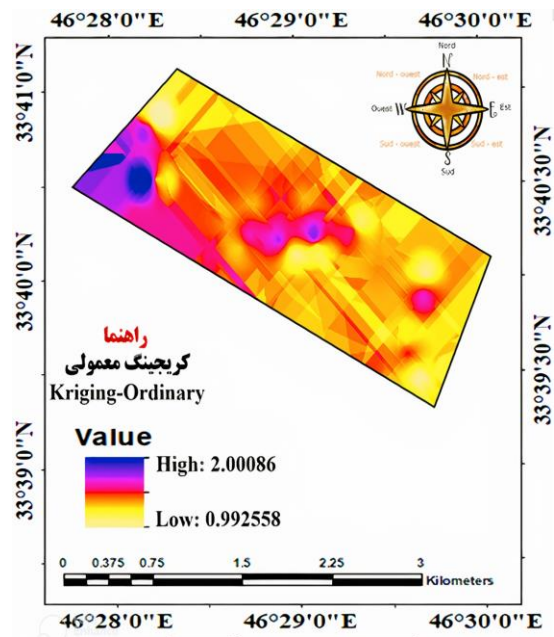
خصوصیات خاک	مدل	معیار BIC اطلاعات نرمال شده	میانگین خطای مطلق (MAE)	ضریب تعیین (RS)	خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)
رس	کریجینگ معمولی	-۰/۹۷	۰/۲۳۰	۰/۰۱۷	۰/۳۵۲
	کریجینگ ساده	-۱/۲۴	۰/۱۹۸	۰/۰۱۵	۰/۲۹۸
	کریجینگ عام	-۰/۷۵	۰/۲۳۱	۰/۰۱۲	۰/۴۱۵
شن	کریجینگ معمولی	-۱/۶۷	۰/۱۷۱	۰/۱۷۴	۰/۴۲۹
	کریجینگ ساده	-۰/۳۲	۰/۳۴۲	۰/۱۵۶	۰/۵۲۷
	کریجینگ عام	-۰/۴۷	۰/۳۱۲	۰/۲۱۹	۰/۵۰۳
سیلت	کریجینگ معمولی	-۱/۸۷	۰/۱۰۱	۰/۰۹۸	۰/۲۷۱
	کریجینگ ساده	-۰/۴۳	۰/۱۹۷	۰/۱۶۵	۰/۴۶۵
	کریجینگ عام	-۰/۵۹	۰/۱۴۷	۰/۱۷۸	۰/۳۶۵
وزن مخصوص ظاهری	کریجینگ معمولی	-۲/۰۱	۰/۲۳۹	۰/۲۱۱	۰/۲۵۴
	کریجینگ ساده	-۰/۸۳	۰/۳۵۴	۰/۳۷۶	۰/۳۱۵
	کریجینگ عام	-۰/۹۵	۰/۲۹۸	۰/۳۲۷	۰/۳۰۱
اسیدپته	کریجینگ معمولی	-۲/۲۶	۰/۳۹۱	۰/۳۸۰	۰/۴۶۶
	کریجینگ ساده	-۰/۳۳	۰/۴۴۸	۰/۴۶۲	۰/۶۸۰
	کریجینگ عام	-۰/۴۰	۰/۴۰۵	۰/۴۱۳	۰/۵۸۷
رطوبت	کریجینگ معمولی	-۱/۴۲	۰/۱۲۸	۰/۱۰۷	۰/۲۷۰
	کریجینگ ساده	-۰/۶۶	۰/۱۶۵	۰/۲۱۸	۰/۳۱۵
	کریجینگ عام	-۰/۴۷	۰/۱۹۶	۰/۱۹۵	۰/۳۰۹
هدایت الکتریکی	کریجینگ معمولی	-۱/۹۳	۰/۳۷۹	۰/۳۷۹	۰/۴۰۳
	کریجینگ ساده	-۰/۴۹	۰/۴۳۲	۰/۴۳۲	۰/۵۱۹
	کریجینگ عام	-۰/۴۱	۰/۴۲۷	۰/۴۰۱	۰/۵۰۰
ماده آلی	کریجینگ معمولی	-۱/۱۵	۰/۲۰۲	۰/۱۸۷	۰/۲۷۰
	کریجینگ ساده	-۰/۸۲	۰/۱۸۶	۰/۱۶۰	۰/۲۰۹
	کریجینگ عام	-۰/۵۷	۰/۲۶۷	۰/۲۶۱	۰/۳۳۱



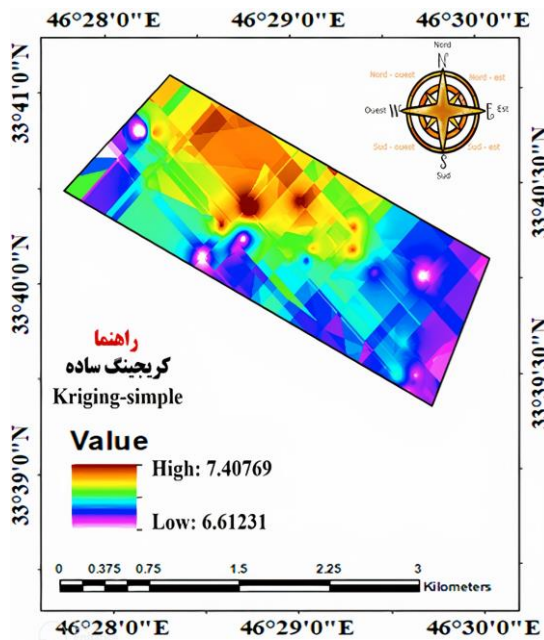
شکل ۳. نقشه پراکنش مکانی خصوصیات خاک با روش‌های مختلف کریجینگ:
 (A) EC، (B) شن، (C) رطوبت، (D) سیلت، (E) وزن مخصوص ظاهری (PH)، (F) رس (G) و ماده آلی (H)



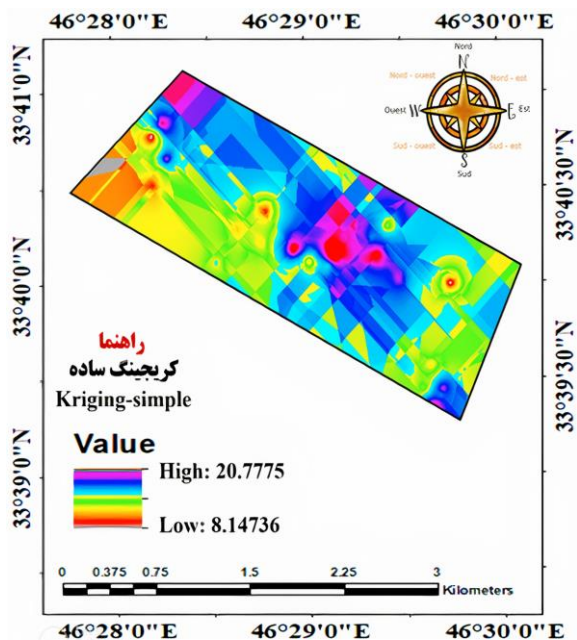
(F)



(E)



(H)



(G)

ادامه شکل ۳.

۴. بحث

نتایج این مطالعه نشان داد که توده‌های دانه‌زاد با تاج متراکم، بالاترین میزان ماده آلی و هدایت الکتریکی خاک را دارند، در حالی که کمترین میزان رطوبت در توده‌های دانه‌زاد با تاج تنک مشاهده شد. به‌طور کلی، متراکم بودن تاج پوشش به افزایش رطوبت خاک، تجمع بیشتر لاشبرگ و در نتیجه، افزایش ماده آلی منجر می‌شود [۶]. علاوه بر این، وزن مخصوص ظاهری خاک در مناطق با تاج تنک بیشتر بود که احتمالاً ناشی از کاهش پوشش گیاهی، کاهش ماده آلی و افزایش فشردگی خاک است [۱۲]. در مقابل کاهش وزن مخصوص ظاهری در توده تاج متراکم می‌تواند به ورودی لاشبرگ و مواد آلی بیشتر در این توده مرتبط باشد [۲۸]. از سوی دیگر، افزایش هدایت الکتریکی در توده‌های با تاج متراکم، احتمالاً به دلیل افزایش مواد محلول و فعالیت‌های زیستی است [۲]. کاهش میزان رطوبت در توده‌های دانه‌زاد تاج تنک را می‌توان با افزایش تابش نور خورشید به سطح زمین و در نتیجه افزایش تبخیر توجیه کرد؛ افزون بر این، در مقایسه با توده‌های شاخه‌زاد که دارای سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و تاج‌های متراکم‌تر هستند، توده‌های دانه‌زاد به دلیل تراکم کمتر و توسعه نیافتگی سامانه ریشه‌ای، ظرفیت کمتری در حفظ رطوبت خاک دارند [۲۱]. در عرصه‌های جنگلی، میزان نور ورودی به کف جنگل، تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی دارد. ورود نور به این نواحی می‌تواند فرآیندهای تبخیر و فعالیت موجودات خاکزی حفر خاک مانند کرم‌های خاکی را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه بر ذخیره رطوبت خاک و تغییرات آن مؤثر باشد [۹، ۴۴]. به‌ویژه در جنگل‌هایی با تاج پوشش انبوه، که نور کمتری به کف جنگل می‌رسد، تبخیر کاهش یافته و رطوبت خاک بیشتر حفظ می‌شود [۲۷].

مطالعات متعددی با نتایج این مطالعه همخوانی دارند. Tsogbadrakh و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای نشان داده‌اند توده‌های متراکم درختی می‌توانند باعث افزایش ذخیره ماده آلی در خاک شوند، زیرا برگ‌ریزی و کاهش نور مستقیم خورشید، تجزیه مواد آلی را کندتر کرده و منجر به افزایش ماده آلی می‌شود [۵۱]. همچنین Rooney و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بیان کردند که تاج پوشش متراکم نیز با کاهش رواناب و افزایش مواد آلی، تخلخل خاک را بهبود می‌بخشد و وزن مخصوص را کاهش می‌دهد [۴۳]. Basche و DeLonge (۲۰۱۷) نیز در مطالعه‌ای نشان دادند که توده‌های تاج متراکم به دلیل حفظ رطوبت و کاهش تبخیر موجب بهبود رطوبت خاک می‌شوند [۴]. Zhou و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای نشان دادند که افزایش تراکم تاج پوشش با بهبود وضعیت مواد آلی خاک و تجمع یون‌های محلول، منجر به افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌شود [۵۶].

نتایج به‌دست آمده از واریوگرام‌ها نیز نشان می‌دهند که ویژگی‌های مختلف خاک با مدل‌های متفاوتی برای توصیف تغییرات مکانی منطبق هستند. دلیل این تفاوت، به ماهیت و نوع تغییرات مکانی هر ویژگی برمی‌گردد [۵۴]. مدل کروی برای ویژگی‌هایی مانند شن، سیلت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته، رطوبت و هدایت الکتریکی مناسب است، زیرا این ویژگی‌ها تغییرات سریع و مشخصی در مقیاس‌های کوچک تا متوسط دارند و پس از رسیدن به یک نقطه خاص، تغییرات آنها به شدت کاهش می‌یابد [۷]. این رفتار ویژگی‌ها به‌طور معمول با مدل کروی که به تغییرات سریع در فواصل نزدیک و تثبیت تغییرات در فواصل دورتر می‌پردازد، تطابق دارد. در حالی که ویژگی‌هایی چون رس و ماده آلی، به دلیل داشتن تغییرات تدریجی و پیوسته در تمام مقیاس‌ها، نیاز به مدل نمایی دارند [۳۸]. مدل نمایی برای ویژگی‌هایی مناسب است که تغییراتشان در طول فاصله به‌طور مداوم ادامه دارد و به‌طور خطی کاهش نمی‌یابد [۲۴]. بنابراین، تفاوت در رفتار و ساختار تغییرات مکانی این ویژگی‌ها، انتخاب مدل‌های مختلف را تبیین می‌کند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که میزان ناهمگنی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک بر انتخاب مدل تأثیر دارد، به‌گونه‌ای که در مناطق با تغییرات ناگهانی، مدل کروی و در مناطقی با تغییرات تدریجی، مدل نمایی مناسب‌تر است [۳۵]. پژوهش‌های مقایسه‌ای نیز تأیید کرده‌اند که براساس ویژگی مورد نظر، مدل‌های مختلفی از جمله کروی، نمایی و گوسی، می‌توانند عملکرد بهتری داشته باشند [۱۰]. بنابراین، انتخاب مدل به ساختار تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک بستگی خواهد داشت.

نتایج ارزیابی دقت روش‌های مختلف درون‌یابی در این مطالعه نشان می‌دهند که کریجینگ معمولی با پایین‌ترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ویژگی‌هایی مانند شن، سیلت، هدایت الکتریکی، اسیدیته، وزن مخصوص ظاهری و رطوبت خاک، به‌عنوان بهترین روش درون‌یابی شناخته شده است. این نتیجه بیانگر آن است که کریجینگ معمولی توانسته دقت بالاتری در پیش‌بینی مقادیر این ویژگی‌ها ارائه دهد، زیرا قابلیت تطبیق با تغییرات مکانی غیرخطی و پیچیده را دارد و میانگین متغیرها را

به صورت محلی تخمین می‌زند [۱۱]. در مقابل، کریجینگ ساده برای ویژگی‌هایی مانند رس و ماده آلی عملکرد بهتری داشته و RMSE پایین‌تری را نشان داده است. این مسئله احتمالاً به این دلیل است که این دو ویژگی دارای الگوهای مکانی ساده‌تر، با تغییرات تدریجی و پراکندگی نسبتاً یکنواخت در مقیاس منطقه‌ای هستند. همچنین، واریانس آنها کمتر تحت تأثیر عوامل محیطی متغیر قرار می‌گیرد و روند تغییر آنها قابل پیش‌بینی‌تر است [۳۷]. به طور کلی، انتخاب بهترین روش درون‌یابی به ماهیت فضایی و ساختار آماری هر ویژگی بستگی دارد. ویژگی‌هایی که دارای تغییرپذیری پیچیده‌تر، نوسانات شدید در مقیاس‌های کوتاه و همبستگی فضایی کمتر هستند مانند هدایت الکتریکی و رطوبت نیازمند روش‌هایی هستند که قابلیت مدل‌سازی دقیق‌تری از ساختارهای مکانی متغیر داشته باشند، نظیر کریجینگ معمولی [۳۱]. در حالی که ویژگی‌هایی مانند رس و ماده آلی، که دارای همبستگی فضایی قوی‌تری هستند (یعنی مقادیر نقاط مجاور شباهت بیشتری به یکدیگر دارند) و تغییرات آهسته‌تری در فواصل مکانی دارند، با روش‌هایی مانند کریجینگ ساده که براساس میانگین کلی منطقه عمل می‌کند، به خوبی قابل مدل‌سازی هستند [۵۴].

در مطالعات مختلف، مقایسه بین روش‌های درون‌یابی برای پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال، مطالعه‌ای توسط Kumar و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که روش کریجینگ معمولی نسبت به روش‌های دیگر از جمله IDW عملکرد بهتری در برآورد ویژگی‌های خاک، به ویژه در شرایطی با همبستگی مکانی بالا، دارد [۲۹]. همچنین، Song و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی خود به این نتیجه رسیدند که کریجینگ معمولی در مناطقی با تغییرپذیری مکانی زیاد، دقت بالاتری در تخمین ویژگی‌های خاک دارد، چرا که این روش، اطلاعات مکانی محلی را به طور دقیق‌تری لحاظ می‌کند، در حالی که کریجینگ ساده در شرایطی با همبستگی یکنواخت مناسب‌تر است [۴۸]. همچنین، Guo و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای دیگر نشان دادند که ترکیب مدل‌های زمین‌آمار با داده‌های مکانی می‌تواند دقت پیش‌بینی ویژگی‌های شیمیایی خاک را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد، و در بیشتر موارد، کریجینگ معمولی عملکرد برتری داشته است [۱۸].

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این مطالعه نشان داد که ویژگی‌های خاک در جنگل‌های زاگرس به طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع توده جنگلی (دانه‌زاد، شاخه‌زاد) و فرم تاج‌پوشش (متراکم، تنک) قرار دارد. توده‌های دانه‌زاد با تاج متراکم دارای بیشترین مقدار ماده آلی و هدایت الکتریکی خاک بودند، در حالی که کمترین میزان رطوبت در توده‌های دانه‌زاد با تاج تنک مشاهده شد. این یافته‌ها، با مطالعات قبلی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که تراکم بالاتر تاج‌پوشش می‌تواند موجب افزایش تجمع لاشبرگ، ماده آلی و فعالیت‌های زیستی خاک گردد. همچنین، در توده‌های با تاج تنک، کاهش پوشش گیاهی و افزایش فشردگی خاک، وزن مخصوص ظاهری را افزایش داده است. افزایش هدایت الکتریکی در تاج‌های متراکم نیز احتمالاً ناشی از افزایش مواد محلول و فعالیت‌های زیستی بوده است. تحلیل واریوگرام‌ها نشان داد که انتخاب مدل مناسب برای توصیف تغییرات مکانی ضروری است. مدل کروی برای ویژگی‌هایی با تغییرات سریع (مانند شن، سیلت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته، رطوبت و هدایت الکتریکی) مناسب‌تر بود و مدل نمایی برای ویژگی‌هایی با تغییرات تدریجی (مانند رس و ماده آلی). این نتایج نشان می‌دهند که انتخاب مدل‌های مختلف بستگی به رفتار و ساختار تغییرات مکانی هر ویژگی دارد. در ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی، کریجینگ معمولی بهترین عملکرد را برای اغلب ویژگی‌ها داشت، در حالی که برای رس و ماده آلی، کریجینگ ساده کارایی بهتری نشان داد. به طور کلی، نتایج نشان‌دهنده این است که انتخاب روش درون‌یابی به نوع ویژگی‌های خاک بستگی دارد و کریجینگ معمولی برای ویژگی‌های پیچیده‌تر و کریجینگ ساده برای ویژگی‌های با همبستگی ساده‌تر مناسب‌تر است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از واریوگرام‌ها و روش‌های کریجینگ می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی ویژگی‌های خاک و کمک به مدیریت مؤثرتر منابع خاک در جنگل‌های زاگرس منجر شود. انتخاب مدل‌های مناسب و دقت در پیش‌بینی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک، می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های پایدار و حفاظت از بوم‌سازگان جنگلی نقش مؤثری ایفا کند.

۶. منابع

- [1] Alavipanah, S. K., Matinfar, H. R., & Rafiei Emam, A. (2008). The application of information technology in earth sciences (digital soil mapping): radar, hyperspectral and multispectral remote sensing, geographic information systems (GIS), neural networks, fuzzy sets, and geostatistics. *University of Tehran Press*, (1st ed., p. 457). (In Persian)
- [2] Ali, D., Hussain, A., Begum, F., Lin, C., Ahsan, W. A., & Hussain, A. (2025). Assessing the impact of land use and land cover changes on soil properties and carbon sequestration in the upper Himalayan Region of Gilgit, Pakistan. *Sustainable Chemistry One World*. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2024.100038>
- [3] Bandari, A. & Khosravipour, B. (2023). The impact of rural poverty on the degradation of the Zagros forests. *Geography and Human Relations*, 6(1), 116-139.
- [4] Basche, A. & DeLonge, M. (2017). The impact of continuous living cover on soil hydrologic properties: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5), 1179-1190.
- [5] Bazgir, M., Heydari, M., Omidipour, R. & Prevosto, B. (2021). The influence of growth types on soil properties along an elevation gradient in a semi-arid oak forest. *Acta Oecologica*, 112, 103773.
- [6] Benslama, A., Lucas, I.G., Vidal, M.J.J., Almendro-Candel, M.B. & Navarro-Pedreño, J. (2024). Carbon and nitrogen stocks in topsoil under different land use/land cover types in the Southeast of Spain. *AgriEngineering*, 6(1), 24.
- [7] Bogunovic, I., Pereira, P. & Sraka, M. (2017). Spatial variation of soil properties and sampling strategies in agricultural land. *Geoderma*, 289, 29-39.
- [8] Chen, X., Wang, Y. & Liu, H. (2022). Spatial interpolation techniques for assessing soil properties in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 506, 120435.
- [9] Cortez, J. (1998). Field decomposition of leaf litters: relationships between decomposition rates and soil moisture, soil temperature and earthworm activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(6), 783-793.
- [10] Corwin, D.L., Lesch, S.M. & Hopmans, J.W. (2020). Assessment of the spatial variability of soil properties using geostatistical methods. *Agricultural Water Management*, 231, 105986.
- [11] Cui, H., Stein, A. & Myers, D. (1995). Extension of spatial information, Bayesian kriging and updating of prior variogram parameters. *Environmetrics*, 6(4), 373-384.
- [12] Deljouei, A., Sadeghi, S.M.M., Abdi, E., Bernhardt-Römermann, M., Pascoe, E. & Marcantonio, M. (2018). The impact of road disturbance on vegetation and soil properties in a beech stand, Hyrcanian Forest. *European Journal of Forest Research*, 137(5), 759-770.
- [13] Eslaminejad, P., Heydari, M., Kakhki, F. V., Mirab-Balou, M., Omidipour, R., Muñoz-Rojas, M. & Lucas-Borja, M.E. (2020). Plant species and season influence soil physicochemical properties and microbial function in a semi-arid woodland ecosystem. *Plant and Soil*, 456, 43-59.
- [14] Fathizad, H., Karimi, H. & Taze, M. (2015). Study of different geostatistical algorithms for annual rainfall zoning in Ilam Province. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 14(35), 139-154. (In Persian)
- [15] Gheitury, M., Heshmati, M., Noroozi, A., Ahmadi, M. & Parvizi, Y. (2020). Monitoring mortality in a semiarid forest under the influence of prolonged drought in Zagros region. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(12), 4589-4600.
- [16] Ghorbani, K., Salarjazi, M. & Farnia, E. (2018). Evaluation of the Empirical Bayesian Kriging method in groundwater level zoning. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 165-182. (In Persian)
- [17] Gómez, C., Jang, K. & Park, S. (2022). Assessing the Kriging interpolation method for soil moisture mapping. *Geoderma*, 418, 115806.
- [18] Guo, B., Yang, F., Wu, H., et al. (2021). How the variations of terrain factors affect the optimal interpolation methods for multiple types of climatic elements. *Earth Science Informatics*, 14, 1021-1032. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00609-2>
- [19] Hasanipak, A. (2007). *Geostatistics*. Tehran, University of Tehran Press. pp. 380.

- [20] Heydari, M., Cheraghi, J., Omidipour, R., Rostaminia, M., Kooch, Y., Valkó, O. & Carcaillet, C. (2023). Tree dieback, woody plant diversity, and ecosystem driven by topography in semi-arid mountain forests: Implication for ecosystem management. *Journal of Environmental Management*, 339, 117892.
- [21] Holíšová, P., Pietras, J., Darenová, E., Novosadová, K. & Pokorný, R. (2016). Comparison of assimilation parameters of coppiced and non-coppiced sessile oaks. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 9, 553–559.
- [22] Huang, L., Zhao, P. & Wang, R. (2023). Variogram modeling and kriging interpolation for soil characteristics in forested landscapes. *Geoderma*, 432, 117214.
- [23] Jafari Haghighi, M. (2003). Methods of Soil Analysis: Sampling and Important Physical and Chemical Analyses with Emphasis on Theoretical and Practical Principles. *Nedaye Zoha Publications*, 236 p. (In Persian)
- [24] Jiang, Y., Chen, Y. & Wang, X. (2019). Spatial variation of soil properties and their effects on crop yield. *Soil & Tillage Research*, 186, 10-19.
- [25] Kazemi, S. & Hosseinzadeh, M. (2020). High diversity and endemism of herpetofauna in the Zagros Mountains. *ECOPERSIA*, 8(4), 221–229. Retrieved from <http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-38921-en.html>
- [26] Khan, M., Almazah, M.M.A., Elahi, A., Niaz, R., Al-Rezami, A.Y. & Zaman, B. (2023). Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary Kriging and Universal Kriging. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 2190853.
- [27] Khezani, M.-A., Ali-janpour, A., Moatamedi, J. & Shiday Karkaj, I. (2022). The effect of tree canopy cover on understory rangeland species composition: A case study in the Nezhderah reserve, Urmia, West Azerbaijan. *Iranian Journal of Plant Research*, 35(2), 274-292.
- [28] Kokila, A., Nagarajaiah, C., Hanumanthappa, D.C., Shivanna, B., Sathish, K. & Mahadevamurthy, M. (2024). Effect of tree canopy cover on soil moisture dynamics in different agroforestry systems under semi-arid condition. *International Journal of Environment and Climate Change*.
- [29] Kumar, S., Das, S. & Sheelam, S. (2014). Application of CFD and the Kriging method for optimizing the performance of a generic scramjet combustor. *Acta Astronautica*, 101, 111-119.
- [30] Laun, S., Rösch, N., Breunig, M. & 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.
- [31] Li, J. & Heap, A.D. (2016). A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 33-45.
- [32] Liu, T., Zhou, H. & Zhang, F. (2022). Spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in forest ecosystems. *Geoderma*, 415, 116045.
- [33] Mahmoodi, M.A., Mirzaie, M. & Hosseini, S.M.T. (2018). Prediction of soil organic matter spatial distribution using topographic indicators and artificial neural network-kriging technique. *Journal of Water and Soil*, 32(2), 313-325.
- [34] Maleki, S., Minasny, B. & McBratney, A.B. (2018). Effect of variogram uncertainty on spatial prediction estimates in geostatistics. *Geoderma*, 319, 174-186.
- [35] Montes, L., Rubio, J.L. & López, M.V. (2018). Spatial variability of soil properties using semivariogram models. *Catena*, 171, 259-270.
- [36] Nguyen, H.T., Pham, Q.T. & Tran, D.T. (2021). Developing a geostatistical approach for optimal selection of Kriging parameters in soil property mapping. *Soil Science Society of America Journal*, 85(2), 345-359.
- [37] Oliver, M. & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, 113, 56-69.
- [38] Paul, O.O., Sekhon, B.S. & Sharma, S. (2019). Spatial variability and simulation of soil organic carbon under different land use systems: geostatistical approach. *Agroforestry Systems*, 93(4), 1389-1398.
- [39] Pramanik, S., Biswas, S. & Dutta, S. (2023). Utilization of remote sensing and GIS in assessing soil properties. *Geoderma*, 428, 116763.

- [40] Premsudha, R., Kumar, K.D., Prasath, B.H., Sivabalan, M. & Prasath, N. (2024). Data Management System - Water Supply and Channeling with GIS Mapping. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 4(3), 101-105.
- [41] Rahman, M.A., Khan, S. & Lee, C. H. (2023). Application of kriging methods for soil moisture estimation in forested areas. *Environmental Research*, 221, 115923.
- [42] Rebholz, B. & 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.
- [43] Rooney, E. C., Bailey, V., Patel, K. F., Kholodov, A., Golightly, H., & Lybrand, R. (2023). Topography and canopy cover influence soil organic carbon composition and distribution across a forested hillslope in the discontinuous permafrost zone. *Permafrost and Periglacial Processes*, 34, 331-358.
- [44] Ruiz, S. A., Bickel, S. & Or, D. (2021). Global earthworm distribution and activity windows based on soil hydromechanical constraints. *Communications Biology*, 4(1), 612.
- [45] Salehi, A. (2019). Phytoremediation: A technology for cleaning heavy metal-contaminated soils. *Human and Environment*, 17(2), 27-42.
- [46] Shabani, A., Matinfar, H. R., Arekhi, S., & Rahimi Harabadi, S. (2011). Modeling rainfall erosivity factor using geostatistic techniques (Case study: Ilam Dam watershed). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 2(2), 56-65. (Translated in Persian)
- [47] Smith, J., & Jones, B. (2023). Soil physical and chemical properties in sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 515, 120215. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120215>
- [48] Song, Y., Wang, X., Wright, G., Thatcher, D., Wu, P. & Felix, P. (2019). Traffic volume prediction with segment-based regression Kriging and its implementation in assessing the impact of heavy vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(1), 232–243.
- [49] Stateczny, A. & Włodarczyk-Sielicka, M. (2012). Test results of bathymetric data processing obtained by swath sounder GS+. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 53(4), 105-118.
- [50] Sun, D., Yang, H., Guan, D., Yang, M., Wu, J., Yuan, F. & Zhang, Y. (2018). The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 626, 1394-1401.
- [51] Tsogbadrakh, O., Sukhbaatar, G., Ganbaatar, B., Batchuluun, B., Altanjin, D., Kim, K.W., Seah, K.Y., & Oyuntsetseg, B. (2024). Tree canopy area-dependent changes in soil properties: a comparative study in the southern limit of boreal forest distribution. *Forest Science and Technology*, 20, 58-66.
- [52] Wang, L., Zhang, T. & Zhao, X. (2021). Importance of soil properties in maintaining forest ecosystem stability. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(7), 92-108.
- [53] Wang, Z., Wang, G., Li, Y. & Zhang, Z. (2024). Determinants of carbon sequestration in thinned forests. *Science of The Total Environment*, 951, 175540.
- [54] Yavitt, J.B., Harms, K.E., Garcia, M.N., Wright, S.J., He, F. & Mirabello, M.J. (2009). Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a lowland tropical moist forest, Panama. *Australian Journal of Soil Research*, 47(7), 674-687.
- [55] Zhao, Y. & Li, F. (2022). Geostatistical analysis of soil variability and implications for environmental management. *Geoderma*, 410, 115896.
- [56] Zhou, X., Zhang, X., Sharma, R.P., & Guan, F. (2024). Response of bamboo canopy density to terrain, soil and stand factors. *Trees*, 38, 1353-1366.