

Spectral analysis-artificial intelligence model with spatial variables for some soil chemical properties estimation

Laleh Parviz^{1*} , Neda Azizi² , Mahsan Kafili-Golgasem² 

¹ Associate Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

² Former B.Sc. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Extended Abstract

Introduction

The lack of scale-dependent information related to soil properties has largely led to limitations in agriculture, hydrology, climate, ecology, and environmental studies. In this regard, the study aims to analyze the scale-dependent changes in estimating the spatial distribution of soil pH and salinity in Tabriz. The proposed method applies the decomposition approach to increase the accuracy of soil properties spatial distribution estimation which includes creating a relationship between soil salinity and pH with the sub-series of input variables from the decomposition method, construction of a relationship between soil salinity and pH sub-series with sub-series of input variables and finally, using a data reduction approach for the effective sub-series determination from decomposition.

Materials and Methods

The sampling points of the study are related to Tabriz City in East Azerbaijan province. 60 and 38 samples were collected from zero to 20 cm depth for soil pH and salinity monitoring, respectively. Changes in soil properties are evident from one region to another. The cyclical behavior of soil properties is called periodicity. Previous studies in the spatial changes description have mainly focused on the spatial similarities obtained between properties in a region, in which the change of spatial arrangement-spatial dependence or periodicity of soil properties has not been regarded. Spectral analysis can measure the periodicity in spatial changes by approximating a series of spatial data with the sum of sine and cosine functions. The purpose of discrete wavelet transformation is to decompose the signal into the sub-series to obtain a comprehensive input signal analysis. Discrete wavelet transform is used to calculate approximation coefficients in a signal. Maximum overlap discrete wavelet transform (MODWT) is similar to discrete wavelet transform in which low and high pass filters are applied to the input signal at each level. However, the elimination of coefficients is not done by MODWT. Principle component analysis (PCA) was used as the reduction method to find the effective sub-series of decomposition.

Results and Discussion

In this study, 48 and 12 points were used in soil pH modeling, and 30 and eight points were used in soil salinity modeling in the calibration and validation periods, respectively. Longitude, latitude, height above sea level, slope, and slope aspect were considered as the spatial variables, and the longitude, latitude, and height of sampling points were recorded by GPS, but the slope and slope aspect of sampling points were taken from the production maps of slope and direction. They were extracted from the digital elevation model (DEM) map. The changes in accuracy measurement indices show the variation in the estimated soil salinity and pH against different inputs of the support vector regression (SVR) model. In the case of salinity, analyzing only the aspect of slope has been able to increase the accuracy of the measurement indices, the reduction rate of RMSE, RRMSE, and Var from the previous optimal state without decomposition to decomposition state is three, four, and 20%, respectively, and the rate of the residual predictive deviation (RPD) increase is equal to four percent. Based on the values of the accuracy measurement indices, PCA can increase the accuracy of the estimated values. The box plot of data related to the use of principal component analysis has become closer to the box plot of the observation data compared to the case where only the decomposition method was used. This problem



shows the increase in accuracy with a combination of the MODWT spectral approach and the PCA data reduction method.

Conclusion

In recent years, there has been an increasing demand for soil spatial distribution information in environmental decision-making and land use management. One of the issues that can affect the accuracy of spatial modeling of soil properties is the spatial information increase of input variables to the model. Modeling sub-series of input variables with sub-series of soil properties and finally the sum of estimated sub-series of soil properties could not increase the accuracy of estimated values. Series decomposition could increase the accuracy of estimates. The factors that can affect the accuracy of the proposed method for determining the spatial changes of soil properties include the type of input variables, the type of used model in the modeling process, the use of the appropriate method in spectral analysis, and determining the effective factors in the decomposition method. Therefore, the combination of spectral analysis and artificial intelligence as an effective option can increase the accuracy of the spatial distribution of soil properties.

Keywords: Decomposition, MODWT, Principle component analysis, Scaling

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to Azarbaijan Shahid Madani University for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Laleh Parviz: Visualization, supervision, conceptualization, formal analysis and investigation, writing-original draft preparation; **Neda Azizi:** Sampling, methoatadology; **Mahsan Kafili-Golgasem:** Sampling, methoatadology.

*Corresponding Author, E-mail: laleh_parviz@yahoo.com

Citation: Parviz, L., Azizi, N., & Kafili-Golgasem, M. (2024). Spectral analysis-artificial intelligence model with spatial variables for some soil chemical properties estimation. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 321-338.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13308.1321

Received: 14 July 2023, Received in revised form: 11 August 2023, Accepted: 13 August 2023, Published online: 13 August 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 321-338

Publisher: University of MohagheghArdabili© Author(s)





مدل تحلیل طیفی-هوش مصنوعی با متغیرهای مکانی در تخمین برخی ویژگی های شیمیایی خاک

لاله پرویز^{۱*}، ندا عزیزی^۲، مهسان کفیلی قولقاسم^۲

^۱دانشیار، گروه گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

^۲دانش آموخته کارشناسی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

عدم وجود اطلاعات با وابستگی مکانی در مورد خصوصیات خاک تا حد زیادی منجر به محدودیت در مطالعات کشاورزی، هیدرولوژی، آب و هوا، بوم‌شناسی و محیط زیست شده است. در این راستا، هدف تحقیق تحلیل تغییرات با وابستگی مکانی در تخمین توزیع pH و شوری خاک در محدوده شهر تبریز است. متغیرهای ورودی به مدل رگرسیون بردار پشتیبان طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت شیب بودند. روش پیشنهادی در نحوه مدل سازی در سه گروه تقسیم بندی شد که در گروه اول مدل سازی بین زیرسری های حاصل از تجزیه با استفاده از تبدیل موجک گسسته حداکثر هم پوشانی (MODWT) با خصوصیات خاک، در گروه دوم مدل سازی بین زیرسری های حاصل از تجزیه و زیرسری های خصوصیات خاک و در گروه سوم مدل سازی بین زیرسری های مؤثر حاصل از تحلیل مؤلفه های اصلی و خصوصیات خاک بود. بدون هیچ گونه تجزیه سری، تغییر در نوع متغیرهای ورودی تخمین هایی با درجه دقت مختلف را ایجاد کرد، به طوری که مقادیر کاهش انحراف معیار خطای پیش بینی (Var) و افزایشی انحراف پیش بینی باقی مانده (RPD) در تخمین pH خاک با متغیرهای ورودی طول، عرض جغرافیایی و ارتفاع به متغیرهای ارتفاع، شیب و جهت شیب و ۱۳ درصد شد. تجزیه سری با MODWT حالت های مختلفی را در نتایج تخمینی داشت، به طوری که مقادیر افزایشی RPD با تجزیه سری جهت شیب در تخمین pH خاک ۱۵ درصد و مقادیر کاهش Var در تخمین شوری خاک ۲۰ درصد بود. مدل سازی زیرسری های متغیرهای ورودی با زیرسری های خصوصیات خاک و در نهایت جمع زیرسری های تخمینی خصوصیات خاک، نتوانست دقت مقادیر تخمینی را افزایش دهد. نمودار جعبه ای و درختی نشان دادند که تحلیل مؤلفه های اصلی با تعیین زیرسری های مؤثر دقت تخمین خصوصیات خاک را افزایش داد (کاهش چهار و دو درصد خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) در pH و شوری). اگر مقایسه ای بین روش تجزیه سری با MOWTD (کاهش ۱۲ درصد RMSE در تعیین pH) و استفاده از تجزیه مؤلفه ها (کاهش چهار درصد RMSE) در روند تجزیه در نظر گرفته شود، تأثیر تجزیه سری در افزایش دقت برآورد توزیع مکانی بیش تر است.

واژه های کلیدی: تجزیه، تجزیه مؤلفه های اصلی، مقیاسی، MODWT

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: laleh_parviz@yahoo.com

استناد: پرویز، لاله، عزیزی، ندا، و کفیلی قولقاسم، مهسان (۱۴۰۳). مدل تحلیل طیفی-هوش مصنوعی با متغیرهای مکانی در تخمین برخی از خصوصیات شیمیایی خاک. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۳۲۱-۳۳۸.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13308.1321

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۳۲۱ تا ۳۳۸

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

بررسی مقدار و تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به‌علت تأثیر آن بر عواملی مانند نفوذ از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌عنوان نمونه ارزیابی توزیع مکانی بافت و pH خاک به‌علت تأثیر بر ساختار خاک، حاصل‌خیزی و هدایت هیدرولیکی مهم است. در واقع آگاهی از تغییرات مکانی بافت خاک و pH در مدیریت پایدار خاک نقش اساسی دارد (Pahlavan-Rad and Akbarimoghaddam, 2018; Basati et al., 2022). تغییرات مکانی و زمانی خصوصیات خاک نقش مهمی در رشد و عملکرد محصول در سامانه کشاورزی ایفا می‌کند (Chen et al., 2021). تغییرات خاک وابسته به مقیاس است. عوامل مختلفی بر تغییرات در مقیاس‌های مختلف تأثیرگذار هستند و ممکن است رابطه مقیاس بزرگ برای یک مقیاس کوچک‌تر برقرار نباشد. به‌عنوان نمونه عوامل مؤثر بر ذخیره کربن آلی خاک در مقیاس‌های مکانی مختلف از مقیاس کوچک تا مقیاس بزرگ‌تر شناسایی شدند. آب و هوا و پوشش گیاهی در مقیاس بزرگ بر ذخیره کربن آلی تأثیر می‌گذارند، درحالی‌که در مقیاس کوچک‌تر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌عنوان عوامل مؤثر هستند (Wiesmeier et al., 2019). تغییرات خصوصیات خاک از مقیاس خرد (مزرعه) تا مقیاس کلی با تفکیک مکانی از چند متر تا یک کیلومتر بررسی شد (نقاطی از تمام قاره‌ها، ۱۵۰۰۰) و به‌صورت نقشه در آمد (Hengl et al., 2017). تغییرات خاک در مقیاس کلی عمدتاً تحت تأثیر آب و هوا، مواد مادری و پوشش گیاهی است. تنوع خاک در مقیاس‌های حوضه آبریز عمدتاً تحت تأثیر توپوگرافی است. اُفق‌های خاک اغلب همگن فرض می‌شوند، درحالی‌که تغییرات زیادی از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی در اُفق خاک مشاهده می‌شود (Zhang and Hartemink, 2021). به‌طورکلی تحقیقات انجام گرفته در زمینه مدل‌سازی توزیع مکانی خصوصیات خاک را می‌توان در دو گروه تقسیم‌بندی کرد: یک گروه بر اساس رابطه بین برخی از خصوصیات خاک با متغیرهای محیطی و مکانی و گروه دیگر بر اساس مفاهیم درون‌یابی هستند (Hashemi et al., 2016; Pahlavan-Rad and Akbarimoghaddam, 2018). از تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، تحقیق Wälder et al. (2008) می‌باشد که ارتفاع، فاصله از رودخانه و اطلاعات آب‌زیرزمینی را به‌عنوان متغیرهای مهم در پیش‌بینی خواص خاک در دشت‌های سلابی در نظر گرفتند. در تحقیق دیگری، Hashemi et al. (2016) از روش کوکریجینگ در تعیین توزیع مکانی شوری و pH خاک در دشت سیستان استفاده کردند. معیارهای ارزیابی، متغیرهای درصد رس، درصد رطوبت اشباع را به‌عنوان متغیرهای کمکی در برآورد توزیع مکانی شوری و pH

خاک معرفی کردند. در تعیین شوری و pH خاک از رویکرد درون‌یابی مانند فاصله وزنی معکوس، کریجینگ و کوکریجینگ در مناطق مختلف از جمله ایران و هند استفاده شد (Shit et al., 2016; Soleimani Sardo et al., 2016). در ادامه، Pahlavan-Rad and Akbarimoghaddam (2018) در شهرستان زهک دشت سیستان در شرق ایران تغییرات بافت و pH خاک را با ایجاد ارتباط بین متغیرهای محیطی و خصوصیات خاک با مدل جنگل تصادفی بررسی کردند. متغیرهای مورد استفاده شامل متغیرهای توپوگرافی مانند ارتفاع، جهت شیب و شاخص NDVI و شاخص شوری استاندارد شده^۱ (NDSI) بودند. نتایج نشان دادند که توزیع رس و pH خاک در منطقه مورد مطالعه مشابه است. فاصله از شبکه رودخانه و کانال به‌عنوان یک متغیر مهم در تحلیل رقومی خاک می‌تواند دقت نقشه‌های پیش‌بینی خصوصیات خاک را در دشت‌های سیلابی افزایش دهد. در چین، Liu et al. (2020) مدل‌سازی بافت خاک را با برخی از متغیرها مانند داده‌های اقلیمی، ارتفاع، شیب و با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی انجام دادند. نتایج نشان داد که نقشه‌های پیش‌بینی شده به‌خوبی می‌توانند تغییرات مکانی بافت خاک را نشان دهند. همچنین، Rezaie et al. (2023) با متغیرهای استخراج شده از مدل رقومی ارتفاعی شامل ارتفاع، تابش پخشیدگی، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی^۲ (NDVI) و شاخص جهت باد، شوری خاک را در محدوده‌ای از اراضی دشت قزوین تعیین کردند. نتایج نشان داد که متغیرهایی مانند ارتفاع، شدت تابش پخشیدگی از عوامل مؤثر بر تغییرات شوری خاک در منطقه هستند. در تحقیقات انجام گرفته دو عامل نوع متغیرهای ورودی یا کمکی و نوع روش مورد استفاده در مدل‌سازی به‌عنوان عامل مؤثر در افزایش کارایی توزیع مکانی خصوصیات خاک در نظر گرفته شده است، که این دو عامل به‌طور گسترده در تحقیقات بررسی و مطالعه شده‌اند. مسأله‌ای که کم‌تر به آن پرداخته شده است، دید جزئی‌تر نسبت به تغییرات مکانی عوامل مؤثر بر خصوصیات خاک است.

متغیرهای محیطی در فرکانس‌ها و مقیاس‌های مختلف عمل می‌کنند و در نتیجه وابستگی مقیاسی خصوصیات خاک را نشان می‌دهند. از جمله رویکردهای پیشنهادی در اندازه‌گیری تغییرات وابستگی مقیاسی خصوصیات خاک، تجزیه سری کاربردی با روش‌های مختلف مانند تبدیل موجک است (Wei et al., 2021). در تحقیقی، Song et al. (2021) تحلیل طیفی را در تخمین pH، درصد رس و محتوی کربن آلی خاک در جنوب‌غربی استرالیا به‌کار بردند. تجزیه با رویکرد موجک و تاکید

¹ Normalized difference salinity index

² Normalized difference vegetation index

یک و یک به پنج آب به خاک). اطلاعات مکانی نقاط نمونه‌برداری شده با سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت شدند. کمینه و بیشینه مقادیر ارتفاعی نقاط نمونه‌برداری به ترتیب ۱۳۱۴/۳ و ۱۶۴۶/۰۳ متر است. اقلیم ایستگاه تبریز براساس شاخص دومارتن نیمه‌خشک است. متوسط بارندگی سالانه ۲۵۲/۸۴ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۳ درجه سانتی‌گراد است. در سال‌های اخیر نوسانات اقلیمی و تغییرات حاکم در دریاچه ارومیه منجر به تغییرات اساسی در خصوصیات خاک منطقه شده است. بنابراین، پایش وضعیت خاک منطقه بسیار ضروری است. قسمت شمالی شهر تبریز شامل واحدهای میوسن، قسمتی از جنوب، شرق و شمال شرقی شامل لایه‌های ماهی‌دار است و قسمتی از جنوب شهر روی واحدهای آذرآواری سپند با سن کواترنر پیشین و قسمت مرکزی و غربی و دشت تبریز روی رسوبات آبرفتی قرار گرفته که شامل سیلت، شن، رس و ماسه هستند. از سمت شرق به غرب از اندازه ذرات کاسته می‌شود.

۲-۲- تجزیه طیفی

تغییرات خصوصیات خاک از یک منطقه به منطقه دیگر مشهود است. رفتار دوره‌ای خصوصیات خاک تناوب نام دارد. تغییر در ویژگی‌های خاک می‌تواند روندهای مکانی، خطی یا غیرخطی را ایجاد کند که منجر به نالیستایی می‌شود. نالیستایی می‌تواند به دلیل اثرات توپوگرافی، زمین‌شناسی، مواد مادری، اقلیم و پوشش گیاهی باشد که منجر به تشکیل لایه‌های مختلف یا انواع خاک‌های مختلف می‌شود. تغییرات مکانی خاک (ایستا یا غیرایستا) را می‌توان با تعدادی سری فوریه در دوره‌های مختلف نشان داد. هر سری دارای یک فرکانس و دوره مشخص است که می‌تواند فرآیند پایه‌ای را نشان دهد که این فرآیند خود منبع تغییرات است. هنگامی که یک یا چند فرآیند بیش‌ترین سهم را در واریانس کل داشته باشند، می‌توان دوره یا مقیاس‌های آن‌ها را شناسایی کرد که در نمونه‌برداری، مدیریت و شناسایی خاک کمک شایانی می‌کند. برخی از فرآیندها ممکن است در یک مقیاس غالب باشند، درحالی‌که برخی دیگر در مقیاس دیگری غالب هستند که تغییرات کلی را وابسته به مقیاس می‌کند. فرآیندها در طیف وسیعی از مقیاس‌های مکانی عمل می‌کنند. تحقیقات قبلی در توصیف تغییرات مکانی عمدتاً بر شباهت‌های مکانی به‌دست آمده بین خواص در یک منطقه متمرکز بوده‌اند و تغییر آرایش مکانی یا تناوب خصوصیات خاک مدل‌سازی نشده است. تناوب در تغییرات مکانی را می‌توان از تجزیه طیفی که یک سری داده‌های مکانی را با مجموع توابع سینوسی و کسینوسی تقریب می‌کند، اندازه‌گیری کرد. تجزیه طیفی فرض می‌کند که سری مکانی سری ایستای مرتبه دوم است (میانگین و

بر میزان بازتاب مرئی-مادون قرمز نزدیک بود. ۳/۵ درصد تا ۴۹/۱ درصد بهبود در مقادیر تخمینی با استفاده از تجزیه در مدل‌سازی مشاهده شد. همچنین، Wei et al. (2021) از تبدیل موجک گسسته^۱ (DWT) در تعیین توزیع مکانی شوری خاک استفاده کردند. ۱۳ متغیر محیطی در زمینه اقلیم، خاک، پوشش گیاهی در چین استخراج شدند. هر کدام از سری‌های شوری خاک و متغیرهای محیطی به تعدادی زیرسری تقسیم شدند (D1 تا D6 شامل سری جزئیات و A6 سری تقریب). از D1 به D6 نوسانات کاهش یافت. محاسبه ضریب همبستگی زیرسری متغیرهای محیطی و زیرسری شوری در مقیاس‌های مختلف (از D1 تا D6 و A6) نشان دادند که با افزایش مقیاس، ضریب همبستگی بین زیرسری‌های متغیرهای وابسته و مستقل افزایش می‌یابد. مدل‌سازی زیرسری‌های حاصل از DWT با رگرسیون خطی چندمتغیره انجام گرفت و نتایج حاکی از بهبود معیارهای ارزیابی نسبت به حالت بدون تجزیه بود.

تحقیقات انجام گرفته حاکی از افزایش دقت در برآورد خصوصیات خاک با استفاده از رویکرد تجزیه متغیرهای حاکم بر مدل‌سازی است که کم‌تر به این مسأله در مطالعات خاک‌شناسی در کشور پرداخته شده است. در این راستا، یکی از عوامل افزایش دقت در تعیین توزیع مکانی خصوصیات خاک استفاده از روش دقیق در روند تجزیه است. هدف تحقیق حاضر استفاده از تبدیل موجک گسسته حداکثر هم‌پوشانی^۲ (MODWT) در روند مدل‌سازی متغیرهای مکانی در تخمین شوری و pH خاک است. روش پیشنهادی در تلفیق رویکرد تجزیه با مدل هوش مصنوعی جهت تخمین توزیع مکانی خصوصیات خاک شامل ایجاد رابطه شوری و pH خاک با زیرسری‌های حاصل از تجزیه، مورد دوم ایجاد رابطه بین زیرسری‌های شوری و pH خاک با زیرسری‌های متغیرهای مکانی و در نهایت استفاده از رویکرد کاهش داده در تعیین زیرسری مؤثر است.

۲- مواد و روش‌ها

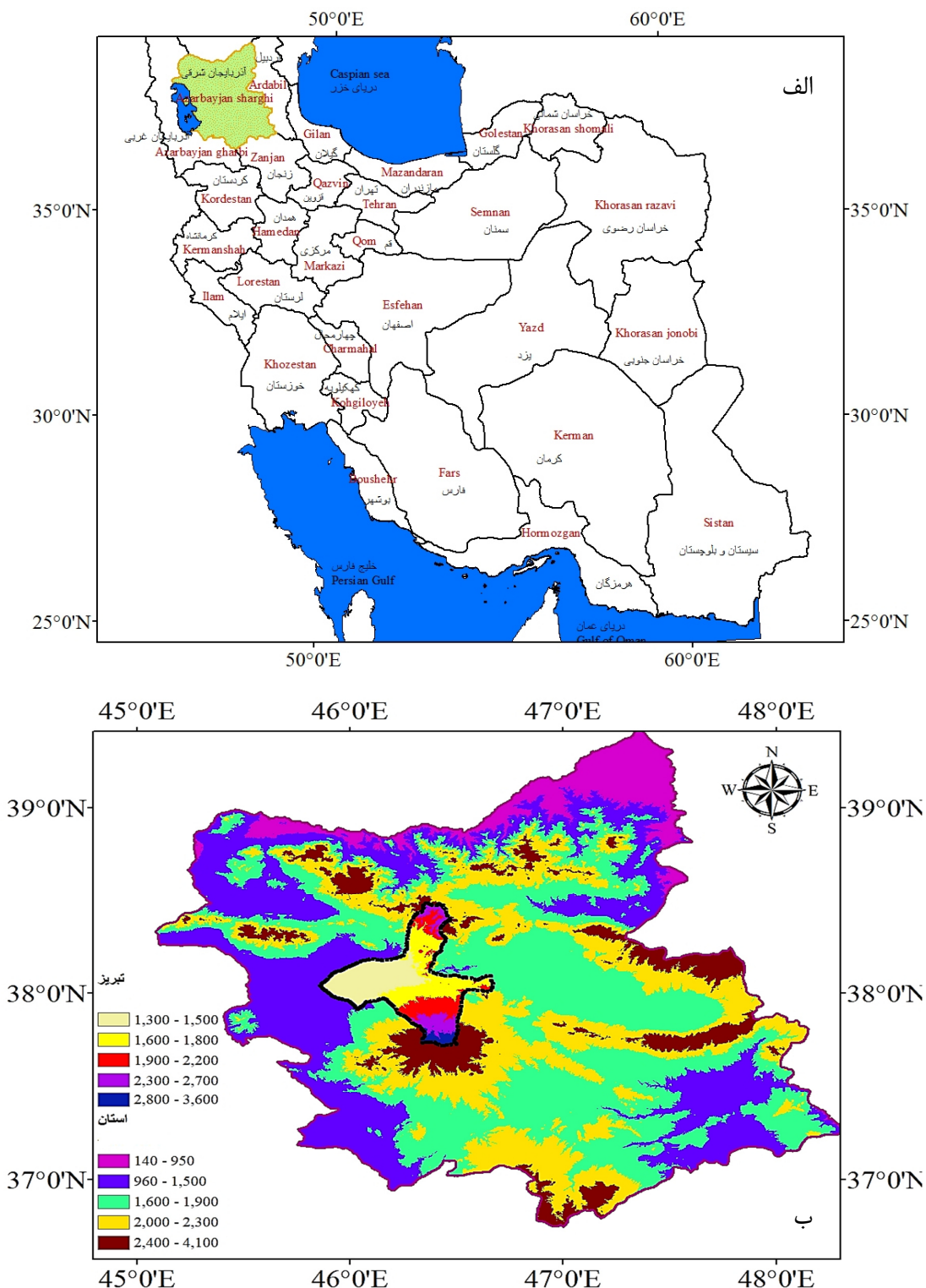
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

نقاط نمونه‌برداری مربوط به محدوده شهر تبریز در استان آذربایجان شرقی (شکل ۱) است. تعداد ۶۰ نمونه در پایش pH خاک و ۳۸ نمونه در پایش شوری خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری برداشت شد. بعد از انجام مراحل اولیه آزمایش شامل هوا خشک کردن نمونه‌ها و الک کردن نمونه‌های برداشت شده با الک دو میلی‌متری، عصاره‌های خاک تهیه شدند (نسبت یک به

¹ Discrete wavelet transform

² Maximal overlap discrete wavelet transform

وارپانس سری محدود و ثابت). این فرض سخت‌گیرانه‌تر از مفروضات ایستایی ذاتی زمین آمار است. در ادامه روش مورد استفاده تحقیق در زمینه تحلیل طیفی توضیح داده می‌شود.



شکل ۱- موقعیت استان مورد مطالعه در کشور (الف) و موقعیت شهر تبریز در استان آذربایجان شرقی در نقشه DEM (ب)
 Figure 1- The location of the studied Province in the country (a), and location of Tabriz City in East Azarbaijan province in DEM map (b)

۲-۱- تبدیل موجک گسسته حداکثر هم‌پوشانی (MODWT)

هدف تبدیل موجک گسسته، تجزیه سیگنال به یک سری توابع اساسی به نام موجک است تا تجزیه خوبی از سیگنال ورودی به دست آید. تبدیل موجک گسسته جهت محاسبه ضرایب تقریب در یک سیگنال استفاده می‌شود. تبدیل موجک گسسته حداکثر هم‌پوشانی مشابه تبدیل موجک گسسته است که فیلترهای پایین و بالاگذر به سیگنال ورودی را در هر سطح اعمال می‌کند. با این حال این روش ضرایب را حذف نمی‌کند و تعداد موجک و ضرایب مقیاس‌گذاری با هر تعداد نمونه و در هر سطح از تبدیل یکسان هستند. به عبارت دیگر ضرایب MODWT نتیجه یک تغییر ساده در الگوریتم هرمی مورد استفاده در محاسبه ضرایب تبدیل موجک گسسته را از طریق عدم نمونه‌برداری خروجی در هر مقیاس و درج صفر در بین ضرایب فیلترهای مقیاس و موجک مد نظر قرار می‌دهد. به همین دلیل می‌توان عناوین دیگری هم برای MODWT در نظر گرفت: تبدیل موجک گسسته تلف نشده، تبدیل موجک گسسته ایستا و تبدیل موجک گسسته تغییرناپذیر با زمان (Dghais and Ismail, 2013). اطلاعات با فرکانس بالای استخراج شده توسط MODWT ضرایب موجک و اطلاعات فرکانس پایین به عنوان ضرایب مقیاس نامیده می‌شوند. اطلاعات فرکانس بالا و پایین با فیلترهای بالا و پایین گذر به دست می‌آیند که به ترتیب به عنوان فیلترهای موجک و مقیاس شناخته می‌شوند. MODWT نسبت به تبدیل موجک گسسته دارای مزایایی است که در ادامه به چهار مورد آن اشاره می‌شود: (۱) MODWT می‌تواند هر اندازه نمونه را مدیریت کند. (۲) ضرایب تجزیه چند تفکیکی MODWT با فیلترهای فاز صفر مرتبط هستند. (۳) MODWT یک تبدیل ثابتی است، چرا که تغییر در سیگنال ورودی ضرایب تبدیل موجک را تغییر نمی‌دهد. (۴) MODWT دارای تخمین واریانس موجک کارا نسبت به تبدیل موجک گسسته است (Dghais and Ismail, 2013). جهت ایجاد و ساخت MODWT فیلترهای مقیاس‌گذاری مجدد لازم است (رابطه ۱). بنابراین فیلترها، فیلترهای چهارگانه آینه‌ای هستند. فیلتر موجک باید ویژگی‌هایی را برآورد کند (رابطه ۲).

$$\tilde{g}_1 = \frac{g_1}{\sqrt{2}} \tilde{h}_1 = \frac{h_1}{\sqrt{2}} \rightarrow \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}_1^2 = \frac{1}{2} \quad (1)$$

$$\sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}_1 = 0$$

$$\sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}_1^2 = \frac{1}{2} \quad (2)$$

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} \tilde{h}_1 \tilde{h}_{1+2r} = 0$$

در روابط بالا، L طول فیلتر موجک، h و g فیلترهای موجک و مقیاس. الگوریتم هرمی MODWT، ضرایب موجک (d_{j,n}) و ضرایب مقیاس c_{j,n} را تولید می‌کند و همگشت‌ها در رابطه (۳) نوشته شده‌اند.

$$d_{j,n}^M = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}_l C_{j-1,(n-2^j l-1) \bmod N}^M \quad (3)$$

$$c_{j,n}^M = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}_l C_{j-1,(n-2^j l-1) \bmod N}^M$$

در رابطه فوق، M دلالت بر MODWT، n طول سری زمانی تحلیلی، h و g فیلترهای موجک و مقیاس. رابطه (۳) براساس فیلتر دایره‌ای و با تعریف فیلترهای بالا و پایین گذر به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$\tilde{h}_{j,l} = \frac{h_{j,l}}{2^{\frac{j}{2}}} \tilde{g}_{j,l} = \frac{g_{j,l}}{2^{\frac{j}{2}}} \quad (4)$$

$$d_{j,n}^M = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}_{j,l} x_{n-1} \bmod N$$

$$c_{j,n}^M = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}_{j,l} x_{n-1} \bmod N$$

در رابطه (۴)، x_n سری زمانی اصلی، h و g فیلترهای موجک و مقیاس. سیگنال اصلی از d_j و c_j با استفاده از الگوریتم هرمی معکوس بازیابی می‌شود (رابطه ۵) و برای هر سطح از مقیاس، میانگین ضرایب موجک برای MODWT باید برابر صفر باشد (رابطه ۶).

$$C_{j-1,n}^M = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}_l d_{j,n+2^j l-1}^M + \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}_l c_{j,n+2^j l-1}^M \quad (5)$$

$$E\{d_{j,n}^M\} = \sum_{l \in Z} \tilde{h}_{j,l} E\{x_{n-1} \bmod N\} = 0 \quad (6)$$

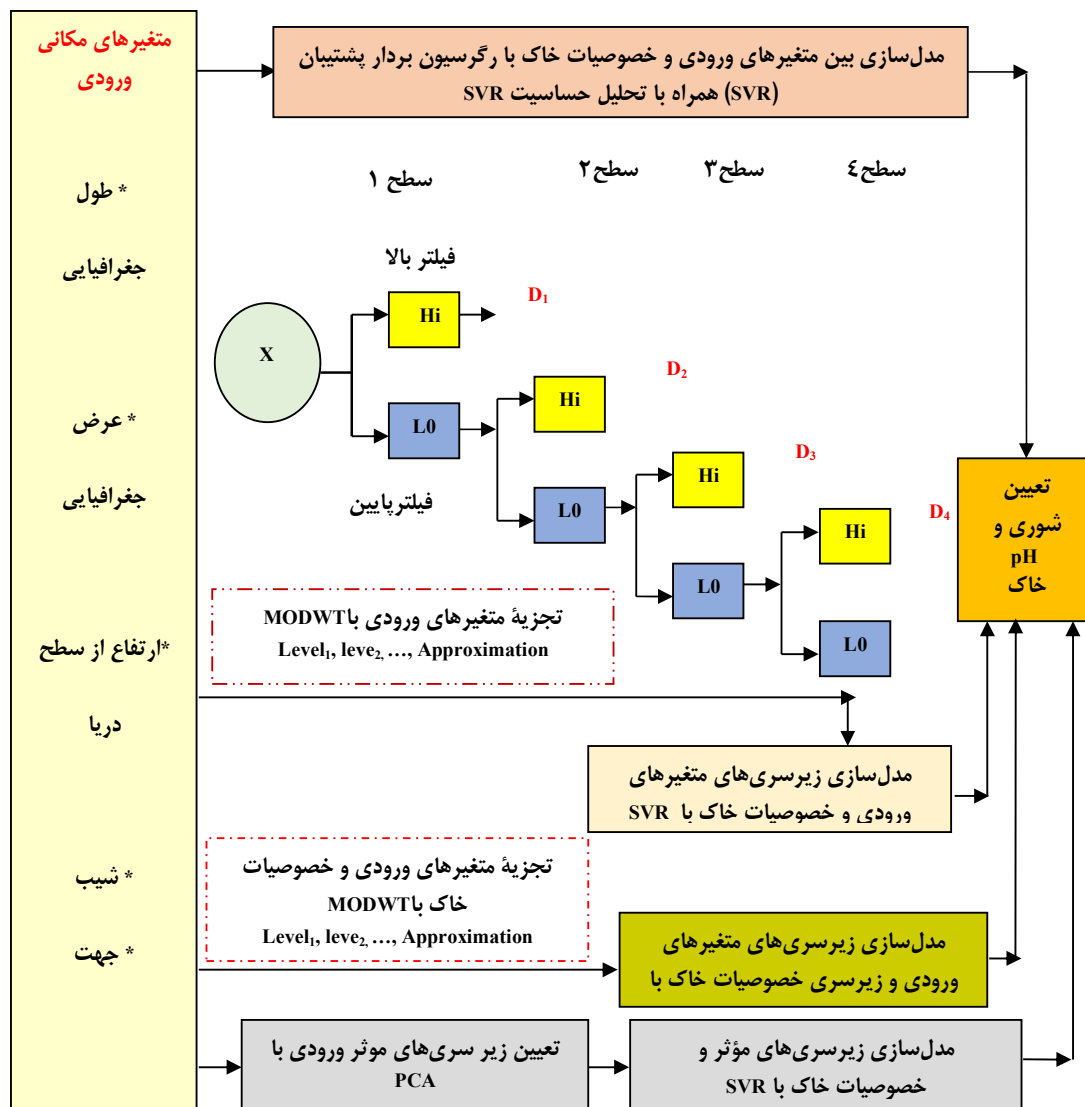
این ویژگی معمولاً در الگوریتم‌های تشخیصی مبتنی بر موجک برای تشخیص جهش‌های ناگهانی در میانگین استفاده می‌شود (Alarcon-Aquino and Barria, 2009). مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.

۲-۳- تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA)

تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک ابزار کاهشی در تعداد است که می‌تواند برای کاهش مجموعه بزرگی از داده‌ها به مجموعه کوچک که حاوی بیش‌تر اطلاعات مجموعه بزرگ است، استفاده شود. PCA یک روش ریاضی است که تعدادی از متغیرهای وابسته را به تعداد کم‌تری متغیر غیروابسته به نام مؤلفه‌های اصلی تبدیل می‌کند. اولین مؤلفه تا آن جایی که ممکن است تغییرپذیری در داده‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. بعد از کاهش متغیرها در مجموعه داده‌ها، PCA امکان شناسایی و مشاهده منبع تغییرات را فراهم و به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود که در آن PC_i مؤلفه مورد نظر، l ضریب متغیرهای اولیه، X متغیر اولیه (Ul-1) (Saufie et al., 2013).

$$PC_i = l_{1i}X_{1+} + l_{2i}X_{2+} + \dots + l_{ni}X_n \quad (7)$$

¹ Principal component analysis



شکل ۲- نمودار جریان تحقیق در تعیین توزیع مکانی دو ویژگی شیمیایی خاک
Figure 2- The flow chart of research in determining the spatial distribution of two soil chemical properties

تخمینی را اندازه گیری می کنند (Kamangar and Minaei, 2023-Beiranvand et al., 2022).

$$e_i = \left| \frac{F_i - O_i}{O_i} \right| \quad (8)$$

$$\text{Var} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (e_i - \hat{e})^2} \quad (9)$$

$$\text{RPD} = \frac{\text{SD}}{\text{RMSE}} \quad (10)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (O_i - F_i)^2} \quad (11)$$

$$\text{RRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}} \quad (12)$$

۲-۴- شاخص های اندازه گیری دقت

جهت ارزیابی تأثیر گزینه های مدنظر در تخمین خصوصیات خاک از برخی شاخص های اندازه گیری دقت استفاده شد که شامل انحراف معیار خطای پیش بینی (Var)، انحراف پیش بینی باقی مانده^۱ (RPD)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و خطای جذر میانگین مربعات نسبی^۳ (RRMSE) هستند و روابط آنها در ادامه آورده شده است (Luo et al., 2021). روند کاهش Var، RMSE، RRMSE و روند افزایشی RPD به عنوان گزینه های بهینه هستند که در نهایت اختلاف داده های واقعی و

¹ Residual predictive deviation

² Root mean square error

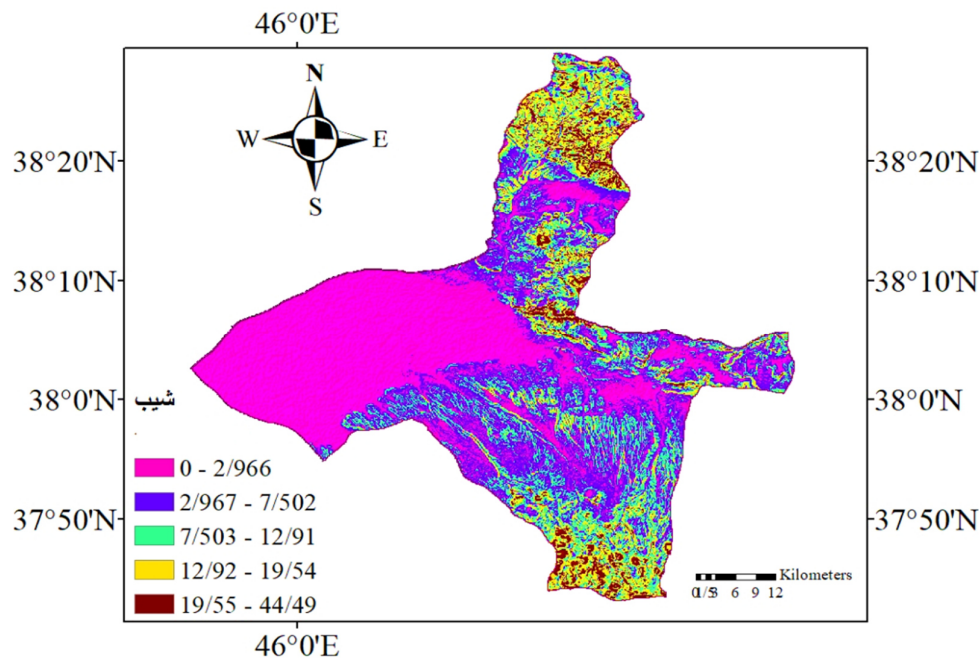
³ Relative root mean square error

ضریب تغییرات در عصاره یک به یک در pH و شوری خاک به ترتیب برابر با ۰/۱۲ و ۰/۶ و در عصاره یک به پنج نیز ۰/۱۳ و ۰/۵۲ بوده است. ضریب تغییرات pH نسبت به شوری کاهش داشته است که این مسأله در تحقیق Foroughifar et al. (2011) در برخی از اراضی شهر تبریز نیز مشاهده شد. کمینه ضریب تغییرات pH خاک در تحقیق Hashemi et al. (2016) در پهنه‌بندی خصوصیات خاک منطقه میانکنگی سیستان و Gholami et al. (2011) در بررسی تغییرات مکانی خاک جنگل‌های حاشیه رودخانه کرخه نیز مشاهده شد. عوامل ذاتی از جمله مواد مادری می‌توانند از دلایل کاهش ضریب تغییرات باشند، درحالی‌که ترکیب عوامل مدیریتی مانند مصرف کود و کاربری اراضی متفاوت و عوامل ذاتی از جمله توپوگرافی و وضعیت زهکشی می‌تواند در افزایش ضریب تغییرات نقش داشته باشد (Foroughifar et al., 2011). بعد از تعیین شوری و pH نمونه‌های خاک برداشتی، اقدام به مدل‌سازی متغیرهای مکانی و خصوصیات خاک شد. طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت شیب متغیرهای مکانی در نظر گرفته شدند که طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع نقاط برداشتی توسط دستگاه GPS ثبت شدند، ولی شیب و جهت شیب نقاط برداشتی از نقشه‌های تولیدی شیب و جهت از روی نقشه DEM شهر تبریز استخراج شدند (شکل ۳).

در روابط بالا، F مقادیر تخمینی، O مقادیر اندازه‌گیری شده، N کل داده‌های بررسی شده، \bar{O} میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده، SD انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده و e خطای نسبی است.

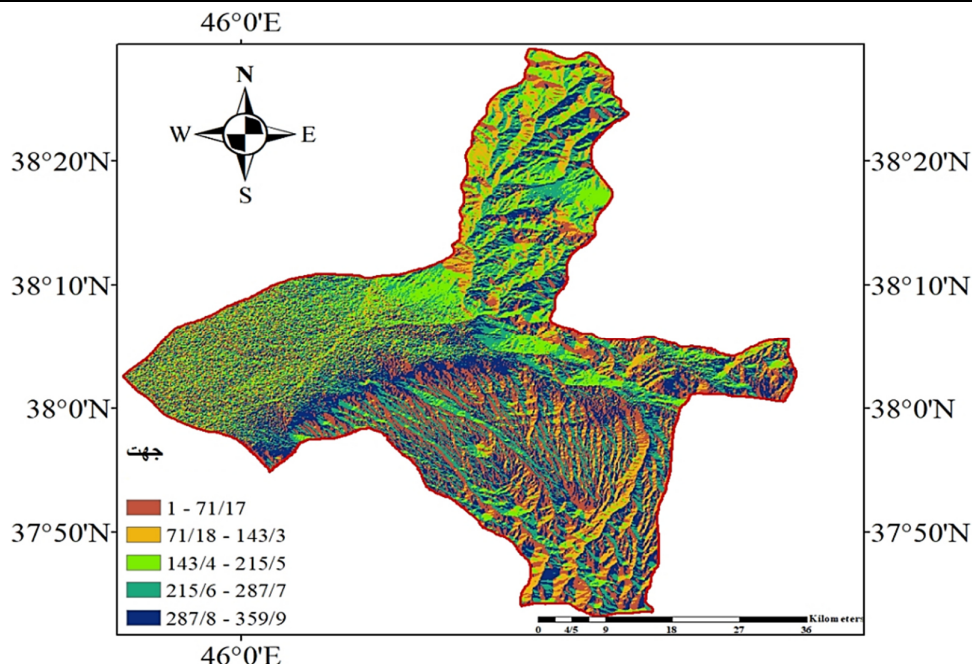
۳- نتایج و بحث

پایه مدل‌سازی متغیرهای مستقل و وابسته، تعیین تعداد داده‌ها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی است. بدین‌منظور در این تحقیق در مدل‌سازی pH خاک از اطلاعات ۴۸ و ۱۲ نقطه و در مدل‌سازی شوری خاک از اطلاعات ۳۰ و هشت نقطه به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد. تعداد نقاط نمونه‌برداری در مطالعات خاک‌شناسی در تحقیق Sarmadian and Taghizadeh Mehrjerdi (2010) ۴۵ نمونه، Farahmand et al. (2012) ۳۰ نمونه، Heidari et al. (2013) ۲۰ نمونه و John et al. (2021) ۳۰ نمونه بود. هدف در انتخاب کلی نقاط نمونه‌برداری، احتساب توزیع مکانی تقریباً کاملی از محدوده مورد مطالعه بود. در مرحله صحت‌سنجی ملاک انتخاب هم نقاطی هستند که در محدوده‌های نزدیک به نقاط بخش واسنجی بودند و هم نقاطی هستند که در محدوده‌های مرحله واسنجی نبودند. متوسط pH منطقه برابر با ۷/۷ بوده است که با مقادیر pH محدوده شهر تبریز در تحقیق Foroughifar et al. (2011) و Jahanbazi et al. (2016) هم‌خوانی دارد.



شکل ۳- نقشه شیب و جهت شیب شهر تبریز در استخراج اطلاعات مکانی نقاط نمونه‌برداری

Figure 3- Slope and aspect map of Tabriz City in the extraction of the spatial information of sampling points



ادامه شکل ۳- نقشه شیب و جهت شیب شهر تبریز در استخراج اطلاعات مکانی نقاط نمونه‌برداری

Continue of Figure 3- Slope and aspect map of Tabriz City in the extraction of the spatial information of sampling points

مختلفی از اطلاعات مکانی نقاط نمونه‌برداری است). به‌عنوان نمونه میزان کاهش RMSE، RRMSE، Var در تخمین pH خاک در عصاره یک به یک با ورودی طول، عرض جغرافیایی و ارتفاع به ارتفاع، شیب، جهت به ترتیب برابر با ۱۲/۱۹، ۱۰/۷۱ و ۵/۸۸ درصد و میزان افزایش RPD ۱۳/۲۵ درصد بود.

میزان کاهش RMSE، RRMSE و Var در تخمین شوری خاک در عصاره یک به پنج با تمام متغیرهای ورودی به ورودی طول و عرض جغرافیایی، جهت و شیب به ترتیب برابر با ۲/۳۸، ۳/۵۷ و ۸/۸۸ درصد و میزان افزایش RPD دو درصد بود. اگر جمع‌بندی در مورد حالت بهینه شاخص‌های اندازه‌گیری دقت انجام شود، بیش‌ترین تعداد حالت بهینه در مورد شوری مربوط به مدلی با ورودی طول، عرض جغرافیایی، جهت، شیب و در مورد pH مدلی با ورودی ارتفاع، شیب و جهت است.

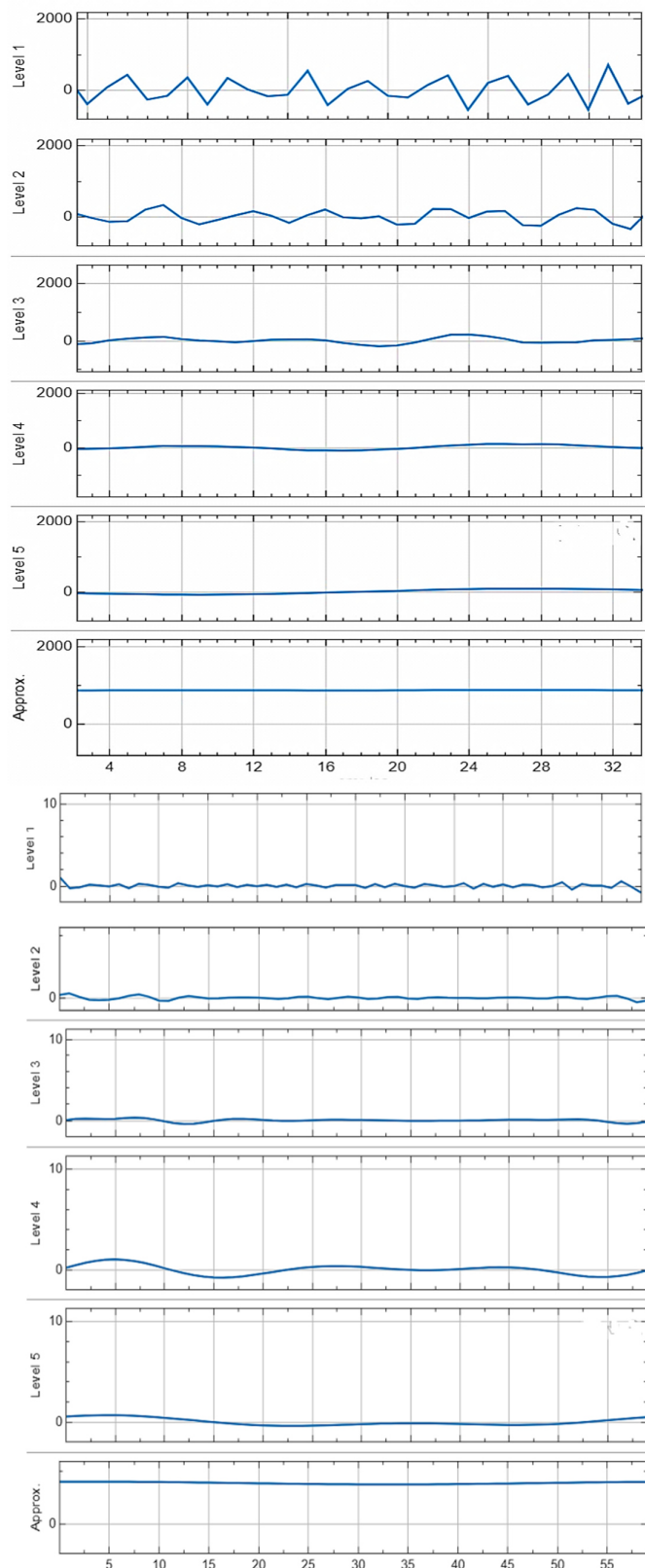
رگرسیون بردار پشتیبان (support vector regression) (=SVR) مدل مورد استفاده تحقیق بود که جهت افزایش دقت در تخمین خصوصیات خاک، تحلیل حساسیت مدل در مورد توابع کرنل (خطی، تابع پایه شعاعی و سیگموئید) و ضریب پنالتی انجام گرفت. در بیش‌تر حالات توابع کرنل خطی یا تابع پایه شعاعی و ضریب پنالتی ۰/۵ یا ۰/۲۵ بود. مقادیر شاخص‌های اندازه‌گیری دقت در جدول ۱ آورده شده است (واحد RMSE، ویژگی خاک است و بقیه شاخص‌ها بی‌بعد هستند). لازم به ذکر است که حالت بهینه هر شاخص در ارتباط با هر خصوصیت خاک در جدول با حالت پرننگ مشخص شده است. تغییرات شاخص‌های اندازه‌گیری دقت در جدول ۱ نشان‌دهنده تغییرات شوری و pH تخمینی خاک در برابر ورودی‌های مختلف به مدل رگرسیون بردار پشتیبان است (ملاک انتخاب ورودی‌های مدل ترکیبات

جدول ۱- شاخص‌های اندازه‌گیری دقت خصوصیات خاک تخمینی با ورودی‌های مختلف مدل SVR
Table 1- Accuracy measurement indices of estimated soil properties with different inputs of SVR

Var	RPD	RRMSE	RMSE	نوع داده‌های ورودی مدل	خصوصیت خاک
0.62	1.16	0.61	558.37	تمام متغیرهای ورودی	شوری یک به یک
0.7	1.13	0.63	572.34	طول - عرض - ارتفاع	
0.67	1.15	0.62	564.61	طول - عرض جغرافیایی	
0.59	1.13	0.63	573.87	ارتفاع - شیب - جهت	
<u>0.5</u>	<u>1.19</u>	<u>0.6</u>	<u>543.01</u>	طول - عرض - جهت - شیب	
0.45	1.1	0.56	159.88	تمام متغیرهای ورودی	شوری یک به پنج
0.44	1.1	0.55	159.01	طول - عرض - ارتفاع	
0.43	<u>1.12</u>	0.55	156.35	طول - عرض جغرافیایی	
<u>0.39</u>	1.05	0.58	166.7	ارتفاع - شیب - جهت	
0.41	<u>1.12</u>	<u>0.54</u>	<u>156.06</u>	طول - عرض - جهت - شیب	
0.032	0.88	0.053	0.38	تمام متغیرهای ورودی	pH یک به یک
0.034	0.83	0.056	0.41	طول - عرض - ارتفاع	
0.033	0.86	0.055	0.4	طول - عرض جغرافیایی	
<u>0.032</u>	0.94	<u>0.05</u>	<u>0.36</u>	ارتفاع - شیب - جهت	
<u>0.032</u>	<u>0.96</u>	<u>0.05</u>	<u>0.36</u>	طول - عرض - جهت - شیب	
0.03	0.94	0.049	0.30	تمام متغیرهای ورودی	pH یک به پنج
0.022	0.94	0.043	0.34	طول - عرض - ارتفاع	
0.03	0.96	0.048	0.38	طول - عرض جغرافیایی	
<u>0.022</u>	<u>1.09</u>	<u>0.042</u>	<u>0.33</u>	ارتفاع - شیب - جهت	
0.025	1.06	0.043	0.34	طول - عرض - جهت - شیب	

همبستگی زیرسری‌ها از db و سطح تجزیه شش به coif و سطح تجزیه پنج، ۱۳ درصد بوده است. مقادیر ضریب همبستگی بین pH با سطوح تجزیه شده و تقریب در مورد شیب به ترتیب ۰/۰۱۲، -۰/۰۸۶، ۰/۰۱۹، ۰/۰۵۹، ۰/۰۲۸، ۰/۵۰۴ و در مورد شوری در جهت شیب شامل ۰/۰۲۵، ۰/۰۷۴، ۰/۰۴۱، -۰/۲۹۸، ۰/۲، ۰/۲۸ است. همان‌طور که مشخص است با افزایش شماره سطح، میزان ضریب همبستگی افزایش پیدا می‌کند که این مسأله در تحقیق Wei et al. (2021) هم مشاهده شد. در ادامه زیرسری‌های تجزیه شده وارد روند مدل‌سازی شدند. در این تحقیق انواع ترکیبات جهت این منظور در نظر گرفته شد و نتایج در شکل ۵ برای pH و شوری آورده شده است (در pH حالت اول فقط تجزیه ارتفاع، حالت دوم فقط تجزیه شیب، حالت سوم فقط تجزیه جهت و حالت چهارم تجزیه ارتفاع، جهت و در شوری حالت اول طول و عرض جغرافیایی، جهت و تجزیه فقط شیب، حالت دوم طول و عرض جغرافیایی، شیب و تجزیه جهت). البته این مقایسه با حالت بهینه قسمت قبل یعنی بهترین حالت جدول ۱ براساس شاخص‌های اندازه‌گیری دقت انجام شده است.

در ادامه با استفاده از روش MODWT اقدام به تجزیه سری‌های مورد استفاده در مدل‌سازی شد که به‌عنوان نمونه تجزیه سری pH و شوری خاک در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به شکل ۴، فراوانی نوسانات از سطح یک تا سطح پنج کاهش پیدا می‌کند. سری تقریب نشان‌دهنده روند است که هر دو خصوصیت خاک دارای روند تقریباً ثابتی هستند. یکی از مواردی که می‌تواند تأثیر تجزیه سری را در روند تخمین تحت تأثیر قرار دهد، تعیین پارامترهای حاکم در روش است. نوع موجک مادر از عواملی است که می‌تواند دقت تجزیه را تحت تأثیر قرار دهد. موجک‌های مادر استفاده شده در تحقیق شامل db (Daubechies wavelets)، sym (Symlets)، coif (Coiflets) و fk (Fejer-Korovkin wavelets) هستند. به‌عنوان نمونه در شکل ۴ تجزیه سری pH با sym و شوری خاک با db انجام شده است. روش پیشنهادی تحقیق در تعیین موجک‌های مادر و تعداد ضرایب آن‌ها در روش MODWT براساس مقدار ضریب همبستگی زیرسری‌ها با سری خصوصیات خاک است (بیشینه ضریب همبستگی). به‌عنوان نمونه در تجزیه سری شیب در تعیین pH در عصاره یک به پنج میزان افزایش متوسط ضریب

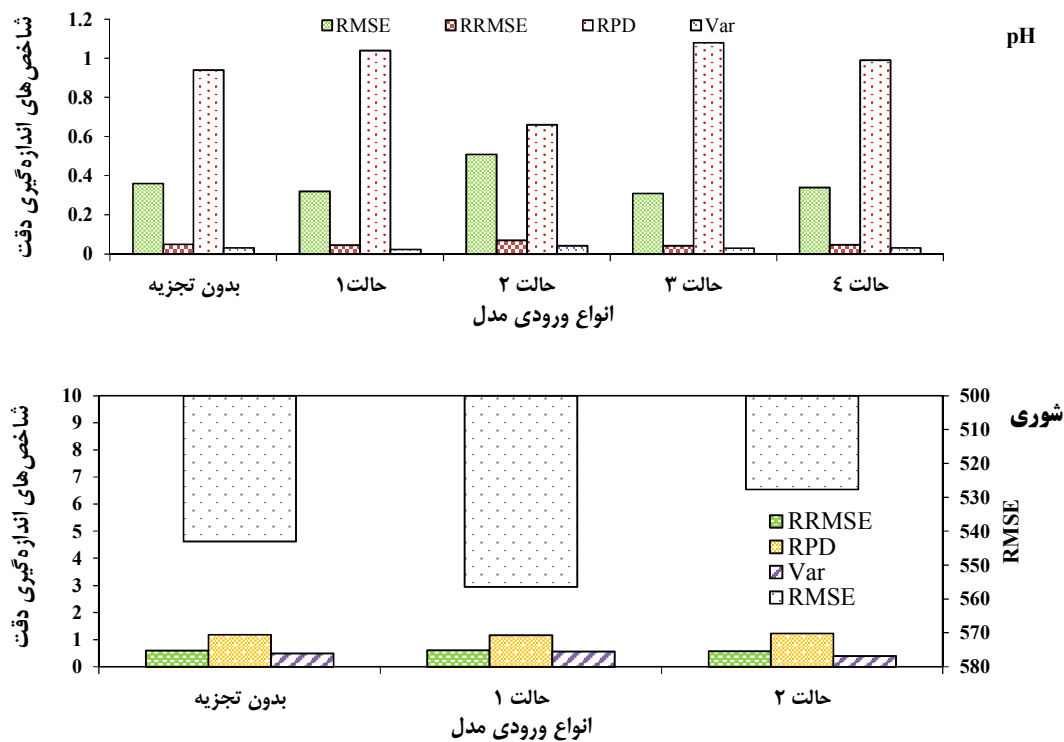


شکل ۴- مولفه‌های حاصل از تجزیه سری pH (الف) و شوری (ب) با روش MODWT
 Figure 4-The components of pH (a) and salinity(b) series decomposition with the MODWT method

شاخص‌های اندازه‌گیری را افزایش دهد، میزان کاهش RMSE، RRMSE و Var از حالت بهینه قبل به این حالت به ترتیب سه، چهار و ۲۰ درصد و میزان افزایش RPD برابر با چهار درصد بوده است. استفاده از رویکرد تحلیل طیفی در بسیاری از مطالعات دقت پیش‌بینی را افزایش داده است (Khan et al., 2020; Adib et al., 2021). در تجزیه بیان شده با MODWT، تمام زیرسری‌های تجزیه شده به‌عنوان ورودی وارد مدل‌سازی شدند و خروجی مدل‌سازی یعنی شوری یا pH بدون تجزیه بود. در حالت دیگر مدل‌سازی به‌صورت جزئی‌تر انجام شده است، یعنی در این حالت سری‌های شوری و pH خاک هم تجزیه شدند و مدل‌سازی بین تک به تک زیرسری‌ها انجام گرفت.

$$\begin{aligned} \text{level}_{1\text{pH}} &= \text{Alevel}_{1\text{slope}} + \text{Blevel}_{1\text{aspect}} + \dots \\ \text{level}_{2\text{pH}} &= \text{Alevel}_{2\text{slope}} + \text{Blevel}_{2\text{aspect}} + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

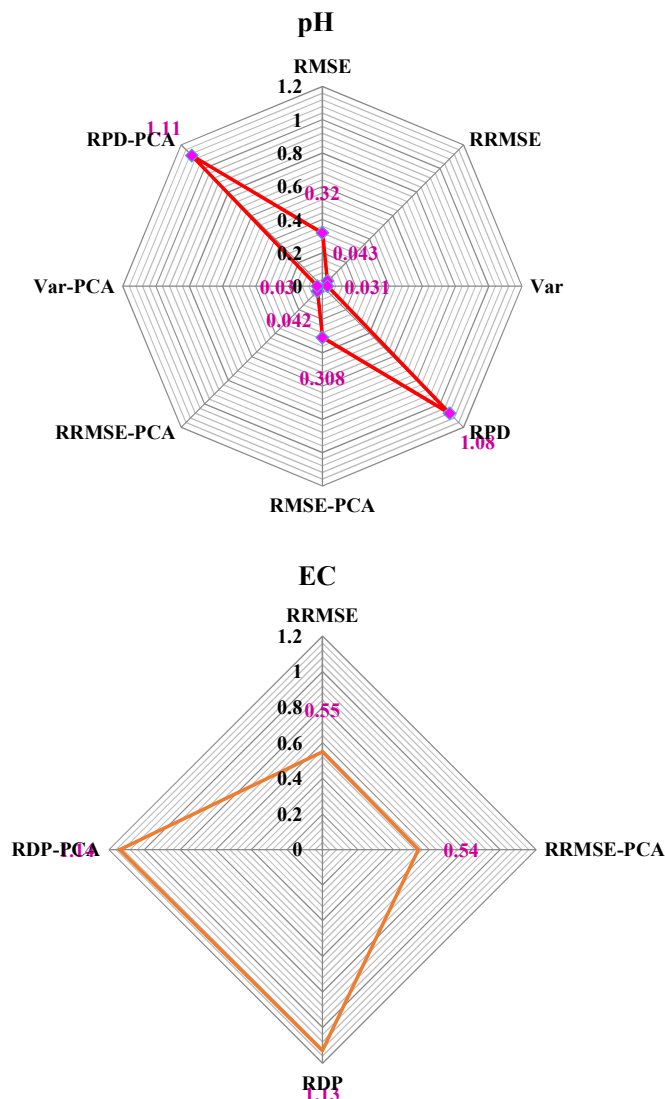
براساس شکل ۵ و مقادیر شاخص‌های اندازه‌گیری دقت، تجزیه سری‌های ورودی مختلف، نتایج متفاوتی را در مقادیر تخمینی خصوصیات خاک داشته است. به‌عنوان نمونه، در تخمین pH خاک تجزیه شیب به تنهایی نتوانسته است دقت تخمینی را نسبت به حالت بهینه قسمت قبل افزایش دهد (افزایش ۴۱/۶۶ درصدی RMSE)، ولی بقیه حالت‌های تجزیه نتوانسته دقت تخمین را بالا ببرد. میزان کاهش RMSE از حالت بهینه قسمت قبل به حالت اول، سوم و چهارم تجزیه به ترتیب برابر با ۱۱/۱۱، ۱۲/۸ و ۵/۵ درصد، میزان کاهش RRMSE به ترتیب برابر با ۱۰، ۱۴ و ۱۴ درصد میزان افزایش RPD به ترتیب برابر با ۱۰/۶۳، ۱۴/۸۹ و ۵/۳۱ درصد بوده است. حالت فقط تجزیه جهت شیب بیش‌ترین تأثیر و تجزیه توأم جهت و ارتفاع کم‌ترین تأثیر را داشته است. در مورد شوری نیز تجزیه فقط جهت شیب نتوانسته دقت



شکل ۵ - شاخص‌های اندازه‌گیری دقت در حالت‌های مختلف تجزیه حاصل از روش MODWT در تعیین pH و شوری خاک
Figure 5- Accuracy measurement indices in different states of decomposition from MODWT in soil pH and salinity determination

زیرسری‌ها در روند مدل‌سازی، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی در تعیین زیرسری مؤثر استفاده شد. ضریب PCA هر کدام از زیرسری‌های مربوط به جهت شیب در تعیین pH برابر با ۰/۰۸۷، ۰/۲۹/۱۵، ۰/۴/۰، ۰/۹۴/۰ و ۰/۹۳/۰ و در تعیین شوری شامل ۱۶/۰۸۳، ۰/۲۴/۰، ۰/۴۴/۰، ۰/۹۵/۰ و ۰/۰/۰۹۱ بودند. در این حالت دو زیرسری با بیشینه مقدار وزن یا ضریب وارد روند مدل‌سازی شدند و نتایج در شکل ۶ آورده شده است.

در ادامه، مقادیر پیش‌بینی شده هر کدام از زیرسری‌های خصوصیت خاک با هم جمع شدند و به‌عنوان تخمین نهایی در نظر گرفته شدند. در این حالت مقادیر RMSE، RRMSE و Var برای pH به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۱۳ و ۰/۰۶ و برای شوری ۵۵۲/۰۳، ۰/۶۱ و ۰/۴۸ و مقادیر RPD برای pH و شوری به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۴۸ شد. افزایش معیارهای خطا و کاهش RPD در این حالت کاملا مشهود است. در بررسی دیگر به‌جای استفاده از تمام



شکل ۶- شاخص‌های اندازه‌گیری دقت در تعیین خصوصیات خاک با استفاده از تمام زیرسری‌های حاصل از تجزیه MODWT نسبت به مدل‌سازی تنها با زیرسری‌های مؤثر حاصل از PCA

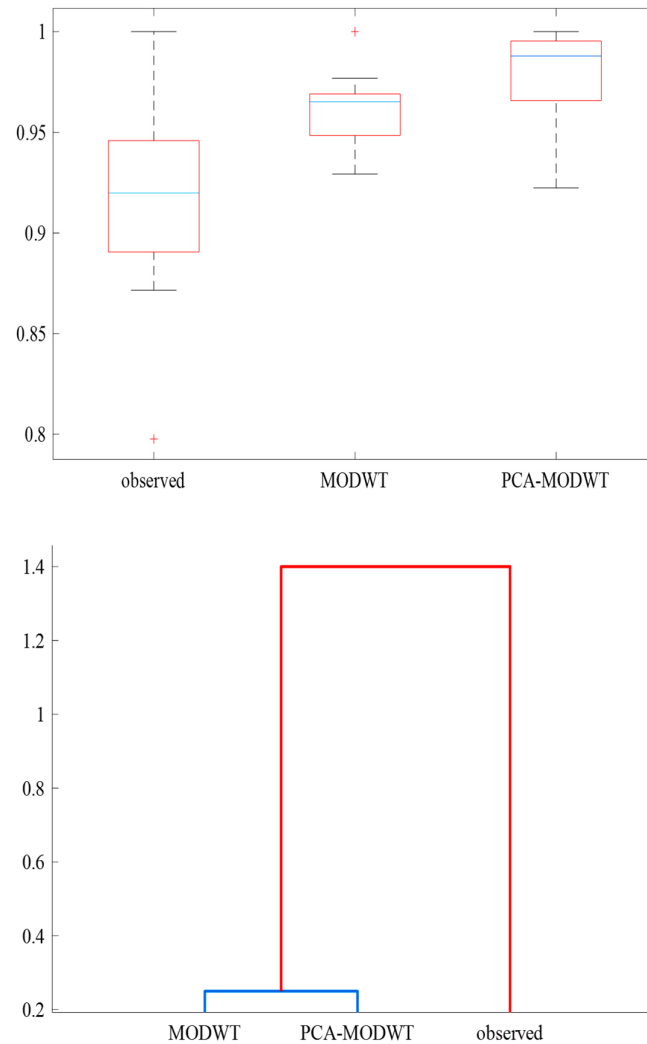
Figure 6- Accuracy measurement indices in soil properties determination using all sub-series of MODWT decomposition compared to modeling only effective sub-series of PCA

براساس مقادیر شاخص‌های اندازه‌گیری دقت شکل ۶ استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی دقت مقادیر تخمینی را افزایش داده است. به‌عنوان نمونه میزان کاهش RMSE با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی نسبت به حالت تجزیه با MODWT در pH و شوری به ترتیب چهار و دو درصد بود. قدرمطلق اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی متوسط pH در نقاطی که برای صحت‌سنجی استفاده شدند شامل ۰/۲۱، ۰/۰۷۵ و ۰/۰۶۷ به ترتیب برای حالت بدون تجزیه، تجزیه با روش MODWT و تلفیق MODWT با PCA است که کم‌ترین مقدار اختلاف مربوط به تلفیق MODWT با PCA است. در حالت دیگر مقادیر ضریب

رگرسیون خط برازشی بر داده‌های اندازه‌گیری و تخمینی محاسبه شد که مقدار این ضریب از حالت بدون تجزیه به حالت تلفیق MODWT با PCA در pH شش درصد و در شوری ۲۰ درصد افزایش داشته است. در حالت دیگر ضریب همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمینی محاسبه شد که مقدار این ضریب از حالت بدون تجزیه به حالت تلفیق MODWT با PCA در pH پنج درصد و در شوری ۲۸ درصد افزایش داشته است. جهت بررسی بیش‌تر تأثیر تجزیه سری با روش MODWT و تجزیه مؤلفه‌های اصلی از نمودار جعبه‌ای و نمودار درختی استفاده شد (شکل ۷). در شکل ۷، نمودار جعبه‌ای داده‌های مربوط به استفاده از تجزیه

است. در نمودار درختی ترسیم شده، داده‌های تخمینی با تجزیه مؤلفه‌های اصلی (نسبت به استفاده تنها از MODWT)، به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر شده‌اند و این مسأله افزایش دقت با تلفیق رویکرد طیفی MODWT و رویکرد کاهش داده PCA را نشان می‌دهد.

مؤلفه‌های اصلی نسبت به حالتی که تنها از روش تجزیه استفاده می‌شد، به نمودار جعبه‌ای داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر شده است. این مسأله در مورد خطوط Whikeres (مناطق مربوط به چارک اول و سوم) کاملاً مشهود است که تشابه مکان قرارگیری خطوط بین داده‌های اندازه‌گیری و تخمینی MODWT-PCA افزایش یافته



شکل ۷- نمودار جعبه‌ای (pH-الف) و درختی (شوری-ب) در مقایسه مقادیر مشاهداتی و تخمینی
Figure 7- The box plot (pH) and dendrogram (salinity) in observed and estimated values comparison

MODWT استفاده شد. رفتار متغیرهای ورودی در مقیاس‌های مکانی مختلف، متفاوت است. تجزیه برخی از متغیرهای ورودی، صحت تخمین pH و شوری خاک را افزایش داد. مدل‌سازی زیرسری‌های متغیرهای ورودی با زیرسری‌های خصوصیات خاک و جمع زیرسری‌های تخمینی خصوصیات خاک نتوانست دقت مقادیر تخمینی را افزایش دهد. دلیل این مسأله را می‌توان در افزایش تعداد مدل‌سازی‌ها دانست، چون به تعداد سطوح تجزیه شده مدل‌سازی انجام شده است و انجام تحلیل حساسیت

۴- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر تقاضای روبه‌فزاینده‌ای در مورد اطلاعات توزیع مکانی خاک در تصمیم‌گیری‌های محیط زیستی و مدیریت کاربری اراضی وجود دارد. یکی از مسائلی که می‌تواند دقت مدل‌سازی مکانی خصوصیات خاک را تحت تأثیر قرار دهد، افزایش اطلاعات مکانی متغیرهای ورودی به مدل است که در این تحقیق جهت نیل به این هدف از تحلیل طیفی با روش

و تعیین پارامترها می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی با تعیین زیرسری‌های مؤثر توانست دقت تخمین خصوصیات خاک را افزایش دهد، چرا که این رویکرد کاهش داده می‌تواند هزینه محاسباتی را با تعیین متغیرهای اصلی کاهش و دقت تخمین را افزایش دهد. نوع متغیرهای ورودی، نوع مدل مورد استفاده در روند مدل‌سازی، استفاده از روش مناسب در تحلیل طیفی و تعیین عوامل مؤثر در روش مربوط به تجزیه طیفی از جمله مویک مادر (مویک مادر در شناسایی رفتار سری یا سیگنال در بازه‌های مختلف مقیاسی نقش مهمی دارد)، از عواملی هستند که می‌توانند دقت روش پیشنهادی را در تعیین تغییرات مکانی خصوصیات خاک متأثر سازند. بنابراین، ترکیب تجزیه طیفی و هوش مصنوعی به‌عنوان گزینه کارا می‌تواند دقت تخمین توزیع مکانی خصوصیات خاک را افزایش دهد.

سیاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه شهید مدنی آذربایجان شرقی بابت حمایت‌های مالی و معنوی که در طول انجام پروژه تحقیقاتی کمک قابل‌توجهی کردند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این تحقیق وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این تحقیق از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

لاله پرویز: راهنمایی، مفهوم‌سازی، تجزیه نرم‌افزاری/آمار، نگارش مقاله؛ ندا عزیزی: جمع‌آوری نمونه‌ها، اندازه‌گیری نمونه‌ها؛ مهسان کفیلی قولقاسم: جمع‌آوری نمونه‌ها، اندازه‌گیری نمونه‌ها.

منابع

بساطی، سمیرا، کریمی، حاجی، احمدی، غلامعلی، رستمی، نورالدین (۱۴۰۲). ارزیابی هوازدگی و مقاومت واحدهای سنگی نسبت به فرسایش در منطقه اسلام‌آباد غرب، استان کرمانشاه. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۱۵۰-۱۶۰. doi: 10.22098/mmws.2022.11532.1138

بیرانوند، نسرين، سپهوند، علیرضا و حقی‌زاده، علی (۱۴۰۲). مدل‌سازی رسوب معلق با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در دوره‌های کم‌آبی و پرآبی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کشکان). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۵۰-۶۵. doi: 10.22098/mmws.2022.11262.1115

جهانبازی، لیلا، جعفرزاده، علی‌اصغر، و فروغی‌فر، حامد (۱۳۹۵). رابطه تکامل خاک و تنوع شکل اراضی در دشت تبریز. *دانش آب و خاک*، ۲۶(۲)، ۱۹۱-۲۰۴. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5093.html

حیدری، نسیم، ریحانی تبار، عادل، نجفی، نصرت‌اله، و اوستان، شاهین (۱۳۹۲). توزیع شکل‌های مختلف فسفر در برخی خاک‌های استان آذربایجان شرقی و رابطه آن با برخی ویژگی‌های خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۴(۳)، ۲۷۱-۲۷۹. doi: 10.22059/ijswr.2013.50217.

رضایی، گردآورین، سرمدیان، فریدون، ترکاشوند، علی‌محمدی، سیدمحمدی، جواد، و مرعشی‌علی‌آبادی، مریم (۱۴۰۲). نقشه‌برداری رقومی تغییرات سطحی و زیرسطحی کربن آلی و شوری خاک در بخشی از اراضی دشت قزوین (مطالعه موردی: مناطق آبیک و نظر آباد). *آب و خاک*، ۳۷(۲)، ۳۱۵-۳۳۱. doi: 10.22067/jsw.2023.80369.1238

سرمدیان، فریدون، و تقی‌زاده مهرجردی، روح‌اله (۱۳۸۸). مقایسه روش‌های درون‌یابی جهت تهیه نقشه خصوصیات کیفی خاک (مطالعه موردی (مزرعه دانشکده کشاورزی). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۰(۲)، ۱۵۷-۱۶۵. doi: 10.1001.1.2008479.1388.40.2.8.2

سلیمانی ساردو، الهام، مقصود، فاطمه، و دماوندی، علی‌اکبر (۱۳۹۵). ارزیابی کارایی روش‌های درون‌یابی برای تخمین PH و EC خاک (مطالعه موردی: بخش درودزن در استان فارس). *سنجش از دور و GIS ایران*، ۸(۳)، ۷۷-۹۰. https://gisj.sbu.ac.ir/article_96143.html

غلامی، شایسته، حسینی، سیدمحسن، محمدی، جهانگرد، و سلمان ماهینی، عبدالرسول (۱۳۹۰). تغییرات مکانی بایومس ماکروفون و ویژگی‌های خاک در جنگل‌های حاشیه رودخانه کرخه. *آب و خاک*، ۲۵(۲)، ۲۴۸-۲۵۷. doi: 10.22067/jsw.v0i0.9300

فروغی‌فر، حامد، جعفرزاده، علی‌اصغر، ترابی گل‌سفیدی، حسین، علی‌اصغرزاده، ناصر، تومانیان، نورایر، و داوتگر، ناصر (۱۳۹۰). تغییرات مکانی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی در شکل‌های اراضی مختلف دشت تبریز. *دانش آب و خاک*، ۳۱(۳)، ۱-۲۱. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1196.html

فرهمند انور، اوستان، شاهین، جعفرزاده، علی‌اصغر، و علی‌اصغرزاده، ناصر (۱۳۹۱). پارامترهای شوری و سدیمی بودن در برخی خاک‌های متأثر از نمک دشت تبریز. *دانش آب و خاک (دانش کشاورزی)*، ۳۲(۱)، ۱-۱۵. <https://www.sid.ir/paper/147869/fa.15-1>

کمانگر، محمد و مینائی، مسعود (۱۴۰۲). تحلیل مکانی ناهنجاری تغییرات شوری خاک استان فارس در اثر بارش‌های سنگین بهاره. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۳۶-۴۹. doi: 10.22098/mmws.2022.11226.1108

زمین‌آماری در GIS (مورد مطالعاتی: منطقه میانکنگی؛ سیستان).
 آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰(۲)، ۴۴۳-۴۵۸.
 doi:10.22067/jsw.v30i2.25950

هاشمی، مسعود، غلامعلی‌زاده آهنگر، احمد، بامری، ابوالفضل، سارانی، فریدون، و حجازی‌زاده، ابوالفضل (۱۳۹۵). شناسایی و پهنه‌بندی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های

References

- Adib, A., Kisi, O., Khoramgah, S., Gafouri, H.R., Liaghat, A., Lotfirad, M., & Moayyeri, N. (2021). A new approach for suspended sediment load calculation based on generated flow discharge considering climate change. *Water Supply*, 21(5), 2400-2413. doi:10.2166/ws.2021.069.
- Alarcon-Aquino, V., & Barria, J.A. (2009). Change detection in time series using the maximal overlap discrete wavelet transform. *Latin American Applied Research*, 39(2), 145-152.
- Basati, S., Karimi, H., Ahmadi, G. A., & Rostami, N. (2023). Assessing weathering and resistance of rock units against erosion in the West Islamabad region, Kermanshah province. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(3), 150-162. doi: 10.22098/mmws.2022.11532.1138. [In Persian]
- Beiranvand, N., Sepahvand, A., & Haghi Zadeh, A. (2023). Suspended sediment load modeling by machine learning algorithms in low and high discharge periods (Case study: Kashkan watershed). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 50-65. doi: 10.22098/mmws.2022.11262.1115. [In Persian]
- Chen, S., Du, T., Wang, S., Parsons, D., Wu, D., Guo, X., & Li, D. (2021). Quantifying the effects of spatial-temporal variability of soil properties on crop growth in management zones within an irrigated maize field in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 244, 106535. doi:10.1016/j.agwat.2020.106535.
- Dghais, A.A.A., & Ismail, M.T. (2013). A comparative study between discrete wavelet transform and maximal overlap discrete wavelet transform for testing stationarity. *International Journal of Mathematics and Computer in Engineering*, 7, 1184-1188. doi:10.5281/zenodo.1089273.
- Farahmand, A., Oustan, S., Jafarzadeh, A., & Aliasghar zad, N. (2012). Salinity and Sodicity Parameters in Some Salt-Effected Soils of Tabriz Plain, *Water and Soil Science*, 22(1), 1-15. <https://www.sid.ir/paper/147869/en> [In Persian]
- Foroughifar, H., Jafarzadah, A.A., Torabi Gelsefidi, H., Aliasghar zadah, N., Toomanian, N., & Davatgar, N. (2011). Spatial variations of surface soil physical and chemical properties on different landforms of Tabriz Plain. *Water and Soil Science*, 21(3), 1-21. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1196.html?lang=en [In Persian]
- Gholami, S., Hosseini, S., Mohammadi, J., & Salman Mahiny, A. (2011). Spatial variability of soil macrofauna biomass and soil properties in riparian forest of Karkhe River. *Water and Soil*, 25(2), 248-257. doi: 10.22067/jsw.v0i0.9300 [In Persian]
- Hashemi, M., Gholamalizadeh Ahangar, A., Bameri, A., Sarani, F., & Hejazizadeh, A. (2016). Survey and zoning of soil physical and chemical properties using geostatistical methods in GIS (Case Study: Miankangi Region in Sistan). *Journal of Water and Soil*, 30(2), 443-458. doi: 10.22067/jsw.v30i2.25950 [In Persian]
- Heidari, N., Reyhani Tabar, A., Nosratollah, N., & Oustan, S. (2013). Phosphorus fractions of selected calcareous soils of eastern azerbaijan province and their relationships with some soil characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 44(3), 271-279. doi:10.22059/ijswr.2013.50217 [In Persian]
- Hengl, T., Leenaars, J. G., Shepherd, K. D., Walsh, M. G., Heuvelink, G. B., Mamo, T., & Kwabena, N. A. (2017). Soil nutrient maps of Sub-Saharan Africa: assessment of soil nutrient content at 250 m spatial resolution using machine learning. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 109, 77-102. doi: 10.1007/s10705-017-9870-x.
- Jahanbazi, L., Jafarzadeh, A.A., & Forughyfar, H. (2016). Relation between soil evolution and landforms diversity in dasht-e-Tabriz. *Water and Soil Science*, 26(2), 191-204. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5093.html?lang=en [In Persian]
- John, K., Afu, S.M., Isong, I.A., Aki, E.E., Kebonye, N.M., Ayito, E.O., Chapman, P.A., Eyong, M.O., & Penížek, V., (2021). Mapping soil properties with soil-environmental covariates using geostatistics and multivariate statistics. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1-16. doi:10.1007/s13762-020-03089-x
- Kamangar, M., & Minaei, M. (2023). Spatial analysis of soil salinity anomaly in Fars Province due to heavy spring rains. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 36-49. doi: 10.22098/mmws.2022.11226.1108. [In Persian]
- Khan, M.M.H., Muhammad, N.S., & El-Shafie, A. (2020). Wavelet based hybrid ANN-ARIMA models for meteorological drought

- forecasting. *Journal of Hydrology*, 590, 125380. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125380
- Liu, F., Zhang, G.L., Song, X., Li, D., Zhao, Y., Yang, J., Wu, H., & Yang, F. (2020). High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China. *Geoderma*, 361, 114061. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114061.
- Luo, L., Li, H., Wang, J., & Hu, J. (2021). Design of a combined wind speed forecasting system based on decomposition-ensemble and multi-objective optimization approach. *Applied Mathematical Modelling*, 89, 49-72. doi: 10.1016/j.apm.2020.07.019.
- Pahlavan-Rad, M.R., & Akbarimoghaddam, A. (2018). Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160, 275-281. doi:10.1016/j.catena.2017.10.002.
- Rezaie, G., Sarmadian, F., Mohammadi Torkashvand, A., Seyedmohammadi, J., Marashi Aliabadi, M. (2023). Digital mapping of surface and subsurface soil organic carbon and soil salinity variation in a part of Qazvin plain (Case study: Abyek and Nazarabad Regions). *Journal of Water and Soil*, 37(2), 315-331. doi:10.22067/jsw.2023.80369.1238. [In Persian]
- Sarmadian, F., & Taghi zadeh Mehrjerdi, R. (2010). A comparison of interpolation methods for preparing soil quality maps: Case study: (Agricultural Faculty Experimental Field). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 40(2), 157-165. doi:10.1001.1.2008479.1388.40.2.8.2 [In Persian]
- Shit, P.K., Bhunia, G.S., & Maiti, R. (2016). Spatial analysis of soil properties using GIS based geostatistics models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 1-6. doi:10.1007/s40808-016-0160-4.
- Soleimani Sardo, A., Maghsoud, F., & Damavandi, A.A. (2016). Evaluating the effectiveness of interpolation methods to estimate soil pH and EC (case study: Darudzen district in Fars province). *Iranian journal of Remote Sensing and GIS*, 8(3), 77-93. doi:10.1016/j.geoderma.2019.114061. [In Persian]
- Song, Y., Shen, Z., Wu, P., & Viscarra Rossel, R.A. (2021). Wavelet geographically weighted regression for spectroscopic modelling of soil properties. *Scientific Reports*, 11(1), 17503. doi:10.1038/s41598-021-96772-z.
- Ul-Saufie, A.Z., Yahaya, A.S., Ramli, N.A., Rosaida, N., & Hamid, H.A. (2013). Future daily PM10 concentrations prediction by combining regression models and feedforward backpropagation models with principle component analysis (PCA). *Atmospheric Environment*, 77, 621-630. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.05.017.
- Wälder, K., Wälder, O., Rinklebe, J., & Menz, J. (2008). Estimation of soil properties with geostatistical methods in floodplains. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 54 (3), 275-295. doi:10.1080/03650340701488485.
- Wei, Y., Ding, J., Yang, S., Wang, F., & Wang, C. (2021). Soil salinity prediction based on scale-dependent relationships with environmental variables by discrete wavelet transform in the Tarim Basin. *Catena*, 196, 104939. doi:10.1016/j.catena.2020.104939.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützw, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., & Wollschläger, U. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. doi:10.1016/j.geoderma.2018.07.026.
- Zhang, Y., & Hartemink, A.E. (2021). Quantifying short-range variation of soil texture and total carbon of a 330-ha farm. *Catena*, 201, 105200. doi:10.1016/j.catena.2021.105200.