



Assessment of various Kriging models for interpolating soil moisture data in the Zagros Forests (Case study: Shalam region, Ilam)

Nargess Pordel^{1*}, Jaafar Hosseinzadeh¹, Mehdi Heydari¹, Reza Omidipour²

1. Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

2. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

* Corresponding author: nargess.po@gmail.com

(Received: 11 November 2024

Revised: 09 December 2021

Accepted: 26 December 2024)

Extended Abstract

Introduction: The Zagros forests, as one of Iran's most important forest ecosystems, play a crucial role in preserving water resources, carbon storage, and biodiversity. Soil moisture in these forests is vital for ecosystem stability, groundwater recharge, vegetation growth, and erosion control. However, accurately measuring soil moisture across this vast and challenging terrain is difficult due to its extent, inaccessibility, and high costs. Consequently, advanced interpolation methods like Kriging have become essential for creating soil moisture maps and managing environmental resources. Nevertheless, selecting the optimal Kriging method under varying topographic and climatic conditions remains a research challenge that requires further investigation.

Materials and Methods: This study involved collecting 60 soil samples from depths of 0 to 15 cm across different forest zones with varying canopy densities (open and closed), in both northern and southern aspects, and at three elevation classes (1750-1850 m, 1850-1950 m, and 1950-2050 m) within the Zagros forests. Various Kriging methods, including Ordinary Kriging, Simple Kriging, and Universal Kriging, were utilized to estimate and map soil moisture distribution across the region. The primary objective of employing these three Kriging methods was to compare and determine the most accurate approach, aiming to achieve precise soil moisture distribution estimates based on limited sampling data and to minimize estimation error. Model accuracy was evaluated using statistical metrics, including Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Coefficient of Determination (R^2). In this evaluation, models with lower RMSE values were considered more accurate for estimating soil moisture spatial distribution.

Results and Discussion: The results indicated that slope aspect and canopy density significantly influenced soil moisture content ($P < 0.05$). The highest soil moisture content, approximately 12.46%, was observed in areas with closed canopy and northern slopes, which was significantly greater than that in open canopy areas and southern slopes, suggesting the protective effect of closed canopies in retaining soil moisture. Furthermore, comparison of interpolation models revealed that Simple Kriging with a linear variogram had the best performance on northern slopes, achieving the lowest RMSE value (0.79), indicating the effectiveness of this model in conditions where soil moisture distribution exhibits a linear dependency on spatial location. Conversely, on southern slopes, Ordinary Kriging with an exponential variogram provided higher accuracy, with an RMSE value of 0.44. This finding suggests that in conditions with greater moisture complexity and nonlinear variation, employing an exponential variogram and Ordinary Kriging can yield improved interpolation results.

Conclusion: This study strongly emphasizes the critical importance of selecting the correct variogram models and interpolation techniques, which are specifically suited to the unique characteristics and features of a given region. The results clearly demonstrate that employing a single, fixed interpolation method across all areas does not necessarily yield the most optimal results. The choice of the appropriate interpolation method can have a significant impact on improving the accuracy of soil moisture predictions and estimations. For example, in areas with more uniform variations and relatively stable conditions, simple Kriging with a linear variogram proves to perform better, while in regions with more rapid and significant changes over shorter distances, ordinary Kriging with an exponential variogram results in higher accuracy and better performance. Therefore, it is highly recommended that researchers take into account a combination of various optimal interpolation methods, carefully considering the climatic, topographical, and vegetation characteristics of the region. This methodical approach can greatly assist in reducing estimation errors, improving the precision and reliability of soil moisture maps, and ultimately enhancing the management and preservation of natural resources and forest ecosystems. Additionally, this study underscores the importance of conducting a thorough and precise analysis, along with the careful selection of suitable statistical methods, in order to achieve more accurate predictions of soil moisture conditions, which play an essential role in sustainable natural resource management and environmental conservation, particularly in forested and ecologically sensitive regions.

Keywords: Soil, Geostatistics, Remote Sensing, GIS, Variogram

Citation: Pordel, N., Hosseinzadeh, J., Heydari, M., & Omidipour, R. (2025). Assessment of various Kriging models for interpolating soil moisture data in the Zagros Forests (Case study: Shalam region, Ilam). *Integrated Watershed Management*, 5(2), 113-128. doi= 10.22034/iwm.2024.2045354.1185

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



ارزیابی مدل‌های مختلف کریجینگ در درون‌یابی داده‌های رطوبت خاک جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: منطقه شلم، ایلام)

نرگس پردل^{۱*}، جعفر حسین‌زاده^۱، مهدی حیدری^۱، رضا امیدپور^۲

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

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

*نویسنده مسئول: nargess.po@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

چکیده مبسوط

مقدمه: جنگل‌های زاگرس به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران، نقش حیاتی در حفظ منابع آبی، کربن و تنوع زیستی دارند. رطوبت خاک در این جنگل‌ها برای پایداری اکوسیستم، تغذیه آب‌های زیرزمینی، افزایش پوشش گیاهی و کنترل فرسایش خاک اهمیت زیادی دارد؛ اما اندازه‌گیری دقیق رطوبت خاک در این منطقه به دلیل وسعت، دشواری دسترسی و هزینه بالا چالش‌برانگیز است. در نتیجه، روش‌های پیشرفته درون‌یابی، مانند کریجینگ، برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک و مدیریت منابع زیست‌محیطی اهمیت زیادی یافته‌اند. با این حال، انتخاب نوع بهینه روش کریجینگ در شرایط مختلف توپوگرافی و اقلیمی همچنان چالشی پژوهشی است که نیاز به بررسی بیشتری دارد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ۶۰ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری در مناطق مختلف با تراکم تاج‌پوشش متفاوت (باز و بسته) و در دو جهت شمالی و جنوبی و سه طبقه ارتفاعی (۱۷۵۰-۱۸۵۰ متر، ۱۸۵۰-۱۹۵۰ متر و ۱۹۵۰-۲۰۵۰ متر) از جنگل‌های زاگرس جمع‌آوری شد. برای تخمین و تهیه نقشه‌های توزیع مکانی رطوبت خاک، از روش‌های مختلف کریجینگ شامل کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و کریجینگ عمومی استفاده شد. هدف اصلی از به‌کارگیری این سه روش، مقایسه و تعیین بهترین روش و دستیابی به تخمین‌های دقیق‌تری از توزیع رطوبت خاک با استفاده از داده‌های محدود نمونه‌برداری و کاهش خطای تخمین بود. ارزیابی دقت مدل‌ها از طریق معیارهای آماری مانند ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تعیین (R^2) صورت گرفت. در این ارزیابی، مدل با مقدار RMSE کمتر، به‌عنوان مدل دقیق‌تر در تخمین توزیع مکانی رطوبت خاک در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که جهت دامنه و تراکم تاج‌پوشش به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بر رطوبت وزنی خاک تأثیرگذار هستند. بیشترین میزان رطوبت وزنی خاک (حدود ۱۲/۴۶ درصد) در مناطق با تاج‌پوشش بسته و دامنه‌های شمالی مشاهده شد، که به‌طور چشمگیری بیشتر از مناطق با تاج‌پوشش باز و دامنه‌های جنوبی بود. این مسئله نشان‌دهنده اثر حفاظتی تاج‌پوشش بسته در حفظ رطوبت خاک است. همچنین، مقایسه مدل‌های درون‌یابی نشان داد که در دامنه‌های شمالی، کریجینگ ساده با واریوگرام خطی بهترین عملکرد را داشت و کمترین مقدار RMSE (معادل ۰/۷۹) را به دست آورد، که نشان‌دهنده کارایی این مدل در شرایطی با وابستگی خطی توزیع رطوبت به موقعیت مکانی است. از سوی دیگر، در دامنه‌های جنوبی، کریجینگ معمولی با واریوگرام نمایی با مقدار RMSE برابر با ۰/۴۴ دقت بالاتری ارائه داد که بیانگر آن است که در شرایطی که توزیع رطوبت پیچیدگی بیشتری دارد و به‌صورت غیرخطی تغییر می‌کند، استفاده از واریوگرام نمایی و کریجینگ معمولی می‌تواند نتایج بهتری در درون‌یابی فراهم کند.

نتیجه‌گیری: این پژوهش بر اهمیت انتخاب صحیح مدل‌های واریوگرام و تکنیک‌های درون‌یابی متناسب با ویژگی‌های خاص منطقه‌ای تأکید دارد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از یک روش ثابت درون‌یابی در تمامی مناطق لزوماً به نتایج بهینه منجر نخواهد شد. انتخاب روش مناسب می‌تواند تفاوت قابل توجهی در دقت پیش‌بینی رطوبت خاک ایجاد کند. به‌عنوان مثال، در مناطقی با تغییرات یکنواخت‌تر، کریجینگ ساده با واریوگرام خطی عملکرد بهتری دارد، در حالی که در مناطق با تغییرات سریع‌تر و در فواصل کوتاه‌تر، کریجینگ معمولی با واریوگرام نمایی دقت بیشتری نشان می‌دهد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که محققان با توجه به ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی و پوشش گیاهی منطقه، از ترکیب روش‌های مختلف و بهینه درون‌یابی استفاده کنند. این رویکرد می‌تواند به کاهش خطاهای تخمینی، افزایش دقت نقشه‌های رطوبت خاک و در نهایت به بهبود مدیریت منابع طبیعی و اکوسیستم‌های جنگلی کمک کند. علاوه بر این، این مطالعه بر اهمیت تحلیل دقیق و انتخاب روش‌های آماری مناسب برای پیش‌بینی دقیق‌تر وضعیت رطوبت خاک تأکید دارد که به ویژه در مدیریت پایدار منابع طبیعی و حفاظت از محیط‌زیست در مناطق جنگلی نقش حیاتی دارند.

کلیدواژه: خاک، زمین‌آمار، سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، واریوگرام

استناد: پردل، ن.، حسین‌زاده، ج.، حیدری، م. و امیدپور، ر. (۱۴۰۴). ارزیابی مدل‌های مختلف کریجینگ در درون‌یابی داده‌های رطوبت خاک جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: منطقه شلم، ایلام). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۲)، ۱۱۳-۱۲۸.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

جنگل‌های زاگرس در غرب ایران، یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی کشور و منطقه محسوب می‌شوند و نقشی اساسی در حفاظت از منابع آبی، ذخیره‌سازی کربن، تأمین منابع چوب و حفظ تنوع زیستی دارند (Moradi & Shabanian, 2023). جنگل و خاک یک رابطه دوسویه و پیچیده، گسترده و ناگسستنی دارند. خاک، محیط مناسبی برای ریشه‌های درختان است و از طریق جذب آب و عناصر غذایی، به رشد درختان کمک می‌کند. همچنین، نقش مهمی در حفظ تعادل اکوسیستم، کارکردها و ساختار اکوسیستم‌های خشکی از قبیل جنگل دارد. در جنگل‌ها نیز درختان با ایجاد سایه، تبخیر آب را کاهش داده و باعث حفظ رطوبت در خاک می‌شوند (Goebes et al., 2019). رطوبت خاک از اهمیت بنیادی در رشته‌های علمی مختلف از جمله هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژی برخوردار است (Wang et al., 2012). این ویژگی مهم خاک به شکل مستقیم و غیرمستقیم بر تعداد و نوع گونه‌های گیاهی، ضریب خشکسالی و حتی بهره‌وری اقتصادی جنگل و محصولات آن اثر می‌گذارد. همچنین، این پارامتر می‌تواند بر کیفیت خاک، فراوانی حشرات و شیوع بیماری‌های گیاهی، ساختار جنگل، تراکم پوشش گیاهی، تنوع پوشش گیاهی، کارکردهای اکوسیستم و حتی شرایط آب و هوایی هر منطقه تأثیر بگذارد (Yu et al., 2018). بنابراین بررسی و اندازه‌گیری رطوبت خاک حائز اهمیت است، اما این اندازه‌گیری و تکرار مداوم آن به دلیل گستردگی مناطق، عموماً بسیار زمان‌بر بوده و نیازمند صرف هزینه بسیار زیادی است. به همین دلیل استفاده از روش‌های سریع و قابل اطمینان در تهیه نقشه رطوبت خاک از اهمیت بالایی در مدیریت جنگل برخوردار است (Jamei et al., 2017).

بطور کلی، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد که هرکدام دارای مزایا و معایبی هستند. به طور معمول تخمین رطوبت خاک و

استخراج داده‌های رطوبت به صورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد که این رویه، پرهزینه، زمان‌بر و در مواردی غیر عملی در سطوح بزرگ، مناطق صعب‌العبور و کوهستانی است و تنها بیانگر وضعیت بخش محدودی از خاک می‌باشد (Famiglietti et al., 2008). در این راستا، بکارگیری سنسور از دور و ابزارهای فراهم شده توسط این تکنولوژی، کمک شایانی به حل و ساده‌سازی بسیاری از مشکلات مدیریت اکوسیستم‌های جنگلی کرده است (Jamei et al., 2017). استفاده از داده‌های سنسور از راه دور، یک روش مهم و پرکاربرد در علوم محیط‌زیستی است و کاربردهای مختلفی دارد. با استفاده از داده‌های سنسور از دور، می‌توان رطوبت جنگل‌ها را در طول زمان و در مناطق گسترده‌ای از جنگل‌ها اندازه‌گیری کرد. این روش به شکلی که قبلاً امکان پذیر نبوده است، با دقت بیشتر و با هزینه کمتری صورت می‌گیرد (Hosseinqolizadeh et al., 2020). در این میان GIS یکی از به‌روزترین فنونی است که با بکارگیری فناوری روز نقش عمده‌ای در بهینه‌سازی بهره‌گیری از منابع دارد و یک محیط مناسب برای استخراج، تجزیه و تحلیل و نمایش اطلاعات رقومی فراهم کرده است (Premsudha et al., 2024). در سیستم‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، اطلاعات مختلف یک ناحیه به صورت لایه‌بندی شده در یک بانک اطلاعات ذخیره می‌شود. بزرگترین مزیتی که این سیستم دارد این است که می‌تواند لایه‌های اطلاعاتی را به منظور کاربردهای مختلف روی هم قرار دهد و یا هرگونه تحلیل دیگری را به صورت توابع رابطه‌ای بین لایه‌ها، روی آنها انجام دهد (Ghaisvandi, 2013; Akmal, 2024). علاوه بر این، GIS به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آبی نیز استفاده می‌شود و قابلیت تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی با دقت بالا را دارد (Khatami & Khazaei, 2014).

این سیستم در زمینه‌های مختلف در مدیریت و برنامه‌ریزی، مطالعات، تحقیقات و امور اجرایی کاربردهای فراوانی دارد (Tu et al., 2023). تحقیقات

استفاده از روش‌های مختلف کریجینگ را برای افزایش دقت پیش‌بینی‌های محیطی، به‌ویژه در برآورد رطوبت خاک، تایید می‌کند.

در محیط GIS، روش‌های مختلفی برای درون‌یابی وجود دارد. با توجه به پیچیدگی و ناشناخته بودن تغییرات مکانی داده‌ها، از روش‌های مختلف درون‌یابی استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها کریجینگ است که می‌تواند دقت درون‌یابی را بهبود بخشد و به دلیل عدم وجود خطای سیستماتیک و حداقل واریانس در تخمین‌ها، کاربرد ویژه‌ای در درون‌یابی دارد (Ghorbani *et al.*, 2018). روش کریجینگ شامل انواع مختلفی مانند کریجینگ معمولی، ساده، عمومی و رگرسیونی است که هر یک برای شرایط خاصی به کار می‌روند و در پیش‌بینی متغیرهای محیطی تاثیرگذارند. این متغیرها می‌توانند دقت پیش‌بینی روش‌های درون‌یابی را به‌ویژه در نواحی با تنوع توپوگرافی و پیچیدگی زیاد، بهبود دهند (Denkovski *et al.*, 2012). با این حال، به تفاوت این روش‌ها و همچنین تاثیر شرایط محیطی بر کارایی آن‌ها کمتر پرداخته شده است (Brus & Heuvelink, 2007).

با توجه به وقوع خشکسالی‌های مکرر در ایران، به‌ویژه در مناطق غربی کشور و اهمیت جنگل‌های زاگرس در حفاظت از منابع آب و خاک، رطوبت خاک به‌عنوان یکی از عوامل اساسی محیط‌زیست که بر زندگی گیاهی، جانوری و میکروارگانیسم‌های خاک تأثیر مستقیم دارد (Heshmati *et al.*, 2020) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آگاهی از میزان رطوبت خاک، توزیع مکانی و تغییرات زمانی آن در مطالعات آب‌شناسی، علوم خاک، محیط‌زیست، هواشناسی و همچنین در آبیاری و زهکشی، به منظور بهبود کارایی مصرف آب، حائز اهمیت می‌باشد (Pan *et al.*, 2012). در این راستا، هدف این پژوهش مقایسه روش‌های مختلف کریجینگ (معمولی، عام و ساده) در برآورد

انجام‌شده در زمینه پایش و ارزیابی مدل‌های کریجینگ نشان می‌دهد که این روش در پیش‌بینی دقیق‌تر داده‌های محیطی در شرایط مختلف مؤثر بوده است. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط Heydari و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و معکوس فاصله وزنی (IDW) برای بررسی پراکنش خصوصیات خاک و تنوع گیاهی در جنگل‌های بلوط ایلام استفاده گردید. نتایج نشان داد که این روش‌ها دقت بالایی در برآورد متغیرهای مختلف خاک و تنوع گیاهی دارند. همچنین، Rafiei و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای از روش‌های کریجینگ و رگرسیون-کریجینگ برای برآورد درصد رطوبت اشباع خاک در اراضی زراعی استان گلستان استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش رگرسیون-کریجینگ دقت بالاتری در تخمین رطوبت اشباع نسبت به روش کریجینگ ساده داشته است. Yao و همکاران (۲۰۱۳) نیز در بررسی خود نشان دادند که در زمین‌های پیچیده، کریجینگ ساده و روش وزن‌دهی معکوس به دلیل عدم همبستگی فضایی قوی، عملکرد ضعیفی دارند، اما ترکیب کریجینگ با رگرسیون توانسته است دقت پیش‌بینی را بهبود بخشیده و نقشه‌سازی دقیق‌تری ارائه دهد. همچنین، Zhang و همکاران (۲۰۱۷) با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی مانند شاخص پوشش گیاهی، ترکیب الگوریتم کریجینگ سنتی با داده‌های طیفی را ممکن ساختند و دقت نقشه‌سازی رطوبت خاک را افزایش دادند. علاوه بر این، Han و Suh (۲۰۲۴) نشان دادند که ترکیب الگوریتم‌های یادگیری ماشین و کریجینگ (RF-OK) برای پیش‌بینی پراکنش رطوبت خاک و آلودگی‌های خاک، دقت بالاتری نسبت به مدل‌های تکی نشان داده و با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده و مقایسه نتایج، به کاهش خطاهای پیش‌بینی کمک کرده است. این مطالعات اهمیت

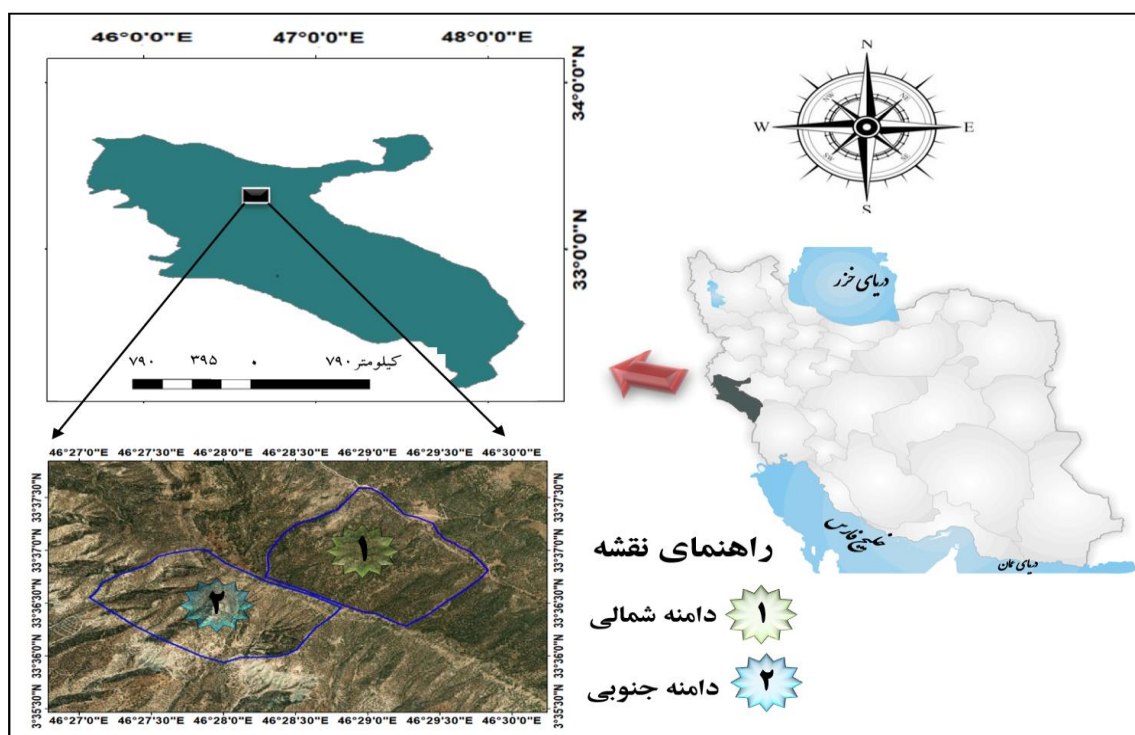
۱). گونه غالب درختی این منطقه، بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) با دو فرم شاخه‌زاد و دانه‌زاد است و سایر گونه‌های درختی و درختچه‌ای مانند زالزالک، کیکم و بنه نیز در ترکیب آن مشاهده می‌شوند. علاوه بر گیاهان چوبی، سطح زمین نیز با گیاهان علفی یکساله و چندساله (گراس و فورب) پوشیده شده است. ارتفاع منطقه بین ۱۵۰۰ تا ۲۱۵۰ متر از سطح دریا متغیر است. این منطقه در اقلیم مدیترانه‌ای قرار دارد و میزان بارندگی سالانه آن به‌طور متوسط ۶۴۳ میلی‌متر است که بر اساس نقشه‌های هم‌باران محاسبه شده است. حداکثر دمای آن به ۱۸/۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که میانگین حداقل دمای منطقه ۶/۱ درجه سانتی‌گراد است. این منطقه به‌طور متوسط ۴۲ روز یخبندان در سال تجربه می‌کند. حداقل دمای مطلق در ماه بهمن به ۱۵- درجه سانتی‌گراد و حداکثر دمای مطلق سالانه به ۴۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (Fathizadeh et al., 2017). این منطقه دچار خشکسالی‌های مکرر شده و پیش‌بینی می‌شود این روند ادامه یابد (Azizi et al., 2019).

رطوبت خاک است. این پژوهش به تحلیل تأثیر ویژگی‌های فیزیوگرافی نظیر ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه و تراکم تاج‌پوشش درختان بر رطوبت خاک پرداخته و همزمان به ارزیابی قابلیت‌های روش‌های مختلف کریجینگ در پیش‌بینی رطوبت خاک می‌پردازد. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل همزمان این عوامل به‌منظور درک دقیق‌تر روابط میان ویژگی‌های فیزیوگرافی و رطوبت خاک، و همچنین شناسایی و معرفی مؤثرترین روش درون‌یابی کریجینگ برای پیش‌بینی رطوبت خاک می‌باشد. این رویکرد می‌تواند به ارتقاء دقت پیش‌بینی‌ها و بهبود مدیریت منابع آبی کمک شایانی نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در جنگل‌های زاگرس و منطقه کوهستانی شلم واقع در شهرستان ایلام انجام شد. این منطقه در دامنه جنوبی تا کنار پارک جنگلی چغاسبز و در دامنه شمالی به جاده دره ارغوان محدود شده است (شکل



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان ایلام

Figure 1- Location of the study area in Iran and Ilam province

نمونه‌برداری و تعیین رطوبت خاک

منطقه‌ی انتخابی به گونه‌ای بود که امکان بررسی ویژگی‌های موردنظر در هر دو جهت دامنه‌های شمالی و جنوبی و در سه طبقه‌ی ارتفاعی ۱۷۵۰-۱۸۵۰ متر (پایین‌بند)، ۱۸۵۰-۱۹۵۰ متر (میان‌بند) و ۱۹۵۰-۲۰۵۰ متر (بالابند) فراهم شود. این تقسیم‌بندی به گونه‌ای بود که پراکنش بهینه‌ی نقاط را تضمین کرده و پوشش گسترده‌ای از ارتفاعات مختلف را در نمونه‌ها ارائه دهد. در این منطقه جنگلی کوهستانی، ۶۰ توده (هر یک با مساحت ۰/۵ تا ۱ هکتار)، شامل ۳۰ توده کم‌تراکم (توده باز با تاج پوشش کمتر از ۲۵ درصد) و ۳۰ توده پرتراکم (توده بسته با تاج پوشش بیشتر از ۲۵ درصد) با استفاده از گوگل ارث و بازدیدهای میدانی تعیین شد. برای تعیین تاج پوشش، قطر بزرگ و قطر کوچک تاج درخت با متر نواری اندازه‌گیری شدند؛ سپس میانگین این دو قطر و مساحت تاج محاسبه شد. در هر دامنه (شمالی و جنوبی)، ۱۵ توده با تاج باز و ۱۵ توده با تاج بسته تعیین شد و در هر طبقه ارتفاعی، ۵ توده با تاج باز و ۵ توده با تاج بسته مشخص شد. برای جمع‌آوری داده‌ها و نمونه‌برداری خاک، ابتدا با دستگاه GPS^۲ مرکز هر پلات مشخص و از دایره‌هایی با شعاع ۱۲/۵ متر به عنوان پلات‌های نمونه‌برداری استفاده شد. نمونه‌های خاک در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری از چهار نقطه در هر پلات برداشت و ترکیب شدند. در هر دامنه ۳۰ نمونه خاک و در کل منطقه ۶۰ نمونه جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه، رطوبت خاک به روش وزنی (Perrier & Salkini, 1991) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به رطوبت خاک، از آزمون‌های لون و کولموگروف-اسمیرنوف به ترتیب برای ارزیابی همگنی و نرمال بودن داده‌ها، استفاده شد. در ادامه برای بررسی اثرات جهت دامنه (شمال و

جنوب) و تراکم تاج پوشش (تاج بسته و تاج باز) در سه موقعیت ارتفاعی (پایین‌بند، میان‌بند و بالابند) و اثر متقابل دوگانه و سه‌گانه آنها بر رطوبت خاک با استفاده از تجزیه واریانس سه‌طرفه در قالب مدل‌های خطی عمومی (GLM^۲) تعیین شد. در صورت وجود اثرات معنی‌دار، از آزمون‌های تجزیه واریانس یکطرفه و Independent student t-test برای مقایسه رطوبت بین کلاس‌های ارتفاعی، جهت‌های جغرافیایی و تاج پوشش مختلف استفاده شد. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳،۰ (SPSS Inc)، شیکاگو، IL) انجام شد.

برای مقایسه مدل‌های مختلف درون‌یابی ابتدا برای تعیین همبستگی مکانی داده‌ها، از ۷۰ درصد داده‌ها استفاده شد و ۳۰ درصد به منظور ارزیابی دقت مدل‌های درون‌یابی کنار گذاشته شد. برای استخراج پارامترهای لازم جهت درون‌یابی، واریوگرام محاسبه شد. واریوگرافی اولین گام در مدل‌سازی ساختار مکانی برای استفاده در روش کریجینگ است. در واریوگرافی، سه مؤلفه کلیدی وجود دارد که برای تحلیل و مدل‌سازی ساختار مکانی اهمیت دارند. Sill، که نشان‌دهنده بیشینه واریانس میان نقاط است و آستانه‌ای تعیین می‌کند که بعد از یک فاصله خاص، نقاط مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند؛ Range، که فاصله‌ای را مشخص می‌کند که در آن ارتباط مکانی میان داده‌ها وجود دارد و خارج از آن، نقاط به صورت تصادفی توزیع می‌شوند و Nugget، که واریانس در فواصل بسیار کوتاه را نشان می‌دهد و معمولاً ناشی از خطاهای اندازه‌گیری یا تغییرات جزئی محلی است (Shabani et al., 2011). این مؤلفه‌ها به درک بهتر ساختار مکانی و وابستگی داده‌ها کمک می‌کنند. برای محاسبه ضرایب کریجینگ، که یک تخمین‌گر زمین‌آماری است، ابتدا مقدار واریوگرام برآورد گردید (Shabani et al., 2011). در این راستا، از مدل‌های

ساده برای درون‌یابی و تهیه نقشه رطوبت خاک استفاده شد. کریجینگ معمولی متداول‌ترین روش برای برون‌یابی مقادیر در نقاطی است که داده‌ها نمونه‌برداری نشده‌اند. در این روش فرض می‌شود که میانگین متغیر مطالعه در منطقه ثابت است. در این روش، وزن‌های تخمین بر اساس فاصله و ارتباط بین نقاط نمونه تعیین می‌شوند. برای محاسبه این وزن‌ها، از واریوگرام استفاده می‌شود (Khan et al., 2023). کریجینگ عمومی برای داده‌هایی که دارای روند فضایی هستند و میانگین متغیر در نقاط مختلف تغییر می‌کند، استفاده می‌شود. این متغیر به‌عنوان یک متغیر غیرایستا شناخته می‌شود. در این روش، میانگین متغیر به‌عنوان تابعی از مختصات فضایی مدل‌سازی می‌شود. این تابع می‌تواند به‌صورت خطی، درجه دو یا بالاتر باشد (Khan et al., 2023). کریجینگ ساده نیز یک روش درون‌یابی تصادفی است که برای تخمین جابه‌جایی در داده‌ها به کار می‌رود. این روش از داده‌های آماری استفاده می‌کند و فرض می‌کند که میانگین مختصات مستقل بوده و روندی ندارد، همچنین مقدار میانگین جامعه مشخص است (Rebholz & Almekkawy, 2020). روش‌های کریجینگ به استفاده از واریوگرام برای محاسبه وابسته‌اند، اما تفاوت اصلی در نحوه مدل‌سازی میانگین است (Khan et al., 2023). به‌طور کلی روش کریجینگ بر تحلیل نیم‌تغییرنما^۴ استوار است و به ازای هر تخمین، میزان خطا را نیز محاسبه می‌کند (Alavipanah et al., 2008; Khan et al., 2023) و پایین‌ترین مربع میانگین ریشه خطاء (RMSE) بهترین برآورد را خواهد داشت (Fathizad et al., 2015). درنهایت ۳۰ درصد داده‌های باقی‌مانده به عنوان داده‌های اعتبارسنجی وارد GIS شد و مقادیر تخمینی رطوبت برای این نقاط به دست آمد. مقادیر پیش‌بینی‌شده به همراه مقادیر واقعی به نرم‌افزار SPSS منتقل شدند تا با مقایسه این دو، دقت مدل ارزیابی

مختلفی همچون خطی، نمایی، گوسی و کروی استفاده می‌شود. مدل خطی فرض می‌کند که واریانس به‌طور خطی با فاصله افزایش می‌یابد و برای ساختارهای ساده‌تر مکانی مناسب است. مدل نمایی برای داده‌هایی که به تدریج به آستانه نزدیک می‌شوند، کاربرد دارد و تغییرات تدریجی مکانی را به خوبی مدل می‌کند. مدل گوسی نیز برای داده‌های همبسته با تغییرات سریع‌تر طراحی شده و واریانس در فواصل کوچک به سرعت به آستانه نزدیک می‌شود. مدل کروی، به‌عنوان یک مدل متداول، واریانس را در فواصل کوتاه تا متوسط به‌صورت تدریجی و کروی به آستانه می‌رساند (Laun et al., 2016). این مؤلفه‌ها و مدل‌ها اساس واریوگرافی و تکنیک‌های تخمین‌گر کریجینگ هستند و به دقت بالا در تحلیل داده‌های مکانی کمک می‌کنند.

برای مشخص کردن نوع واریوگرام مناسب، از نرم‌افزار GS+ استفاده شد. این نرم‌افزار به تعیین بهترین مدل واریوگرام (خطی، نمایی، گوسی یا کروی) کمک می‌کند و ساختار مکانی داده‌ها را مدل‌سازی می‌کند. نرم‌افزار GS+ به‌صورت خودکار مدل بهینه را شناسایی و انتخاب می‌کند. این نرم‌افزار واریوگرامی را انتخاب می‌کند که همبستگی مکانی بین داده‌ها را به شکل مطلوب‌تری نسبت به سایر واریوگرام‌ها نشان می‌دهد (Stateczny & Włodarczyk-Sielicka, 2012). بهترین مدل برازش شده دارای کمترین مقدار RSS (مجموع ترکیبات) و بیشترین مقدار R^2 (ضریب تعیین) است؛ بنابراین ابتدا توزیع داده‌ها بررسی (Hasanipak, 2007) و ارزیابی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GS+ انجام شد. با توجه به نرمال بودن توزیع داده‌های رطوبت، نیازی به تبدیل آنها نبود. پس از تحلیل در GS+، مناسب‌ترین مدل واریوگرام برای داده‌ها مشخص و پارامترهای مربوط به آن تعیین گردید. پس از تعیین مدل واریوگرام، از روش‌های مختلف کریجینگ شامل کریجینگ معمولی، عمومی و

و جنوبی، تفاوت معنی‌داری بین پوشش تاج باز و بسته مشاهده شد. به‌علاوه، در تمام کلاسه‌های ارتفاعی، مقدار رطوبت در مناطق با تاج پوشش بسته به‌طور قابل توجهی بیشتر از مناطق با تاج پوشش باز بود. بیشترین رطوبت خاک در جهت شمالی در نواحی بالابند و میان‌بند با تاج پوشش بسته (۱۲/۴۶ درصد) ثبت شد، در حالی که کمترین مقدار آن در نواحی بالابند در جهت جنوبی با تاج پوشش باز (۳/۹۲) به‌دست آمد (شکل ۲).

جدول ۱- نتایج تاثیر جهت دامنه، ارتفاع از سطح دریا و تراکم تاج پوشش بر رطوبت خاک

Table 1- Results of the effects of slope aspect, elevation, and canopy density on soil moisture

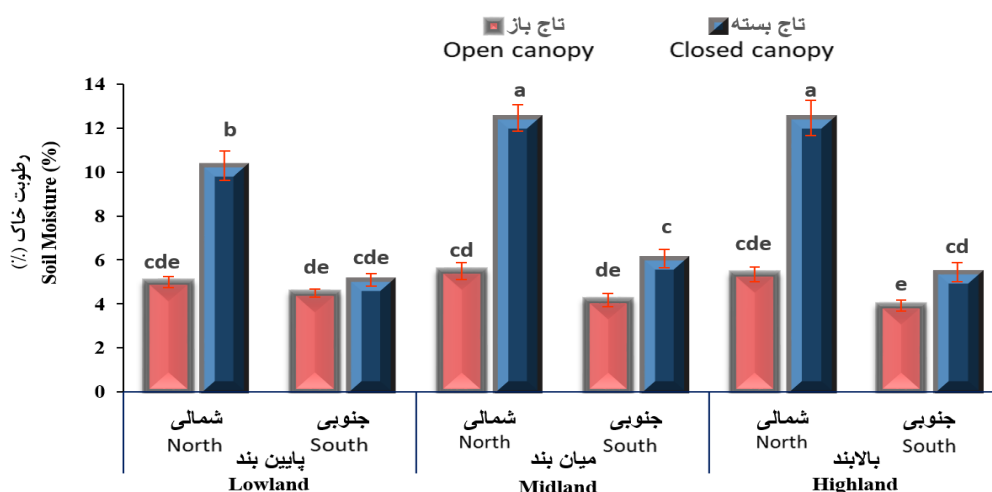
رطوبت وزنی (درصد)

منبع تغییرات		Df	P-value	
MS	P-value			
198.48	0.000	1	دامنه (A)	
227.87	0.000	1	تاج پوشش (C)	
3.645	0.033	2	ارتفاع (E)	
97.971	0.000	1	A × C	
2.604	0.084	2	A × E	
3.419	0.040	2	C × E	
0.249	0.780	2	A × C × E	

شود. این فرآیند به بررسی میزان تطابق نقشه با داده‌های واقعی و اعتبارسنجی مدل کمک می‌کند.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که جهت دامنه و تاج پوشش تأثیر معنی‌دار و بالایی بر رطوبت وزنی خاک دارند ($P\text{-value} < 0.001$). همچنین، ارتفاع از سطح دریا نیز تأثیر معنی‌داری بر رطوبت وزنی خاک داشته است ($P\text{-value} = 0.033$). هرچند اثر متقابل جهت دامنه و ارتفاع بر رطوبت وزنی خاک معنی‌دار نبود ($P\text{-value} = 0.084$)، اما، اثر متقابل تاج پوشش و ارتفاع تأثیر معنی‌داری بر رطوبت وزنی خاک داشته است ($P\text{-value} = 0.040$). در حالی که اثر متقابل سه‌گانه ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه و تاج پوشش تأثیر معنی‌داری نشان نداده است ($P\text{-value} = 0.780$). نتایج مقایسه میزان رطوبت وزنی خاک نشان داد که در هر سه کلاسه ارتفاعی، میزان رطوبت در جهت شمالی به‌طور معنی‌داری ($P\text{-value} < 0.05$) بیشتر از جهت جنوبی است. همچنین، در هر دو جهت شمالی



شکل ۲- مقایسه میانگین (± اشتباه معیار) رطوبت وزنی خاک در طبقات مختلف ارتفاع از سطح دریا، جهت دامنه (شمالی و جنوبی) در دو طبقه تاج پوشش اشکوب فوقانی (باز و بسته)؛ حروف ناهمسان در ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ درصد می‌باشد

Figure 2- Mean comparison (± standard error) of soil Moisture in different elevation classes, aspects (north and south), and two canopy cover types (open and closed); non-identical letters in the columns indicate a significant difference at the 0.05 level

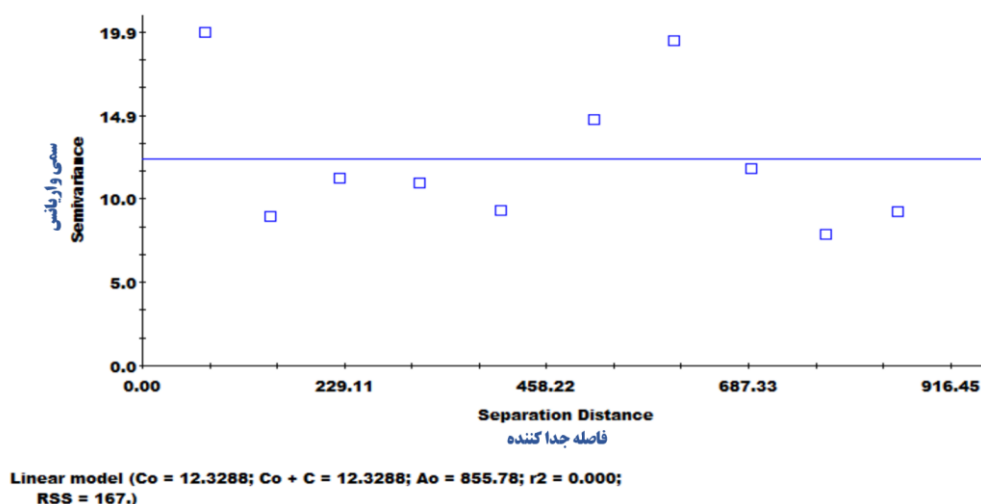
می‌دهند. در مقابل، برای دامنه جنوبی، مدل نمایی مناسب‌تر است (شکل ۴)، زیرا این مدل با اثر قطعه‌ای نسبتاً پایین (۰/۸۱۹) و اثر آستانه ۱/۶۳۹، بهترین برازش را به داده‌ها نشان می‌دهد و دارای دامنه مؤثر ۱۶۱۸ تا ۴۸۵۴ است. نسبت همبستگی فضایی ۰/۵ نیز نشان می‌دهد که همبستگی فضایی تا فواصل مشخصی قوی‌تر بوده و سپس به سرعت کاهش می‌یابد. این ویژگی‌ها نشان می‌دهند که مدل نمایی قادر است ساختار فضایی غیریکنواخت و تغییرات داده‌ها در دامنه جنوبی را بهتر توصیف کند (جدول ۲).

نتایج حاصل از واریوگرام‌های برازش شده در نرم‌افزار GS+ برای مدل‌های مختلف (کروی، نمایی، خطی و گوسین) در داده‌های شمالی و جنوبی نشان داد که برای دامنه شمالی، مدل خطی به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شده است (شکل ۳)، مقدار اثر قطعه‌ای و اثر آستانه (سقف واریوگرام) در این مدل پایین و برابر (۱۲/۳۲) است که نشان‌دهنده یک تغییر خطی و یکنواخت در واریانس با فاصله است. این مدل، با فاصله مؤثر ۸۵۵/۷۸۱۱ و نسبت همبستگی فضایی صفر، نشان می‌دهد که داده‌ها دارای همبستگی فضایی کمتری هستند و تغییرات به طور یکنواخت رخ

جدول ۲- پارامترهای تأثیر قطعه‌ای و سقف واریوگرام برای واریوگرام‌های برازش شده

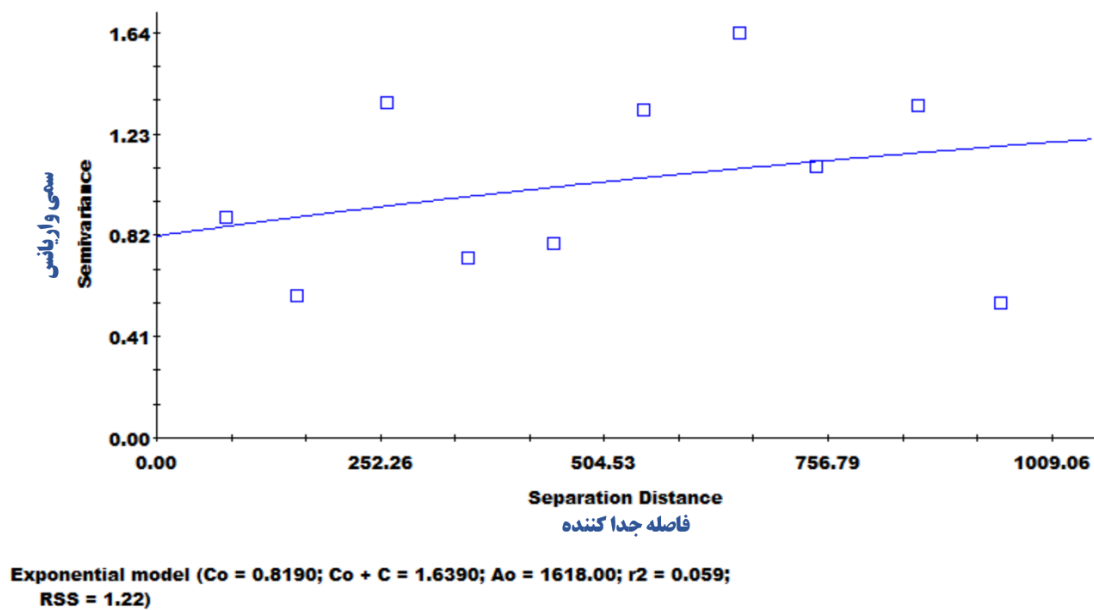
Table 2- Parameters of the nugget effect and sill for the fitted variograms

مدل	اثر قطعه	اثر آستانه	فاصله	فاصله مؤثر	نسبت $C/(C_0+C)$	R^2	دامنه
کروی	2.04	12.33	70	70	0.835	0.000	شمالی
نمایی	10.36	20.73	2110	6330	0.5	0.074	
خطی	12.32	12.32	855.7811	855.7811	0	0.075	
خطی به آستانه	2.85	12.33	70	70	0.769	0.000	
گوسین	11.64	23.29	2110	3654.6272	0.5	0.072	جنوبی
کروی	0.832	1.665	3110	3110	0.5	0.047	
نمایی	0.819	1.639	1618	4854	0.5	0.059	
خطی	0.895	1.151	951.6192	951.6192	0.222	0.044	
خطی به آستانه	0.888	1.777	3110	3110	0.5	0.044	
گوسین	0.973	1.947	2329	4033.9463	0.5	0.014	



شکل ۳- واریوگرام خطی برازش شده به داده‌های رطوبت خاک در دامنه شمالی

Figure 3- Linear variogram fitted to the soil moisture data in the northern slope



شکل ۴- واریوگرام نمایی برازش داده شده به داده‌های رطوبت خاک در دامنه جنوبی

Figure 4- Exponential variogram fitted to the soil moisture data in the southern slope

نتایج ارزیابی دقت روش‌های مورد بررسی (جدول ۳)، نشان داد که در دامنه شمالی کریجینگ ساده با پایین‌ترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (۰/۴۴) بهترین روش برای درون‌یابی در این پژوهش می‌باشند.

جدول ۳- نتایج صحت‌سنجی سرتاسری برای سه واریوگرام کریجینگ

Table 3- Results of cross-validation for three Kriging variograms

مدل	میانگین مربع ریشه خطا برآورد استاندارد (RMSE)	میانگین استاندارد شده خطا برآورد (MSE)	معدل خطا استاندارد، خطای برآورد (ASE)	مربع میانگین ریشه خطا برآورد (RMS)	دامنه
کریجینگ معمولی	1.07	0.001	3.6	3.86	شمالی
کریجینگ ساده	0.79	0.04	4.6	3.77	
کریجینگ عام	2.07	0.38	1.88	4.69	
کریجینگ معمولی	0.44	0.13	3.08	1.25	جنوبی
کریجینگ ساده	0.46	0.16	3	1.33	
کریجینگ عام	1.29	0.45	1.028	1.25	

واریانس داده‌ها را نشان می‌دهند که توسط مدل قابل توجیه است. RMSE و میانگین خطای مطلق (MAE) هرچه کمتر باشند، دقت مدل بیشتر است. میانگین خطای درصدی مطلق (MAPE) برای درک میزان خطای نسبی مدل مفید است. معیار اطلاعات نرمال‌شده (BIC) میزان کیفیت مدل را با در نظر گرفتن پیچیدگی آن ارزیابی می‌کند؛ مقادیر کمتر BIC

نتایج اعتبارسنجی برای ۳۰ درصد داده‌ها و مقادیر تخمینی رطوبت برای این نقاط نیز نشان داد که در دامنه شمالی کریجینگ ساده با پایین‌ترین میزان RMSE (۰/۲۵۸) و در دامنه جنوبی کریجینگ معمولی با پایین‌ترین میزان RMSE (۰/۴۵۳) بهترین روش برای درون‌یابی در این پژوهش می‌باشد (جدول ۴). در این جدول ضریب تعیین (RS) درصدی از

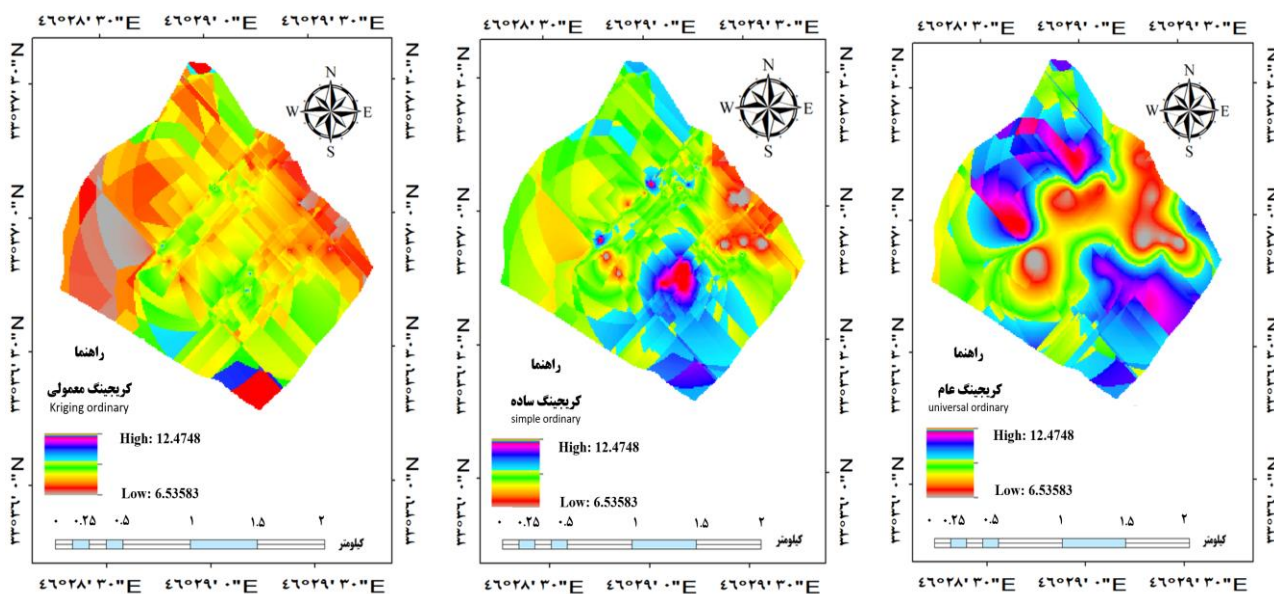
شمالی و واریوگرام نمایی در دامنه جنوبی در این تحقیق نقشه توزیع رطوبت به روش کریجینگ معمولی، ساده و عام تهیه گردید (شکل‌های ۵ و ۶).

نشان‌دهنده مدل بهتر است، به‌ویژه زمانی که مدل‌های مختلف با هم مقایسه می‌شوند. در نهایت با استفاده از روش‌های آماری کریجینگ و واریوگرام خطی در دامنه

جدول ۴- نتایج ارزیابی دقت برای سه واریوگرام کریجینگ با مقادیر واقعی رطوبت خاک

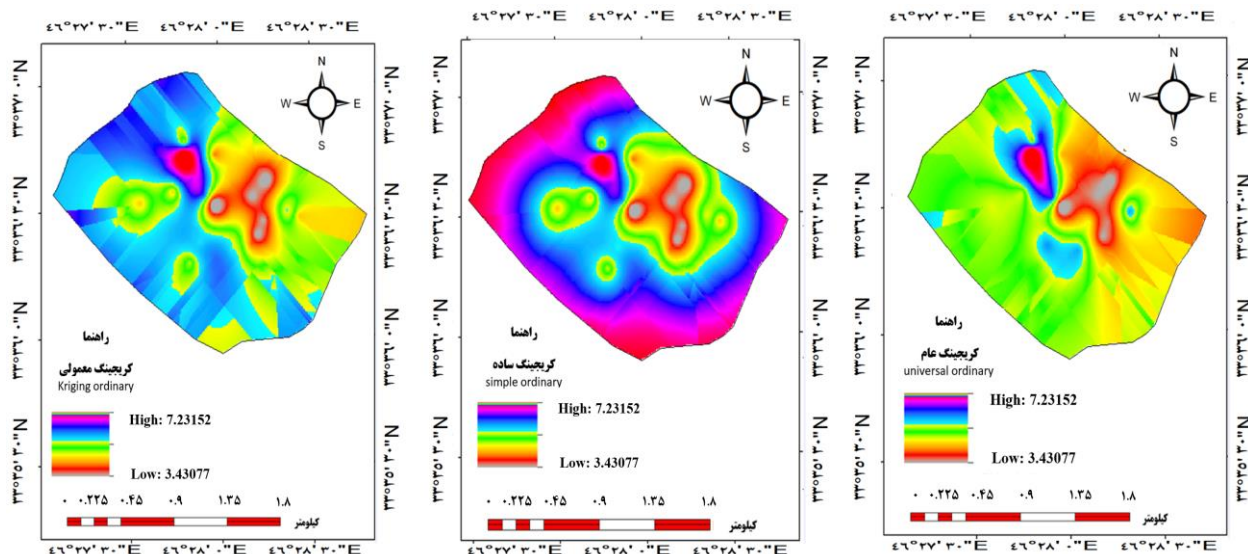
Table 4- Results of accuracy evaluation for three Kriging variograms with actual soil moisture values

مدل	میانگین مربع ریشه خطا برآورد استاندارد (RMSE)	ضریب تعیین (RS)	میانگین خطای درصدی مطلق (MAPE)	میانگین خطای مطلق (MAE)	معیار BIC اطلاعات نرمال شده	دامنه
کریجینگ معمولی	0.367	0.000	3.45	0.38	-1.08	شمالی
کریجینگ ساده	0.258	0.012	1.96	0.179	-2.21	
کریجینگ عام	0.445	0.013	5.11	0.376	-0.35	
کریجینگ معمولی	0.453	0.380	4.724	0.268	-1.72	جنوبی
کریجینگ ساده	0.512	0.596	6.862	0.389	-0.80	
کریجینگ عام	0.645	0.676	7.41	0.395	-0.7	



شکل ۵- نقشه توزیع رطوبت خاک به روش کریجینگ معمولی، ساده و عام در دامنه شمالی

Figure 5- Soil moisture distribution map using Ordinary, Simple, and Universal Kriging methods in the northern range



شکل ۶- نقشه توزیع رطوبت خاک به روش کریجینگ معمولی، ساده و عام در دامنه جنوبی

Figure 6- Soil moisture distribution map using Ordinary, Simple, and Universal Kriging methods in the southern range

همکاران (۲۰۱۸) که در جنگل‌های مله سیاه در استان ایلام انجام شد نیز نشان داد که جهت جغرافیایی و عمق خاک به‌طور معنی‌داری بر رطوبت خاک تأثیرگذار است. در این مطالعه، میزان ذخیره رطوبت خاک در جهت جنوبی و شمالی به ترتیب ۹/۲۱ و ۷/۱۹ میلی‌متر ثبت شد و این نشان می‌دهد که جهت جنوبی کمترین میزان رطوبت را دارا بوده و دامنه شمالی دارای بیشترین مقدار رطوبت بوده است. نتایج مطالعه Hosseinzadeh و همکاران (۲۰۱۸) که نشان داد میانگین رطوبت خاک در ماه‌های مختلف سال در جهت شمالی بیشتر از جهت جنوبی است نیز مؤید این مطلب است.

انتخاب نوع واریوگرام تأثیر مهمی بر دقت کریجینگ دارد. نتایج مقایسه مدل‌های مختلف درون‌یابی نشان داد که در دامنه شمالی، کریجینگ ساده با استفاده از واریوگرام خطی بهترین عملکرد را داشته و کمترین مقدار RMSE ثبت شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایطی که داده‌ها تغییرات یکنواختی دارند، کریجینگ ساده به دلیل فرض میانگین ثابت می‌تواند گزینه مناسبی باشد (Oliver & Webster, 2014). در دامنه جنوبی نیز استفاده از واریوگرام نمایی و

بحث

نتایج مقایسه رطوبت وزنی خاک نشان داد که در هر سه کلاسه ارتفاعی، رطوبت در جهت شمالی به‌طور معنی‌داری بیشتر از جهت جنوبی بود. همچنین رطوبت در مناطق با پوشش تاجی بسته به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مناطق با پوشش تاجی باز بود. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های مشابه همخوانی دارد. تحقیقات نشان می‌دهند که جهت جغرافیایی (شمالی و جنوبی) یکی از عوامل مهم در توزیع رطوبت خاک است، به‌طوری‌که در نیم‌کره شمالی کره زمین، جهت شمالی به دلیل کاهش تابش خورشید و افزایش سایه‌اندازی، معمولاً رطوبت بیشتری را در خاک حفظ می‌کند (Pelletier et al., 2018; Heydari et al., 2021). همچنین، اختلافات قابل‌توجهی بین رطوبت خاک در دامنه‌های شمالی و جنوبی به دلیل تفاوت در تابش و میزان تبخیر وجود دارد (Varga & Csiszér, 2020). علاوه بر این، پوشش تاجی متراکم‌تر موجب حفظ رطوبت بیشتری در خاک می‌شود، زیرا می‌تواند برخورد نور خورشید با سطح زمین را کاهش داده و تبخیر را کاهش داده و رطوبت را در لایه‌های بالایی خاک حفظ کند (Hayati et al., 2018). نتایج مطالعه Aazami و

معمولی اشاره کرده است که مؤید نتایج این تحقیق است.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که رطوبت خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر عوامل فیزیوگرافی و پوشش تاجی قرار دارد. به‌طور خاص، در دامنه‌های شمالی، به دلیل کاهش تابش خورشید و افزایش تراکم تاج‌پوشش (سایه‌اندازی بیشتر)، رطوبت خاک بیشتر از دامنه‌های جنوبی است. علاوه بر این، پوشش تاجی بسته نقش کلیدی در حفظ رطوبت خاک ایفا می‌کند. این یافته‌ها اهمیت رطوبت خاک در پایداری اکوسیستم‌های جنگلی را نشان می‌دهد، زیرا رطوبت خاک بر فرآیندهایی همچون تغذیه آب‌های زیرزمینی، تثبیت خاک، و حفظ پوشش گیاهی تأثیر مستقیم دارد. با توجه به گستردگی مناطق و نیاز به اندازه‌گیری مداوم رطوبت خاک، استفاده از روش‌های سریع و دقیق برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی رطوبت خاک ضروری است. سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان ابزارهایی مؤثر در تحلیل و پیش‌بینی وضعیت‌های جغرافیایی، می‌توانند دقت و سرعت تهیه این نقشه‌ها را افزایش دهند. همچنین، انتخاب صحیح مدل‌های واریوگرام و تکنیک‌های درون‌یابی برای به‌دست آوردن تخمین‌های دقیق ضروری است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در دامنه‌های شمالی، کریجینگ ساده با واریوگرام خطی عملکرد بهتری دارد، در حالی که در دامنه‌های جنوبی، که تغییرات رطوبتی در فواصل کوتاه‌تر رخ می‌دهد، کریجینگ معمولی با واریوگرام نمایی دقت بیشتری ارائه می‌دهد. این تحقیق بر اهمیت انتخاب روش‌های مناسب آماری و زمین‌آمار تأکید دارد که می‌تواند دقت نقشه‌های رطوبتی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. به‌طور کلی، این یافته‌ها در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی اکوسیستم‌های جنگلی، به‌ویژه در ارزیابی و حفظ رطوبت خاک، کاربردهای مهمی دارند.

کریجینگ معمولی با کمترین مقدار RMSE نشان می‌دهد که این روش برای شرایطی که وابستگی فضایی قوی‌تری در فواصل کوتاه وجود دارد، مناسب‌تر است. واریوگرام نمایی به دلیل حساسیت بالای خود به تغییرات سریع در فواصل کوتاه، در ترکیب با کریجینگ معمولی نتایج بهتری ارائه می‌دهد؛ زیرا کریجینگ معمولی با تخمین میانگین متغیرها به‌صورت محلی، می‌تواند به‌خوبی با این تغییرات سازگار شود (Cui *et al.*, 1995). جهت شمالی به دلیل داشتن تاج پیوسته‌تر و پوشش کف بیشتر در طول سال، ماده آلی بیشتر و عمق و ساختار بهتر خاک، به‌طور معمول می‌تواند وضعیت بهتری در حفظ رطوبت خاک داشته باشد؛ بنابراین، نسبت به جهت جنوبی که ناهمگن‌تر است، ناهمگنی کمتری در رطوبت خاک دارد؛ به این معنا که در فواصل کوتاه، تغییرات رطوبت خاک کمتر است (Geroy *et al.*, 2011). به‌طور کلی کریجینگ ساده برای واریوگرام‌های خطی یا شرایطی که تغییرات فضایی یکنواخت‌تر هستند مناسب‌تر است، در حالی که کریجینگ معمولی برای واریوگرام نمایی به دلیل توانایی در تخمین تغییرات سریع در فواصل کوتاه، دقت بیشتری دارد (Taharin & Roslee, 2021). نتایج این تحقیق با مطالعات Barry و Hoef (۱۹۹۶) که نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های واریوگرام خطی در کریجینگ ساده می‌تواند به‌طور قابل توجهی خطاها را کاهش دهد همخوانی دارد. در این مطالعه، واریوگرام خطی به‌عنوان گزینه مناسبی برای داده‌های ساده و پیوسته معرفی شده است. Oliver و Webster (۲۰۱۴) نیز در پژوهش خود نتیجه‌گیری کرده‌اند که برای داده‌هایی که تغییرات سریع در فواصل کوتاه دارند، استفاده از واریوگرام نمایی در کریجینگ معمولی می‌تواند نتایج بهتری به همراه داشته باشد. همچنین Matheron (۲۰۱۹) در فصل مربوط به کریجینگ، به کاربرد واریوگرام‌های خطی در کریجینگ ساده و واریوگرام‌های پیچیده‌تر مانند نمایی در کریجینگ

References

- Aazami, A., Hosseini, A., & Hoseinzadeh, J. (2018). The effect of depth and aspect on soil moisture in dieback affected Oak forests (Case study: Meleh Siah Forest, Ilam Province). *Ecology of Iran Forest*, 6(11), 41-50. <https://doi.org/10.29252/ifej.6.11.41> (In Persian)
- 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>
- 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)
- Azizi, E., Tavakoli, M., Karimi, H., & Faramarzi, M. (2019). Evaluating the efficiency of the neural network compared to other methods in predicting drought in arid and semi-arid regions of western Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 489. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4654-z>
- Barry, R. P., & Hoef, J. (1996). Blackbox Kriging: Spatial prediction without specifying variogram models. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*, 1(3), 297-322. <https://doi.org/10.2307/1400521>
- Brus, D., & Heuvelink, G. (2007). Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 138(1-2), 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.016>
- Cui, H., Stein, A., & Myers, D. (1995). Extension of spatial information, Bayesian kriging and updating of prior variogram parameters. *Environmetrics*, 6(4), 373-384. <https://doi.org/10.1002/env.3170060406>
- Denkovski, D., Atanasovski, V., Gavrilovska, L., Riihijärvi, J., & Mähönen, P. (2012). *Reliability of a radio environment map: Case of spatial interpolation techniques*. 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 248-253. <https://doi.org/10.4108/ICST.CROWNCOM.2012.248452>
- Famiglietti, J.S., Ryu, D., Berg, A.A., Rodell, M., & Jackson, T.J. (2008). Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resources Research*, 44(1). <https://doi.org/10.1029/2006WR005804>
- 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)
- Fathizadeh, O., Hosseini, S.M., Zimmermann, A., Keim, R.F., & Bolorani, A.D. (2017). Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. *Science of the Total Environment*, 601-602, 1824-1837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.233>
- Geroy, I.J., Gribb, M.M., Marshall, H.P., Chandler, D.G., Benner, S.G., & McNamara, J.P. (2011). Aspect influences on soil water retention and storage. *Hydrological Processes*, 25(25), 3836-3842. <https://doi.org/10.1002/hyp.8281>
- Ghaisvandi, A. (2013). GIS in natural studies. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (Sepehr)*, 22(85), 98-101. <https://doi.org/10.25883860.1392.2.851.14.3> (In Persian)
- 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. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.13571.2826> (In Persian)
- Goebes, P., Schmidt, K., Seitz, S., Both, S., Bruelheide, H., Erfmeier, A., Scholten, T., & Kühn, P. (2019). The strength of soil-plant interactions under forest is related to a Critical Soil Depth. *Scientific Reports*, 9, 8635. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45156-5>
- Han, H., & Suh, J. (2024). Spatial Prediction of Soil Contaminants Using a Hybrid Random Forest–Ordinary Kriging Model. *Applied*

- Sciences*, 14(4), 1666.
<https://doi.org/10.3390/app14041666>
- Hasanipak, A. (2007). *Geostatistics*. Tehran, University of Tehran Press. Pp 380.
- Hayati, E., Abdi, E., Saravi, M., Nieber, J., Majnounian, B., Chirico, G., Wilson, B., & Nazarirad, M. (2018). Soil water dynamics under different forest vegetation cover: Implications for hillslope stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), 2106-2120.
<https://doi.org/10.1002/esp.4376>
- Heshmati, M., Gheitury, M., & Arabkhedri, M. (2020). Mitigating drought induced-mortality in the semiarid forests through runoff harvesting system; as a short-term adaptation measure. *Desert*, 25, 239-248.
<https://doi.org/10.22059/JDESERT.2020.79489>
- Heydari, M., Cheraghi, J., Omidipour, R., Mirab-Balou, M., & Pothier, D. (2021). Beta diversity of plant community and soil mesofauna along an elevational gradient in a mountainous semi-arid Oak forest. *Community Ecology*, 22, 165-176.
<https://doi.org/10.1007/s42974-021-00046-7>
- Heydari, M., Karami, O., Rostami, N., & Faramarzi, M. (2020). Assessment of protected vs. degraded oak forests: A geostatistical approach based on soil and plant diversity. *Journal of plant Ecosystem conservation*, 8(17), 195-218.
- Hosseinqolizade, A., Zeaiean, P., & Beyranvand, P. (2020). Comparison of different retrieval temperature algorithms with different emissivity by using remote sensing images. *Journal of Geographical Space*, 72, 39-56. (In Persian)
- Hosseinzadeh, J., Tongo, A., Najafifar, A., & Hosseini, A. (2018). Relationship between soil moisture changes and climatic indices in the MeleSiah Forest site of Ilam Province. *Journal of Water and Soil*, 32(4), 821-830.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v32i4.71927>
(In Persian)
- Jamei, M., Mousavi, M., Alizadeh, A., & Irannejad, P. (2017). Validation of soil moisture retrievals from SMOS Microwave Satellite. *Journal of Water and Soil*, 31(2), 660-672.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v31i2.59170>
- 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.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2190853>
- Khatami, S., & Khazaei, B. (2014). Benefits of GIS Application in Hydrological Modeling: A Brief Summary. *Journal of Water Management and research*, 70, 41-49.
- 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.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-b2-211-2016>
- Matheron, G. (2019). *Kriging*. In: *Matheron's Theory of Regionalised Variables*. Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780198835660.003.0004>
- Moradi, A., & Shabanian, N. (2023). Sacred groves: A model of Zagros forests for carbon sequestration and climate change mitigation. *Environmental Conservation*, 50(3), 163-168.
<https://doi.org/10.1017/S0376892923000127>
- Oliver, M., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, 113, 56-69.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Pan, X., Zhang, J., Huang, P., & Roth, K. (2012). Estimating field-scale soil water dynamics at a heterogeneous site using multi-channel GPR. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4361-4372.
<https://doi.org/10.5194/hess-16-4361-2012>
- Pelletier, J., Barron-Gafford, G., Gutiérrez-Jurado, H., Hinckley, E.S., Istanbuloglu, E., McGuire, L., Niu, G., Poulos, M., Rasmussen, C., Richardson, P., Swetnam, T., & Tucker, G. (2018). Which way do you lean? Using slope aspect variations to understand Critical Zone processes and feedbacks. *Earth Surface Processes and*

- Landforms*, 43(6), 1133-1154.
<https://doi.org/10.1002/esp.4306>
- Perrier, E., & Salkini, A. (1991). Soil Water Measurement. In: Perrier, E.R., Salkini, A.B., Ward, C.F. (eds) Supplemental Irrigation in the Near East and North Africa. Springer, Dordrecht.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-3766-9_8
- Premudha, 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.
<https://doi.org/10.48175/ijarsct-18218>
- Rafiei, H., Jafari, A., Salimian, S., & Nateghi, M. B. (2018). *Estimation of soil saturation moisture percentage using kriging and regression-kriging methods*. First International Conference and Third National Conference on Sustainable Management of Soil and Environmental Resources. (In Persian)
- 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.
<https://doi.org/1109/EMBC44109.2020.9175457>
- 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. (In Persian)
- 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.
- Taharin, M. R., & Roslee, R. (2021). The application of semi variogram and ordinary kriging in determining the cohesion and clay percentage distribution in hilly area of Sabah, Malaysia. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 16(5), 525-53.
<https://doi.org/10.18280/ijdne.160506>
- Tu, L., Ha, P., Tram, V., Thuy, N., Phuong, D., Nhat, T., & Loi, N. (2023). GIS application in environmental management: A Review. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*.
<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4957>.
- Varga, C., & Csiszér, L. (2020). The influence of slope aspect on soil moisture. *Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment*, 12, 82-93.
<https://doi.org/10.2478/ausae-2020-0007>
- Wang, M., Shi, S., Lin, F., Hao, Z. Q., Jiang, P., & Dai, P. (2012). Effects of soil water and nitrogen on growth and photosynthetic response of Manchurian ash (*Fraxinus mandshurica*) seedlings in northeastern China. *PLOS One*, 7(2), e30754.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030754>
- Yao, X., Fu, B., Lü, Y., Sun, F., Wang, S., & Liu, M. (2013). Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment. *PLOS One*, 8 (1), e54660.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054660>
- Yu, B., Liu, G., Liu, Q., Wang, X., Feng, J., & Huang, C. (2018). Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 165, 125-132.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.020>
- Zhang, J., Li, X., Yang, R., Liu, Q., Zhao, L., & Dou, B. (2017). An Extended Kriging method to interpolate near-surface soil moisture data measured by wireless sensor network. *Sensors*, 17(6), 1390.
<https://doi.org/10.3390/s17061390>