



Efficiency and Limitations of Visible-Near Infrared Spectroscopy for Estimating Soil Properties in Arid and Semi-Arid Regions (A Review)

Fatemeh Khayamim¹ 

1. Corresponding Author, Reasercher of Department of Soil and Water Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, AREEO, Isfahan, Iran. E-mail: f.khayamim@areeo.ac.ir

Article Info

Article type: Review Article

Article history:

Received: May. 10, 2026

Revised: July. 28, 2026

Accepted: Aug. 16, 2026

Published online: Oct. 23, 2026

Keywords:

*Arid regions,
Carbonate, Gypsum,
Partial least square regression,
Spectroscopy*

ABSTRACT

Visible and Near-Infrared (Vis–NIR) spectroscopy has emerged as a rapid, non-destructive, and cost-effective technique for estimating soil properties and supporting digital soil mapping. This review critically evaluates the performance and limitations of Vis–NIR spectroscopy for predicting soil properties in arid and semi-arid regions by synthesizing findings from studies conducted in Iran and elsewhere. The review covers the fundamental principles of soil spectroscopy, sample preparation, spectral preprocessing techniques, multivariate modeling approaches, and recent advances in multi-source data fusion. The reviewed studies demonstrate that Vis–NIR spectroscopy provides satisfactory predictions for several soil properties, including soil organic matter, texture, moisture, electrical conductivity, and calcium carbonate, particularly when coupled with advanced machine learning algorithms. However, predictive performance varies widely in arid and semi-arid soils due to the complex effects of high carbonate, gypsum, and salinity contents, mineralogical heterogeneity, and differences in spectral preprocessing, calibration strategies, and modeling techniques. The review further indicates that variations in model performance are primarily associated with the quality and representativeness of reference datasets, the availability of regional spectral libraries, and site-specific calibration rather than the choice of prediction algorithm alone. Consequently, developing regional spectral libraries, standardizing spectral measurement protocols, and integrating Vis–NIR data with remote sensing and environmental covariates are identified as key priorities for improving model transferability and practical implementation. Overall, Vis–NIR spectroscopy has considerable potential to support precision agriculture, sustainable soil management, and digital soil mapping in arid and semi-arid environments, provided that region-specific calibration and robust validation procedures are adopted.

Cite this article: Khayamim, F. (2026). Efficiency and limitations of visible-near infrared spectroscopy for estimating soil properties in arid and semi-arid regions (A review)., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (8), 1803-1824.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413675.670132>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413675.670132>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Conventional procedures for soil analysis are complicated, time-consuming, and expensive, and extraction procedures may alter the equilibrium between different phases in soil. Therefore, developing techniques that preserve the basic integrity of the soil system is essential. Moreover, small-scale soil resource inventories at national, continental, and global levels need sensing and scanning technologies to precisely and rapidly describe soil properties. Over the last 20 years, the application of visible (vis), near-infrared (NIR), and mid-infrared (mid-IR) diffuse reflectance spectroscopy (DRS) in soil science garnered considerable attention. Diffuse reflectance spectroscopy is one of the Proximal Soil Sensing (PSS) methods. PSS technologies include field-based methods that can be used to measure soil properties from a distance of less than 2 m above the soil surface. The advantages of PSS are the collection of larger amounts of spatial data using non-destructive, inexpensive, and simple methods with small sample sizes, minimal sample preparation, and less labor-intensive techniques. Furthermore, PSS measurements are made in situ, providing the information at field conditions and on time.

Objective

The objective of the review paper was to explain the principles and foundations of spectroscopy, introduce the steps of sample preparation, data pre-processing, and multivariate modeling, examine studies conducted in Iran and worldwide, and assess the capabilities and limitations of the DRS technique.

Materials and methods

The standard method for soil physical and chemical analyses is air-drying and passing through a 2 mm sieve, which is also suitable for spectroscopic studies. Grinding and sieving are performed to remove particles larger than 2 mm and coarse plant debris. The presence of instrumental, environmental, and illumination-related errors in the spectral curve highlights the necessity of reviewing and examining the spectral curves separately and with great care after measurement. Some common pre-processing methods include: multiplicative scatter correction (MSC), first and second derivatives, orthogonal signal correction (OSC), simple additive baseline correction, standard normal variate (SNV) correction, and simple additive baseline correction (OSC). Common smoothing methods for reducing noise in spectral signals include spectral averaging, median and mean shift filters, and the Savitzky-Golay filter.

Diffuse reflectance spectra of soil in the visible-near infrared region are not completely specific due to common absorption and overlap of some soil components. This non-specificity and the occurrence of absorption by other phenomena require the separation of spectra by mathematical methods. Therefore, the analysis of diffuse reflectance spectra of soil requires multivariate calibrations. The most common calibration methods for soil applications are based on linear regressions called multiple linear regression (MLR), principal component regression (PCR), and partial least squares regression (PLSR). In addition, the use of data analysis techniques such as artificial neural networks (ANN) and boosted regression trees is increasing. The accuracy of the predicted model is examined by the residual predictive deviation (RPD), which is the ratio of the standard deviation of the measured values to the least squares error of the model.

Conclusion

Visible-Near Infrared (Vis-NIR) emerged in recent years as a fast, low-cost, and non-destructive tool for determining the physical, chemical, and biological properties of soils. The present research investigated a large number of spectroscopic studies in Iran, and results indicated that this method is more accurate for properties such as soil organic matter, soil texture, carbonates, and gypsum, and can be suitable for expensive and time-consuming laboratory methods. Combinations of evaluation with machine learning methods and advanced algorithms such as support vector regression SVR, Random Forest, and neural networks have improved models in recent years. Visible-Near Infrared (Vis-NIR) can be a fast and cost-effective way to estimate the properties of known soils, but in arid and semi-arid regions, the presence of soil salinity, high levels of gypsum, and carbonates can reduce accuracy. The presence of calcareous and gypsum compounds overlaps with organic matter and other features, limiting the accuracy of the models. To increase the reliability and accuracy of the models, the development of indigenously produced libraries, local calibration, the use of big data and super-fiber sensors and satellites, and the application of advanced artificial intelligence models are being used. In general, Vis-NIR measurements are powerful tools for precision agriculture, soil health assessment, and resource management in arid and semi-arid regions, but the application of this method in these regions should be accompanied by caution and extensive validation.

Funding

The study did not receive any funding.

Authorship contribution

Fatemeh khayamim: Conceptualization, methodology and formal analysis, investigation, resources, data curation, writing—original draft preparation, writing—review and editing, visualization, supervision, project administration.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

No artificial intelligence tools were used in the article writing process.

Data availability statement

Data from this study are applicable upon request.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

Ethical considerations

The author avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مروری بر کارایی و محدودیت‌های طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک در برآورد ویژگی‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک

فاطمه خیامیم^۱✉

محقق بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران. رایانامه: f.khayamim@areeo.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۸/۱

واژه‌های کلیدی:

مناطق خشک،

کربنات،

گچ،

رگرسیون حداقل مربعات جزئی،

طیف‌سنجی

طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR) در سال‌های اخیر به‌عنوان روشی سریع، غیرمخرب و نسبتاً کم‌هزینه، کاربرد گسترده‌ای در برآورد ویژگی‌های خاک و توسعه نقشه‌برداری رقومی خاک پیدا کرده است. این مقاله با هدف مرور و تحلیل کارایی و محدودیت‌های این فناوری در برآورد ویژگی‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، مطالعات انجام‌شده در ایران و جهان را بررسی کرده و جنبه‌های مختلف شامل اصول طیف‌سنجی، آماده‌سازی نمونه، روش‌های پیش‌پردازش، الگوریتم‌های مدل‌سازی و رویکردهای تلفیق داده‌ها را تحلیل می‌کند. نتایج این مرور نشان داد که Vis-NIR در برآورد ویژگی‌هایی مانند ماده آلی، بافت، رطوبت، هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم، به‌ویژه در صورت استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، عملکرد مطلوبی دارد. با این حال، در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، وجود مقادیر زیاد کربنات، گچ و شوری، همراه با تنوع کانی‌شناسی و تفاوت در روش‌های پیش‌پردازش و مدل‌سازی، موجب کاهش دقت و قابلیت تعمیم مدل‌ها می‌شود. بررسی مطالعات همچنین نشان داد که اختلاف قابل توجه دقت پیش‌بینی در پژوهش‌های مختلف، بیش از آنکه ناشی از نوع الگوریتم باشد، به کیفیت داده‌های مرجع، توسعه کتابخانه‌های طیفی بومی و اعتبارسنجی منطقه‌ای وابسته است. در مجموع، طیف‌سنجی Vis-NIR ظرفیت بالایی برای کشاورزی دقیق، مدیریت پایدار خاک و نقشه‌برداری رقومی دارد، اما توسعه کتابخانه‌های طیفی بومی، استانداردسازی روش‌های اندازه‌گیری و تلفیق داده‌های طیفی با اطلاعات سنسجش از دور و متغیرهای محیطی، مهم‌ترین نیازهای گسترش کاربرد عملی آن در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌روند.

استناد: خیامیم، فاطمه، (۱۴۰۵). مروری بر کارایی و محدودیت‌های طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک در برآورد ویژگی‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک،

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۸)، ۱۸۰۳-۱۸۲۴. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413675.670132>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413675.670132>

مقدمه

بهره‌گیری از طیف‌سنجی در علوم خاک در سال‌های اخیر از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای و زمینی (Field Spectroscopy) به سوی سامانه‌های تصویربرداری طیفی و ابرطیفی (Imaging and Hyperspectral Spectroscopy) توسعه یافته است. این تحول، ضمن حفظ دقت بالای اندازه‌گیری‌های میدانی، امکان پایش پیوسته و منطقه‌ای ویژگی‌های خاک را فراهم کرده و نقش مهمی در توسعه نقشه‌برداری رقومی خاک (Digital Soil Mapping) و مدیریت پایدار منابع خاک ایفا کرده است. با وجود این پیشرفت‌ها، انتقال موفق این فناوری از محیط‌های آزمایشگاهی به کاربردهای عملی همچنان با محدودیت‌هایی همراه است. عواملی نظیر رطوبت خاک، ناهمگنی سطح، پوشش گیاهی و اثرات اتمسفری همچنان از مهم‌ترین چالش‌های کاربرد عملی این فناوری به شمار می‌روند و توسعه روش‌های پردازش داده و مدل‌سازی پیشرفته را ضروری ساخته‌اند (Li et al., 2022; Barra et al., 2021; Piccini et al., 2024).

پیشرفت فناوری ابزارهای طیف‌سنجی، به‌ویژه توسعه اسپکترورادیومترهای با قدرت تفکیک طیفی بالا، نقش مهمی در افزایش دقت برآورد ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاک داشته است. این تجهیزات با قابلیت ثبت پیوسته بازتاب طیفی در محدوده‌های مرئی (Vis)، مادون قرمز نزدیک (VNIR) و مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR)، امکان اندازه‌گیری‌های دقیق در شرایط آزمایشگاهی و میدانی را فراهم کرده‌اند و به یکی از ابزارهای اصلی مطالعات طیف‌سنجی خاک تبدیل شده‌اند. اگرچه مبانی اندازه‌گیری‌های طیفی و رفتار جذب و بازتاب مواد در منابع کلاسیک به‌خوبی تبیین شده است (Clark, 1999)، پیشرفت‌های اخیر در طراحی تجهیزات و افزایش قدرت تفکیک طیفی، قابلیت کاربرد این فناوری را در مطالعات خاک به‌طور چشمگیری ارتقا داده است (Barra et al., 2021; Piccini et al., 2024).

هم‌زمان با گسترش تجهیزات، پیشرفت روش‌های شیمی‌سنجی، آمار چندمتغیره و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، افق‌های جدیدی را در تحلیل داده‌های طیفی ایجاد کرده است. استفاده از روش‌هایی نظیر Partial Least Squares Regression (PLSR)، Random Forest، Support Vector Machine (SVM) و شبکه‌های عصبی و یادگیری عمیق، دقت پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف خاک را به میزان قابل توجهی افزایش داده و طیف‌سنجی را از یک روش اندازه‌گیری ساده به ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی رقومی خاک، کشاورزی دقیق و پایش محیط‌زیست تبدیل کرده است. افزون بر این، ماهیت غیرمخرب، سرعت بالا، کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و امکان اندازه‌گیری هم‌زمان چندین ویژگی خاک، از مهم‌ترین مزایای این فناوری نسبت به روش‌های متداول آزمایشگاهی محسوب می‌شود (Barra et al., 2021; Li et al., 2022; Piccini et al., 2024).

طی دو دهه اخیر، کاربرد طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در مطالعات خاک ایران روندی رو به رشد داشته و برای برآورد ویژگی‌هایی نظیر کربن آلی، بافت، رطوبت، کربنات کلسیم، گچ، شوری و برخی عناصر غذایی خاک به کار گرفته شده است. با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، غلبه خاک‌های آهکی و گچی و پایین بودن ماده آلی در بخش وسیعی از خاک‌های کشور، توسعه روش‌های سریع، دقیق و غیرمخرب برای ارزیابی ویژگی‌های خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، مطالعات داخلی نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های طیفی با روش‌های شیمی‌سنجی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دقت برآورد بسیاری از ویژگی‌های خاک را بهبود می‌بخشد. بر این اساس، مقاله حاضر با مرور و تحلیل نتایج پژوهش‌های داخلی و خارجی، توانمندی‌ها، محدودیت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای کاربرد طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک را مورد بررسی قرار می‌دهد.

پاسخ‌های طیفی در محدوده مرئی-مادون قرمز نزدیک

پاسخ طیفی خاک در محدوده مرئی-مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR؛ ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) حاصل برهم‌کنش تابش الکترومغناطیسی با اجزای معدنی و آلی خاک است و مبنای اصلی توسعه مدل‌های پیش‌بینی ویژگی‌های خاک به شمار می‌رود. در این محدوده، طیف بازتابی خاک معمولاً به‌صورت درصد بازتاب (Reflectance, R) اندازه‌گیری شده و برای افزایش قدرت تفسیر و مدل‌سازی، به مقیاس جذب (Absorbance, A) بر اساس رابطه ($A = \log(1/R)$) تبدیل می‌شود (Clark, 1999; Barra et al., 2021).

پاسخ‌های طیفی خاک در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک، بازتابی از برهم‌کنش‌های پیچیده میان تابش الکترومغناطیسی و ترکیبات شیمیایی، کانی‌شناسی و فیزیکی خاک هستند. در ناحیه مرئی (۴۰۰ تا ۷۸۰ نانومتر)، ویژگی‌های جذبی عمدتاً تحت تأثیر اکسیدهای آهن، به‌ویژه هماتیت و گوتیت، قرار دارند؛ در حالی که مواد آلی با کاهش مقدار بازتاب، نقش مهمی در شکل طیف این ناحیه ایفا می‌کنند. در

محدوده مادون قرمز نزدیک و کوتاه‌موج نیز حضور کانی‌های رسی، آب، کربنات‌ها، گچ و گروه‌های هیدروکسیل، مهم‌ترین منشأ باندهای جذبی محسوب می‌شود (Viscarra Rossel et al., 2006; Piccini et al., 2024).

بررسی‌های انجام شده نشان داده‌اند که تفسیر طیف‌های خاک تنها بر شناسایی باندهای جذبی متکی نیست، بلکه به عوامل متعددی از جمله رطوبت، زبری سطح، اندازه ذرات، ترکیب کانی‌شناسی و هم‌پوشانی باندهای جذبی نیز وابسته است. برای مثال، باندهای قوی جذب آب در محدوده‌های حدود ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر می‌توانند موجب تداخل با سیگنال‌های مربوط به سایر ترکیبات خاک شوند و دقت برآورد برخی ویژگی‌ها را کاهش دهند. از این‌رو، استفاده از روش‌های پیش‌پردازش طیفی، شیمی‌سنجی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین به یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر تحلیل داده‌های Vis-NIR تبدیل شده است (Nocita et al., 2015; Barra et al., 2021; Piccini et al., 2024).

در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، فراوانی کربنات کلسیم، گچ و پایین بودن ماده آلی، الگوی پاسخ طیفی را نسبت به بسیاری از خاک‌های مناطق مرطوب متمایز می‌کند. این ویژگی‌ها ضمن ایجاد چالش در تفسیر مستقیم طیف‌ها، ضرورت توسعه مدل‌های واسنجی بومی و استفاده از مجموعه داده‌های مرجع متناسب با شرایط اقلیمی را بیش از پیش آشکار ساخته است.

چارچوب کلی مطالعات طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک

مطالعات طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR) معمولاً از یک گردش کار استاندارد شامل آماده‌سازی نمونه، اندازه‌گیری طیفی، پیش‌پردازش داده‌ها، توسعه مدل، اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل پیروی می‌کنند (شکل ۱). اگرچه این مراحل در اغلب پژوهش‌ها مشترک هستند، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کیفیت اجرای هر مرحله می‌تواند به‌طور مستقیم بر دقت و قابلیت تعمیم مدل‌های پیش‌بینی ویژگی‌های خاک اثر بگذارد. از این‌رو، استانداردسازی مراحل مختلف اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها به یکی از محورهای اصلی تحقیقات طیف‌سنجی خاک تبدیل شده است (Barra et al., 2021; Piccini et al., 2024). هر یک از مراحل فوق می‌تواند به‌عنوان منبع بالقوه خطا در توسعه مدل‌های پیش‌بینی عمل کند؛ از این‌رو، بهینه‌سازی تمامی مراحل برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد ضروری است.

آماده‌سازی نمونه

آماده‌سازی نمونه یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت داده‌های طیفی و عملکرد مدل‌های پیش‌بینی است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که اندازه ذرات، رطوبت نمونه، نحوه خشک‌کردن و یکنواختی سطح خاک می‌تواند شکل طیف بازتابی و در نتیجه دقت برآورد ویژگی‌های خاک را تحت تأثیر قرار دهند. اگرچه الک‌کردن خاک با الک ۲ میلی‌متری به‌عنوان یک روش استاندارد در بسیاری از مطالعات پذیرفته شده است، کاهش بیشتر اندازه ذرات در برخی کاربردها موجب کاهش اثرات پخشیدگی نور و افزایش پایداری سیگنال‌های طیفی شده است. همچنین حذف رطوبت نمونه، به‌ویژه در مطالعات آزمایشگاهی، با کاهش اثر باندهای جذبی آب در حدود ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر، موجب بهبود کیفیت طیف‌ها و افزایش دقت مدل‌های واسنجی می‌شود (Fystro, 2002; Stenberg et al., 2010; Piccini et al., 2024).

اندازه‌گیری و پیش‌پردازش داده‌های طیفی

پس از اندازه‌گیری طیف بازتابی خاک به‌صورت درصد بازتاب (R) در محدوده ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر، داده‌ها به مقیاس جذب تبدیل شده و سپس مراحل پیش‌پردازش بر روی آن‌ها اعمال می‌شود (Clark, 1999; Barra et al., 2021).

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های مطالعات طیف‌سنجی در سال‌های اخیر، توسعه روش‌های پیش‌پردازش داده‌ها برای کاهش اثر عوامل غیرهدف و افزایش اطلاعات مفید طیفی بوده است. طیف‌های خام معمولاً تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های فیزیکی خاک، اندازه ذرات، تغییرات شدت نور، شرایط اندازه‌گیری و نویز دستگاه قرار دارند؛ از این‌رو، انتخاب روش مناسب پیش‌پردازش نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد مدل‌های پیش‌بینی دارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که روش‌هایی مانند Standard Normal Variate (SNV) و Multiplicative Scatter Correction (MSC) در کاهش اثر پخشیدگی نور، مشتق اول و دوم در حذف تغییرات خط زمینه و آشکارسازی باندهای جذبی، و فیلتر Savitzky-Golay (Savitzky & Golay, 1964) در کاهش نویز و هموارسازی طیف‌ها، از پرکاربردترین روش‌های پیش‌پردازش هستند. با این حال، هیچ روش واحدی برای همه شرایط مناسب نیست.

و انتخاب روش به ویژگی‌های خاک، نوع داده و الگوریتم مدل‌سازی بستگی دارد (Stenberg et al., 2010; Barra et al., 2021; Piccini et al., 2024).

کتابخانه‌های طیفی و اثرانگشت طیفی خاک

هر یک از ترکیبات معدنی و آلی خاک، به دلیل ویژگی‌های ساختاری و پیوندهای شیمیایی خود، الگوی جذبی مشخصی در محدوده Vis-NIR ایجاد می‌کنند که از آن با عنوان اثرانگشت طیفی یاد می‌شود. بهره‌گیری از این ویژگی، زمینه توسعه کتابخانه‌های طیفی خاک را فراهم کرده است؛ پایگاه‌هایی که مجموعه‌ای از طیف‌های استاندارد و اطلاعات مرجع نمونه‌های خاک را در بر می‌گیرند و امکان توسعه، انتقال و اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی را در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌کنند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که توسعه کتابخانه‌های طیفی ملی و جهانی، همراه با به‌کارگیری روش‌های انتقال مدل (تطبیق مدل توسعه‌یافته در یک دستگاه یا منطقه با داده‌های حاصل از دستگاه یا منطقه دیگر)، نقش مهمی در افزایش قابلیت تعمیم مدل‌های طیف‌سنجی و گسترش کاربرد آن‌ها در نقشه‌برداری رقومی خاک و پایش محیط‌زیست ایفا می‌کند (Francos et al., 2023; Piccini et al., 2024).

مدل‌سازی، اعتبارسنجی مدل و تحلیل داده‌ها

معمول‌ترین روش‌های مدل‌سازی برای کاربردهای خاک بر اساس رگرسیون‌های خطی به نام‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) (Multiple linear regression)، رگرسیون مؤلفه اصلی (PCR) (Principle component regression) و رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) (Partial least squares regression) هستند. به‌علاوه، استفاده از تکنیک‌های تحلیل داده مثل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) (Artificial Neural network) و درخت‌های رگرسیون افزایشی (Boosted regression trees) در حال افزایش است. در برخی از مطالعات قبل از مدل‌سازی تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) (Principle component analysis) انجام می‌شود. انتخاب الگوریتم مناسب به نوع ویژگی خاک، اندازه مجموعه داده و هدف مطالعه وابسته است و پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین در بسیاری از موارد عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های خطی کلاسیک دارند (Barra et al., 2021; Piccini et al., 2024).

اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته صرفاً به واسنجی آنها محدود نمی‌شود، بلکه منوط به توانایی آن‌ها در پیش‌بینی نمونه‌های خارج از فرآیند مدل‌سازی (تعمیم‌پذیری) است. در گام نهایی، با استفاده از استراتژی‌های تقسیم داده (مانند اعتبارسنجی متقاطع یا ارزیابی بر روی یک مجموعه داده مستقل) و محاسبه شاخص‌های آماری کلیدی نظیر ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص انحراف پیش‌بینی باقیمانده (RPD)، پایداری و دقت مدل سنجیده می‌شود (Piccini et al., 2024; Viscarra Rossel et al., 2024). این مرحله تضمین می‌کند که مدل توسعه‌یافته دچار بیش‌برازش (Overfitting) نشده و در مطالعات میدانی و نقشه‌برداری‌های رقومی در پهنه‌های وسیع قابل اتکا است.



شکل ۱- چارچوب کلی مراحل انجام یک مطالعه طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک



الف) مواد آلی خاک

از نخستین کاربردهای موفق طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک برآورد کربن آلی بوده است و تاکنون بیشترین حجم مطالعات این حوزه به ارزیابی ماده آلی خاک اختصاص یافته است. علت این امر، حضور جذب‌های فرعی و ترکیبی ناشی از ارتعاش پیوندهای C-H، O-H و N-H در محدوده مرئی- مادون قرمز نزدیک است که امکان برآورد نسبتاً دقیق این ویژگی را فراهم می‌کند. بر همین اساس، باندهای طیفی ۱۱۰۰، ۱۶۰۰، ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۲۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر از مهم‌ترین نواحی طیفی برای پیش‌بینی ماده آلی و نیتروژن کل معرفی شده‌اند (Stenberg et al., 2010).

مطالعات انجام‌شده در ایران نیز نشان می‌دهد که طیف‌سنجی Vis-NIR از توانایی مناسبی برای برآورد ماده آلی خاک برخوردار است، هرچند دقت مدل‌ها تحت تأثیر عواملی مانند رطوبت خاک، ویژگی‌های کانی‌شناسی، شوری و نوع الگوریتم مدل‌سازی قرار دارد (جدول ۱). برای مثال، نوروزی و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند که افزایش رطوبت خاک موجب کاهش دقت پیش‌بینی ماده آلی می‌شود و بهترین عملکرد مدل در نمونه‌های خشک حاصل می‌شود. در بسیاری از مطالعات از مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی ماده آلی خاک استفاده شده است. به طور مثال، اکبری فضلی و همکاران (۱۴۰۰) با مقایسه مدل‌های PLSR و SVMR گزارش کردند که مدل PLSR عملکرد دقیق‌تری در برآورد ماده آلی داشته و باندهای طیفی حدود ۱۹۵۰ و ۲۴۹۰ نانومتر بیشترین ارتباط را با این ویژگی نشان می‌دهند. در ادامه، رحمتی و همکاران (۱۴۰۱) با مقایسه چندین الگوریتم مدل‌سازی، عملکرد مناسب PLSR را در برآورد کربن آلی، کربنات کلسیم و هدایت الکتریکی و برتری SVMR را در پیش‌بینی pH گزارش کردند. از سوی دیگر، فهمیده و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند که در شرایط مطالعه آنها، توابع انتقالی خاکی عملکرد بهتری نسبت به توابع انتقالی طیفی داشته‌اند. توابع انتقالی طیفی نشان دادند که در گروه اعتبارسنجی مقدار میانگین مربعات خطای تخمین ۵۰ بدست آمده و حاکی از دقت بسیار پایین مدل است. مطالعات انجام‌شده در خاک‌های شور نیز بیانگر آن است که روابط غیرخطی میان ویژگی‌های خاک و داده‌های طیفی، استفاده از

جدول ۱- نتایج اعتبارسنجی مدل جهت تخمین مقدار کربن آلی با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک در خاک‌های ایران

منطقه	نوع نمونه	محدوده طیفی (نانومتر)	R ² (اعتبارسنجی)	RMSE (اعتبارسنجی)	تعداد نمونه / واسنجی / تعداد نمونه اعتبارسنجی	نوع مدل	روش پیش پردازش	نام محقق
سمیرم (اصفهان)	۲۰۰ نمونه (۱۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۸۸	۰/۰۷	۴۰/۱۶۰	PLSR	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی	رحمتی و همکاران (۱۴۰۱)
حوزه آبخیز دریاچه زریبار (کردستان)	۱۰۰ نمونه (۵ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۲۹	۵۰/۶۶	۲۵/۷۵	MLR	مشتق دوم + فیلتر ساویتزکی و گلائی	فهمیده و همکاران (۱۳۹۸)
قروه (کردستان)	۱۰۰ نمونه (۳۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۶۸	۰/۳	۲۵/۷۵	ANN	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی + فیلتر عزیزی و میان‌متغیر نرمال استاندارد	همکاران (۱۳۹۷)
جزیره هرمز (هرمزگان)	۵۷ نمونه	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۴۴	۰/۲	۲۳/۳۴	PLSR	استاندارد + فیلتر طول موج + طول موج بدون مشتق	دستورانی و بهرامی (۱۳۹۴)
تهران (۴۰ نمونه) خوزستان (۴۲ نمونه) یزد (۲۸ نمونه)	۱۱۰ نمونه	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۵۹	۰/۱۹	-	PLSR	MSC	اکبری فضلی و همکاران (۱۴۰۰)
قروه و دهگلان (کردستان)	۱۲۰ نمونه (۱۵ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۷۲	۲۲/۷۶	۴۰/۸۰	توابع رگرسیونی طیفی	متحنی حذف پیوستار + فیلتر ساویتزکی و گلائی	کریمی و همکاران (۱۳۹۶)
نیریز و استهبان (استان فارس)	۱۰۰ نمونه (۲۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۶۹	۰/۲۵	۳۰/۷۰	PLSR	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی	طاق‌دیس و همکاران (۱۴۰۰)
استان اصفهان	۲۴۸ نمونه (۳۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۶۱	۰/۳	۸۳/۱۶۵	PLSR	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی	خیامیم و همکاران (۱۳۹۴)
استان کرمان	۱۵۰ نمونه (۲۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۶۸	۰/۱۸	۵۰/۱۵۰	PLSR	SNV	رسولی و همکاران (۱۳۹۷)

الگوریتم‌های یادگیری ماشین را ضروری می‌سازد. در این زمینه، عزیزی و همکاران (۱۳۹۷) عملکرد شبکه عصبی مصنوعی را در برآورد ویژگی‌های خاک بهتر از رگرسیون خطی چندگانه گزارش کردند که این موضوع به توانایی بیشتر شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی روابط غیرخطی نسبت داده شد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در رگرسیون خطی چندگانه تعداد متغیرها باید کمتر از نمونه‌ها باشد و در مطالعات طیفی بیش از ۲۰۰۰ متغیر وجود دارد بیش‌برازش (overfitting) اتفاق می‌افتد و از سوی دیگر ممکن است رابطه غیرخطی بین متغیرها وجود داشته باشد، قطعاً برای مطالعات طیفی مدل مناسبی نیست. لذا برای رفع محدودیت‌های MLR روش PLSR برای مطالعات طیفی توصیه شده است.

دستورانی و بهرامی (۱۳۹۴) از روش طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک برای برآورد EC، pH و کربن آلی خاک‌های جزیره هرمز استفاده کردند. نتایج ضریب تبیین نشان داد که پیش‌بینی مدل برای کربن آلی، pH و EC در گروه اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۴۴، ۰/۵۱ و ۰/۹۸ می‌باشد. این محققین کمبود دقت مدل در پیش‌بینی ماده آلی را به کمبود ماده آلی در خاک جزیره هرمز و غلبه اکسیدهای آهن و آلومنیوم و تأثیر رنگ خاک و ایجاد خطا در اندازه‌گیری ماده آلی مرتبط دانستند. خیامیم و همکاران (۱۳۹۴) قابلیت روش طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک در پیش‌بینی چند ویژگی شیمیایی خاک‌های استان اصفهان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که مقادیر R^2 (ضریب تبیین)، RMSEP (حداقل مربعات خطای پیش‌بینی مدل) و RPD (انحراف پیش‌بینی باقیمانده) برای ماده آلی به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۳ و ۱/۶۳ می‌باشد. با توجه به مقادیر RPD، پیش‌بینی مدل برای ماده آلی قابل قبول است. بنابراین، دقت برآورد ماده آلی در مطالعات طیف‌سنجی به دامنه تغییرات این ویژگی، نوع روابط بین داده‌های طیفی و ویژگی‌های خاک و همچنین الگوریتم مدل‌سازی مورد استفاده بستگی دارد.

جدول ۲- نتایج اعتبارسنجی مدل جهت تخمین ذرات خاک با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک در خاک‌های ایران

منطقه	نوع نمونه	محدوده طیفی (نانومتر)	R^2 (اعتبارسنجی)	RMSE (اعتبارسنجی)	تعداد نمونه / اعتبارسنجی / تعداد سنجی	نوع مدل	روش پیش پردازش	نام محقق
سمیرم (اصفهان)	۲۰۰ نمونه (۱۰-۲۵۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۹۳ (رس)	۱/۲۳	۴۰/۱۶۰	PLSR	تصحیح پخشیده	رحمتی و همکاران (۱۴۰۲)
			۰/۹۵ (شن)	۱/۶۳			چندگانه	
			۰/۹۶ (سیلت)	۱/۹۱			بدون پیش‌پردازش	
			۰/۷۴ (رس)	۲/۰۰			Normal-SG	رزقی و همکاران (۱۳۹۸)
استان تهران	۵۰ نمونه (۳۰-۲۵۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۶۷ (سیلت)	۳/۴۳	اعتبارسنجی متقابل	PLSR	Normal-SG	
			۰/۸۶ (شن)	۱/۸۶			Normal-SG	
			۰/۶۶ (رس)	۱۴/۱ (رس)			توابع	کریمی و همکاران (۱۳۹۶)
			۰/۷ (سیلت)	۸/۱۵ (سیلت)			رگرسیونی	
قروه و دهگلان (کردستان)	۱۲۰ نمونه (۱۵-۲۵۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۷۲ (شن)	۱۰/۹ (شن)	۴۰/۸۰	PLSR	سواپترکی و گلای	
			۰/۷۲ (رس)	۱۰/۲۴			سواپترکی و گلای	
			۰/۶۸ (شن)	۸/۶۸			سواپترکی و گلای	
			۰/۱ (سیلت)	۹/۶۱			مشق اول+فیلتر	دانش و همکاران (۱۴۰۲)
استان مازندران	۱۲۸ نمونه (۲۰-۲۵۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۷۲ (رس)	۱۰/۲۴	۳۲/۹۶	PLSR	سواپترکی و گلای	
			۰/۶۸ (شن)	۸/۶۸			سواپترکی و گلای	
			۰/۷۲ (رس)	۱۰/۲۴			سواپترکی و گلای	
			۰/۱ (سیلت)	۹/۶۱			مشق اول+فیلتر	دانش و همکاران (۱۴۰۲)
استان کرمان	۱۵۰ نمونه (۲۰-۲۵۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۶۴ (شن)	۳/۹ (شن)	۵۰/۱۵۰	PLSR	سواپترکی و گلای	
			۰/۶۶ (سیلت)	۳/۴۴ (سیلت)			سواپترکی و گلای	
			۰/۷۲ (رس)	۱۰/۲۴			سواپترکی و گلای	
			۰/۷۲ (رس)	۱۰/۲۴			مشق اول+فیلتر	رسولی و همکاران (۱۳۹۷)

ب) بافت خاک

بافت خاک به دلیل نقش اساسی در تشکیل خاک‌دانه، ساختمان خاک و پدیده‌های انقباض و انبساط، از مهم‌ترین ویژگی‌هایی است که در مطالعات طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک مورد توجه قرار گرفته است. خاک‌های شنی به علت ظرفیت نگهداری رطوبت کمتر،



بازتاب طیفی بیشتری نسبت به خاک‌های رسی دارند (Stenberg et al., 2010). همچنین، باندهای جذبی مرتبط با گروه‌های هیدروکسیل آب و ترکیبات Fe-OH ، Al-OH و Mg-OH در کانی‌های خاک، شاخص‌های مؤثری برای برآورد مقدار رس و ویژگی‌های وابسته به آن، از جمله سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی، محسوب می‌شوند (Zhang et al., 2020).

در مقیاس جهانی، (Araújo et al., ۲۰۱۴) با بررسی ۷۱۷۲ نمونه خاک در برزیل نشان دادند که تفکیک کتابخانه طیفی به زیربخش‌های کانی‌شناسی همگن، دقت پیش‌بینی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در این مطالعه، ماشین بردار پشتیبان نسبت به روش‌های PLS و درخت‌های رگرسیونی تقویتی (Boosted Regression Trees; BRT) عملکرد بهتری داشت و دقت پیش‌بینی رس و ماده آلی به ترتیب به RMSE کمتر از ۶/۸ و ۰/۴۷ درصد رسید. مطالعات انجام‌شده در ایران نیز بیانگر قابلیت طیف‌سنجی در پیش‌بینی اجزای بافت خاک هستند، هرچند میزان دقت به ویژگی‌های منطقه وابسته است. کریمی و همکاران (۱۳۹۶) در کردستان، با تأکید بر تأثیر تغییرپذیری مکانی و تفاوت ویژگی‌های خاک، ضرورت توسعه مدل‌های اختصاصی برای هر منطقه را مطرح کردند. نتایج این پژوهش با یافته‌های رحمتی و همکاران (۱۴۰۲) در سمیرم و رزقی و همکاران (۱۳۹۸) در استان تهران همخوانی دارد که در آن‌ها مدل PLS دقت بالایی در برآورد رس و شن نشان داد. در مقابل، رسولی و همکاران (۱۳۹۷) در بردسیر کرمان گزارش کردند که پیش‌بینی رس و pH از دقت کمتری برخوردار است، در حالی که برآورد شن و سیلت مناسب بود. همچنین، دانش و همکاران (۱۴۰۲) در استان مازندران عملکرد ضعیف مدل PLSR را در پیش‌بینی سیلت به دامنه پایین ضریب تغییرات (۲۳/۸ درصد) نسبت دادند، در حالی که همان مدل در برآورد شن و رس نتایج مطلوبی ارائه کرد (دانش و همکاران، ۱۴۰۱ و ۱۳۹۵). این یافته‌ها نشان می‌دهد که کارایی مدل‌های طیفی بیش از شرایط اقلیمی، تحت تأثیر ویژگی‌ها و تنوع ذاتی خاک قرار دارد.

ج) رطوبت خاک

رطوبت خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بازتاب طیفی در محدوده مرئی-مادون قرمز نزدیک است. جذب آب در طول موج‌های ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر ناشی از ارتعاش پیوند O-H مولکول‌های آب است و شدت آن می‌تواند تحت تأثیر کانی‌شناسی و ظرفیت نگهداری آب خاک قرار گیرد. (Stenberg et al., 2010). با وجود تفاوت تداخل و ویژگی‌های نوری خاک‌ها، رطوبت در حد ظرفیت زراعی همبستگی مناسبی با طیف مادون قرمز نشان می‌دهد (Soriano-Disla et al., 2014). بابائیان و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک، دقت متوسطی در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (میانگین ضریب همبستگی ۰/۶۳) گزارش کردند. همچنین، پیش‌بینی رطوبت حجمی در پتانسیل‌های ماتریک پایین دقیق‌تر بود که به رابطه غیرخطی بین رطوبت خاک و پتانسیل ماتریک نسبت داده شد. در مجموع، رطوبت خاک علاوه بر اینکه خود یک ویژگی قابل پیش‌بینی است، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت طیف‌های Vis-NIR محسوب می‌شود و کنترل آن در مراحل اندازه‌گیری و واسنجی برای دستیابی به مدل‌های دقیق ضروری است.

د) عناصر غذایی مورد نیاز گیاه

بیشتر عناصر غذایی فاقد باند جذبی اختصاصی در محدوده Vis-NIR هستند و برآورد آن‌ها عمدتاً بر پایه روابط غیرمستقیم با ماده آلی، رس و سایر اجزای فعال خاک انجام می‌شود (Chang et al., 2001; Ehsani et al., 1999). Yang et al (۲۰۱۲) ضرایب تبیین ۰/۸۹، ۰/۹۱ و ۰/۵۳ را به ترتیب برای نیتروژن کل، کربن کل، کربن آلی و کربن معدنی گزارش کردند. همچنین، Xuemei and Jianshe (۲۰۱۳) نشان دادند که روش حداقل مربعات ماشین بردار اطمینان نسبت به PLSR دقت بیشتری در برآورد ماده آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم دارد و مقادیر R^2 به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۸۲، ۰/۷۶ و ۰/۷۲ به دست آمد.

ه) pH خاک

مکانیسم‌های مسئول تولید اسیدیته خاک بسته به نوع خاک می‌تواند متفاوت باشد (Reeves et al. 2001). بنابراین، تنوع نمونه به علت مکان‌ها و اعماق مختلف می‌تواند بر کالیبراسیون pH تأثیر بگذارد. به طور متوسط R^2 و RMSE بدست آمده در مطالعات مختلف برای پیش‌بینی pH خاک به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۲۹ واحد pH بوده است (Soriano-Disla et al. 2014). pH خاک یا فعالیت یون هیدروژن پاسخ طیفی مستقیمی ندارد و از طریق همبستگی غیرمستقیم pH با ویژگی‌های خاک (رس و ماده آلی) این پارامتر توسط روش طیف‌سنجی پیش‌بینی می‌شود (Soriano-Disla et al. 2014). بنابراین، موفقیت مدل‌های Vis-NIR در برآورد pH بیش از آنکه ناشی از پاسخ طیفی مستقیم باشد، به همبستگی pH با سایر ویژگی‌های خاک و دامنه تغییرات آن در مجموعه داده وابسته است.

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی مدل جهت تخمین مقدار pH با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک در خاک‌های ایران

منطقه	نوع نمونه	محدوده طیفی (نانومتر)	R ² (اعتبارسنجی)	RMSE (اعتبارسنجی)	تعداد نمونه / تعداد واسنجی / تعداد نمونه اعتبارسنجی	نوع مدل	روش پیش پردازش	نام محقق
سمیرم (اصفهان)	۲۰۰ نمونه (۱۰-۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۷۳	۰/۰۵	۴۰/۱۶۰	PLSR	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی	رحمتی و همکاران (۱۴۰۱)
قروه (کردستان)	۱۰۰ نمونه (۳۰-۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۲۹	۰/۵۹	۲۵/۷۵	ANN	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی + فیلتر میانه + متغیر نرمال استاندارد	عزیزی و همکاران (۱۳۹۷)
جزیره هرمز (هرمزگان)	۵۷ نمونه	۳۵۰-۲۵۰	۰/۵۱	۰/۳۴	۲۳/۳۴	PLSR	(متغیر نرمال استاندارد + فیلتر طول موج + طول موج بدون مشتق)	دستورانی و بهرامی (۱۳۹۴)
استان کرمان	۱۵۰ نمونه (۲۰-۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۰۱	۰/۲۳	۵۰/۱۵۰	PLSR	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی	رسولی و همکاران (۱۳۹۷)

در ایران، عزیزی و همکاران (۱۳۹۷) نشان دادند که مدل شبکه عصبی نسبت به رگرسیون خطی چندگانه عملکرد بهتری در برآورد pH خاک‌های شور دارد، اما دقت پیش‌بینی همچنان محدود است. همچنین، رسولی و همکاران (۱۳۹۷) و دستورانی و بهرامی (۱۳۹۴) با استفاده از مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی نیز نتوانستند pH خاک را با دقت مطلوب برآورد کنند.

ر) عناصر سنگین و سایر آلاینده‌های خاک

عناصر سنگین در محدوده مرئی- مادون قرمز نزدیک باند جذبی اختصاصی ندارند، اما از طریق ارتباط با اجزای فعال خاک مانند ماده آلی، اکسیدها، هیدروکسیدها، سولفیدها و کربنات‌ها قابل برآورد هستند. طول موج‌های ۴۶۰، ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر از مهم‌ترین متغیرهای طیفی در پیش‌بینی این عناصر به شمار می‌روند (Dong et al., 2011). (Dong et al., 2011) با استفاده از طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک و میانی، دقت مناسبی در پیش‌بینی ماده آلی، pH و آرسنیک ($RPD > 1.5$) گزارش کردند و نشان دادند که در آن مطالعه آرسنیک و مس نسبت به سایر فلزات سنگین با دقت بیشتری قابل پیش‌بینی هستند. همچنین، Xie et al. (2012) با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزئی، دقت بالایی برای برآورد ماده آلی و آهن ($R^2 > 0.8$)، دقت متوسط برای pH، سرب، مس و کادمیم ($R^2 < 0.8$) و دقت ضعیف برای روی ($R^2 < 0.5$) گزارش کردند.

در مطالعات داخلی، شمس‌الدینی و اسماعیلی (۱۴۰۱) نشان دادند که طیف‌سنجی مادون قرمز میانی و روش‌های غیرخطی یادگیری ماشین، به‌ویژه جنگل تصادفی، عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون خطی دارند، در حالی که طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک برای پیش‌بینی فلزات سنگین از دقت کافی برخوردار نبود. سمیعی‌فرد و متین‌فر (۱۳۹۶) نیز گزارش کردند که استفاده از طیف‌های مشتق و مدل PLSR، نتایجی نزدیک‌تر به روش جذب اتمی در برآورد سرب و نیکل ارائه می‌دهد. همچنین، محمدی‌منور و باقرپور (۱۳۹۶) با مقایسه مدل‌های PLSR و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد کادمیم و سرب، نشان دادند که پیش‌پردازش‌های SNV و MSC مؤثر بوده و شبکه عصبی مصنوعی (BPNN) به دلیل توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی، عملکرد بهتری نسبت به PLSR دارد. در مجموع، دقت پیش‌بینی عناصر سنگین بیش از آنکه به خود عنصر وابسته باشد، به میزان همبستگی آن با اجزای فعال خاک، کیفیت پیش‌پردازش داده‌ها و الگوریتم مدل‌سازی بستگی دارد.



جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی مدل جهت تخمین عناصر سنگین با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک در خاک‌های ایران

منطقه	نوع نمونه	محدوده طیفی (نانومتر)	R ² (اعتبارسنجی)	RMSE (اعتبارسنجی)	تعداد نمونه واسنجی / تعداد نمونه اعتبارسنجی	روش پیش پردازش	نوع مدل	نام محقق
شهر ری (تهران)	۳۲۴ نمونه خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی-متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۸۴ (نیکل) ۰/۹۲ (سرب)	۰/۱۲ (نیکل) ۱/۰۶ (سرب)	-	مشتق	PLSR	سمیعی فرد و متین‌فر (۱۳۹۶)
بهار (همدان)	۹۵ نمونه خاک سطحی (۰-۴۵ سانتی‌متر)	۳۷۰-۲۰۰۰	۰/۸۹ (کادمیم) ۰/۹۰ (سرب)	۰/۳۶ (کادمیم) ۰/۴۱ (سرب)	۳۱/۶۴	SNV	BPNN	محمدی منور و باقرپور (۱۳۹۶)

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی مدل جهت تخمین مقدار هدایت الکتریکی خاک با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک در خاک‌های ایران

منطقه	نوع نمونه	محدوده طیفی (نانومتر)	R ² (اعتبارسنجی)	RMSE (اعتبارسنجی)	تعداد نمونه واسنجی / تعداد نمونه اعتبارسنجی	روش پیش پردازش	نوع مدل	نام محقق
سمیرم (اصفهان)	۲۰۰ نمونه (۰-۱۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۹۳	۰/۰۵	۴۰/۱۶۰	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی	PLSR	رحمتی و همکاران (۱۴۰۱)
استان فارس	۲۳ نمونه (۰-۲۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۷۴	۲۹/۹۴	۱۵/۸	فیلتر میانه	PLSR	فهندژ و نوشادی (۱۳۹۸)
قروه (کردستان)	۱۰۰ نمونه (۰-۳۰ سانتی‌متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۸۸	۰/۸۱	۲۵/۷۵	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی + فیلتر میانه + متغیر نرمال استاندارد	ANN	عزیزی و همکاران (۱۳۹۷)
جزیره هرمز (هرمزگان)	۵۷ نمونه خاک سطحی	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۹۸	۲/۶۳	۲۳/۳۴	(متغیر نرمال) استاندارد + فیلتر طول موج + طول موج بدون مشتق	PLSR	دستورانی و بهرامی (۱۳۹۴)
نیریز و استهبان (استان فارس)	۱۰۰ نمونه (۰-۲۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۶۴	۰/۸۷	۳۰/۷۰	مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلائی	PLSR	طاق‌دیس و همکاران (۱۴۰۰)
جنوب و مرکز استان خوزستان	۱۴۲ نمونه (۰-۵ سانتی متر)	۴۵۰-۲۴۵۰	۰/۸۸	۳/۵۸	۳۹/۱۰۳	حذف پیوستار	SVR	چترنور و همکاران (۱۳۹۹)

ز) هدایت الکتریکی خاک

هدایت الکتریکی خاک به دلیل وابستگی بیشتر به محلول خاک نسبت به بخش جامد، با دقت محدودی توسط طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک و میانی پیش‌بینی می‌شود (Soriano-Disla et al., 2014). همچنین، (Viscarrá Rossel et al., 2006) بیان کردند که دقت پیش‌بینی EC علاوه بر ویژگی‌های خاک، تحت تأثیر عوامل اقلیمی، زمین‌نما و ارتباط آن با رس و ماده آلی قرار دارد. با این حال، برخی نمک‌ها دارای باندهای جذبی مشخص در محدوده مادون قرمز نزدیک هستند (Dark, N. A., 1995). همچنین، Dehaan and Taylor (2002) طول موج‌های ۵۰۵، ۹۲۰، ۱۴۱۵، ۱۹۱۵ و ۲۲۰۵ نانومتر را به عنوان نواحی کلیدی تشخیص خاک‌های

شور معرفی کردند. اگرچه برخی نمک‌ها دارای باندهای جذبی مشخص هستند، وابستگی EC به غلظت یون‌های محلول و شرایط رطوبتی باعث می‌شود دقت پیش‌بینی آن در بسیاری از مطالعات محدود باشد. در مطالعات داخلی، فهندژ و نوشادی (۱۳۹۸) با وجود دستیابی به $R^2=0.74$ ، به دلیل تعداد کم نمونه‌ها و RMSE بالا، دقت مدل را ناکافی دانستند. در مقابل، عزیزی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از دامنه وسیع شوری و مدل شبکه عصبی، عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون خطی چندگانه در برآورد EC گزارش کردند. همچنین، چترنور و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند که مدل ترکیبی PLSR-ANN دقیق‌ترین روش برای پیش‌بینی شوری بوده و طول موج‌های ۱۵۰۰، ۱۸۰۰، ۱۹۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۳۰۰ نانومتر بیشترین ارتباط را با شوری خاک دارند. با این حال، نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهد که ضریب تبیین بالا لزوماً بیانگر دقت مناسب مدل نیست و مقادیر زیاد RMSE می‌تواند نشان‌دهنده خطای قابل توجه در پیش‌بینی شوری باشد.

جدول ۶- نتایج اعتبارسنجی مدل جهت تخمین مقدار کربنات کلسیم معادل با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک در خاک- های ایران

منطقه	نوع نمونه	محدوده طیفی (نانومتر)	R^2 (اعتبارسنجی)	NRMSE/RMSE (اعتبارسنجی)	تعداد نمونه / واسنجی / تعداد نمونه اعتبارسنجی	نوع مدل	روش پیش پردازش	نام محقق
سمیرم (اصفهان)	۲۰۰ نمونه (۱۰-۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۹۶	۰/۶۲	۴۰/۱۶۰	ANN	متغیر نرمال استاندارد	رحمتی و همکاران (۱۴۰۱)
قروه (کردستان)	۱۰۰ نمونه (۳۰-۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۵۲	۱۳/۰۴	۲۵/۷۵	ANN	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی و گلاي+فیلتر میانه+متغیر نرمال	عزیزی و همکاران (۱۳۹۷)
تهران (نمونه خوزستان ۴۲) (نمونه)	۱۱۰ نمونه	۳۵۰-۲۵۰	۰/۷۸	۵/۷	-	PLSR	مشتق دوم همراه با فیلتر ساویتزکی گولای	اکبری فضلی و همکاران (۱۴۰۰)
نیریز و استهبان (استان فارس)	۱۰۰ نمونه (۲۰-۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۷۳	۵/۷۷	۳۰/۷۰	PLSR	جذب بدون پیش پردازش	طاقدیس و همکاران (۱۴۰۰)
قروه و دهگلان (کردستان)	۱۲۰ نمونه (۱۵-۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۶۴	۲۶/۸۱	۴۰/۸۰	رگرسیون طیفی	منحنی حذف پیوستار+ فیلتر ساویتزکی و گلاي	کریمی و همکاران (۱۳۹۶)
استان کرمان	۱۵۰ نمونه (۲۰-۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰	۰/۶۲	۲/۰۵	۵۰/۱۵۰	PLSR	مشتق اول همراه با فیلتر ساویتزکی گولای	رسولی و همکاران (۱۳۹۷)
استان فارس	۲۳۴ نمونه خاک سطحی	۴۰۰-۲۵۰	۰/۸۲	۹/۶۷	۵۸/۱۷۶	PLSR	مشتق اول همراه با فیلتر ساویتزکی گولای	مظفری و همکاران (۲۰۲۲)

ژ) کربنات کلسیم معادل (Calcium Carbonate Equivalent, CCE)

به دلیل نقش مهم کربنات کلسیم در حاصلخیزی خاک، برآورد و تهیه نقشه پراکنش آن از اهمیت بالایی برخوردار است. طاقدیس و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از مدل PLSR، توانایی مناسب طیف‌سنجی در برآورد ویژگی‌های خاک را نشان دادند؛ به‌طوری‌که محدوده



مرئی برای کربن آلی و هدایت الکتریکی و محدوده مادون قرمز نزدیک برای کربنات کلسیم معادل و گچ عملکرد بهتری داشت. توسعه مدل‌های اختصاصی برای مناطق مختلف ضروری است، زیرا تفاوت در مقدار کربنات، گچ، شوری و کانی‌شناسی موجب تغییر پاسخ‌های طیفی و کاهش قابلیت انتقال مدل‌ها می‌شود. عزیزی و همکاران (۱۳۹۷) نیز گزارش کردند که مدل شبکه عصبی در برآورد کربنات کلسیم دقت کافی نداشت ($RMSE=13\%$) که احتمالاً ناشی از تأثیر نمک بر ویژگی‌های طیفی کربنات کلسیم بود. همچنین، مظفری و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که مدل PLSR نسبت به توابع انتقال طیفی (STF) عملکرد بهتری در پیش‌بینی بیشتر ویژگی‌های خاک دارد، در حالی که STF‌ها کربنات کلسیم معادل (CCE) و برخی ویژگی‌های دیگر را با دقت بسیار خوب برآورد کرده و برای خاک‌های آهکی به‌منظور کاهش زمان و هزینه قابل توصیه هستند.

جذب اختصاصی گچ موجب شده است که این ویژگی معمولاً با دقت بیشتری نسبت به بسیاری از ویژگی‌های شیمیایی خاک توسط طیف‌سنجی Vis-NIR برآورد شود.

گچ

گچ نقش مهمی در نگهداری آب، پایداری خاک‌دانه‌ها و ساختمان خاک دارد؛ از این‌رو، با توجه به دشواری و هزینه اندازه‌گیری مستقیم، استفاده از طیف‌سنجی به‌عنوان روشی غیرمستقیم در اندازه‌گیری آن مورد توجه قرار گرفته است (چترنور و همکاران، ۲۰۲۰؛ خیامیم و همکاران، ۲۰۱۵). چترنور و همکاران (۱۳۹۹) و مینا و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که مدل SVR نسبت به PLSR دقت بیشتری در برآورد گچ خاک دارد و طول موج‌های حدود ۱۴۰۰، ۱۴۵۰، ۱۵۷۰، ۱۷۰۰-۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۳۰۰، ۲۳۳۸ و ۲۴۰۰ نانومتر بیشترین ارتباط را با مقدار گچ دارند. همچنین، خیامیم و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که PLSR نسبت به روش حذف پیوستار (CR) عملکرد بهتری داشته و به دلیل باندهای جذبی متمایز گچ، پیش‌بینی آن از کربنات‌ها دقیق‌تر است. مهرابی گوهری و همکاران (۱۳۹۸) نیز برتری PLSR نسبت به رگرسیون مؤلفه اصلی را در برآورد گچ، کربنات‌ها و ماده آلی تأیید کردند. بنابراین، وجود باندهای

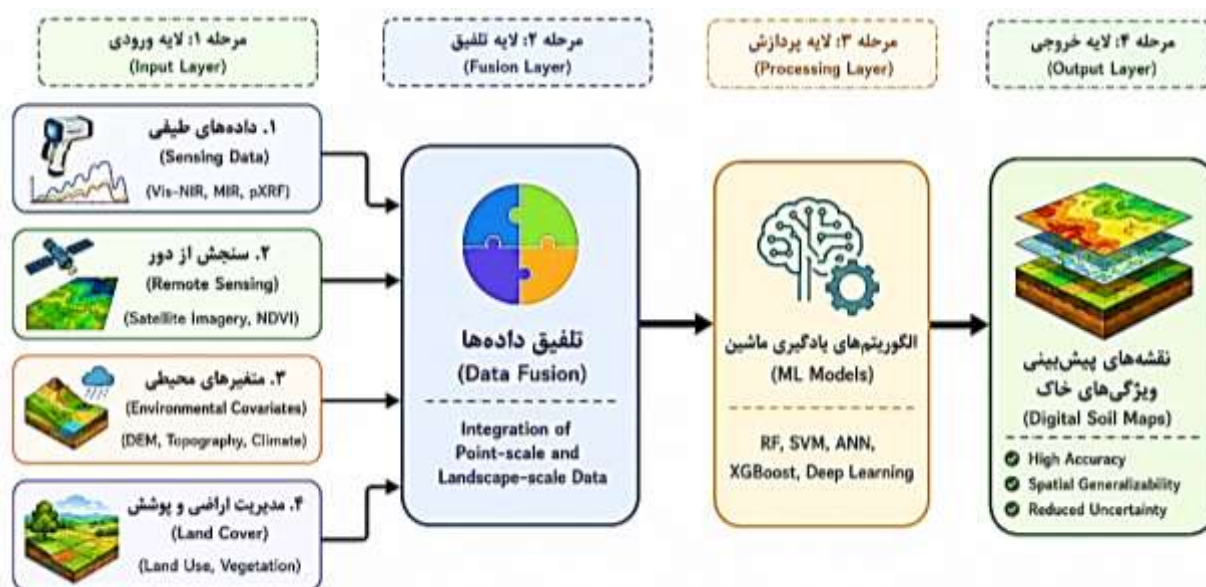
جدول ۷- نتایج اعتبارسنجی مدل جهت تخمین مقدار گچ با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک در خاک‌های ایران

منطقه	نوع خاک	محدوده طیفی (نانومتر)	R^2 (اعتبارسنجی)	RMSE (اعتبارسنجی)	تعداد نمونه / تعداد سنجی	نوع مدل	روش پیش-پردازش	نام محقق
استان فارس	۱۰۰ نمونه خاک سطحی	۴۰۰-۲۵۰۰	۰/۷۳	۰/۳۹	۳۰/۷۰	SVR	مشق اول+فیلتر ساویترکی و گلای	مینا و همکاران (۲۰۲۳)
نیریز و استهبان (استان فارس)	۱۰۰ نمونه (۰-۲۰ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۸۱	۳/۸۷	۳۰/۷۰	PLSR	SNV	طاقدیس و همکاران (۱۴۰۰)
کل استان اصفهان	۲۵۱ نمونه خاک سطحی	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۸۶	۳/۴	۸۱/۱۷۰	PLSR	مشق اول+فیلتر ساویترکی و گلای	خیامیم و همکاران (۲۰۱۵)
جنوب و مرکز استان خوزستان	۱۴۲ نمونه (۰-۵ سانتی متر)	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۸۹	۷/۰۸	۳۹/۱۰۳	PLSR+ANN	مشق دوم+فیلتر ساویترکی و گلای	چترنور و همکاران (۱۳۹۸)
زرد استان کرمان	۱۱۵ نمونه خاک سطحی	۳۵۰-۲۵۰۰	۰/۶۵	۳/۴۵	۲۳/۹۲	PLSR	مشق اول+فیلتر ساویترکی و گلای	مهرابی گوهری و همکاران (۱۳۹۸)

رویکردهای تلفیقی در پیش‌بینی ویژگی‌های خاک

در سال‌های اخیر، پیش‌بینی ویژگی‌های خاک از تکیه بر داده‌های تک‌منبعی به سمت رویکردهای تلفیقی (Data Fusion) حرکت کرده است. دلیل اصلی این تغییر، ماهیت پیچیده و ناهمگن خاک است؛ به‌گونه‌ای که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تنها تابع ترکیب مواد معدنی نیست، بلکه تحت تأثیر متقابل عوامل محیطی نظیر توپوگرافی، اقلیم، پوشش گیاهی و مدیریت اراضی قرار دارد (Piccini et al., 2024). در واقع، داده‌های طیفی اطلاعات را در مقیاس نمونه فراهم می‌کنند، در حالی که متغیرهای محیطی، اطلاعات را در مقیاس پهنه‌ای (Landscape-scale) ارائه می‌دهند. تلفیق این دو سطح از اطلاعات، منجر به کاهش خطای پیش‌بینی و افزایش قابلیت تعمیم مدل‌ها در مقیاس‌های وسیع‌تر می‌شود. در این چارچوب، داده‌های سنجنش نزدیک V-NIR و MIR با اطلاعات سنجنش از دور، متغیرهای توپوگرافی مشتق‌شده از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، داده‌های اقلیمی و اطلاعات کاربری اراضی ادغام می‌شوند. این متغیرها به عنوان متغیرهای کمکی، اطلاعات مکملی از فرآیندهای خاک‌سازی فراهم کرده و در مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین نظیر RF، SVM، ANN و XGBoost به کار گرفته می‌شوند (شکل ۲). ترکیب داده‌های طیفی با متغیرهای محیطی، به‌ویژه در مناطق دارای تغییرات شدید توپوگرافی، دقت پیش‌بینی را به‌طور محسوس ارتقا می‌دهد.

برای نمونه، Zare et al. (۲۰۲۱) نشان دادند که بهره‌گیری از داده‌های کمکی و روش‌هایی مانند رگرسیون کوکریجینگ، دقت نقشه‌برداری رقومی خاک را به‌طور محسوس ارتقاء می‌دهد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز، Zhao et al. (۲۰۲۴) گزارش کردند که تلفیق متغیرهای محیطی با داده‌های طیفی، منجر به بهبود چشم‌گیر در برآورد پارامترهای حساس نظیر شوری و سدیمی بودن خاک شده و پایداری مدل را در برابر تغییرات مکانی افزایش داده است. همچنین، Hasheminejad and Beyrami (۲۰۲۵) بررسی باغات پسته، اثبات کردند که ترکیب داده‌های سنجنش نزدیک و سنجنش از دور در مدل SVM، منجر به عملکرد دقیق‌تری در برآورد شوری خاک نسبت به مدل‌های تک‌منبعی می‌شود. علاوه بر این، هم‌افزایی بین شاخص‌های توپوگرافی و داده‌های طیفی، می‌تواند خطای پیش‌بینی رطوبت و مواد مغذی خاک را تا حد زیادی کاهش دهد. Zhang et al., (2024) نیز با به‌کارگیری یادگیری عمیق برای تلفیق داده‌های XRF و طیف‌سنجی Vis-NIR، به دقت‌های بالایی در نقشه‌برداری با تفکیک‌پذیری بالا دست یافتند که نشان‌دهنده توانایی این مدل‌ها در استخراج ویژگی‌های غیرخطی پیچیده است.



شکل ۲- چارچوب کلی مراحل انجام یک مطالعه تلفیقی برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک

در نهایت، روند پژوهشی فعلی به‌ویژه در خاک‌های خشک و نیمه‌خشک به سمت ادغام جامع داده‌های Vis-NIR، MIR، فلورسانس پرتو ایکس (XRF)، سنجنش از دور و متغیرهای محیطی در کنار الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین در حرکت است؛ رویکردی که هدف آن به حداقل رساندن عدم قطعیت و ارتقای قابلیت تعمیم مکانی مدل‌ها در خاک‌هایی با تغییرپذیری بالا است (Gozukara et al., 2025).

چالش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک توسط طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک در مناطق خشک و نیمه خشک

کاربرد طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR) در برآورد ویژگی‌های خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش‌های متعددی مواجه است که می‌توان آن‌ها را در سه گروه اصلی شامل چالش‌های مربوط به نمونه‌های خاک، چالش‌های طیفی و اندازه‌گیری، و چالش‌های مدل‌سازی طبقه‌بندی کرد.

۱. چالش‌های مربوط به نمونه‌های خاک

مهم‌ترین محدودیت در این مناطق، ویژگی‌های ذاتی خاک از جمله مقادیر بالای کربنات، گچ، شوری، اختلاط کانی‌های رسی و ناهمگنی ترکیب خاک است. این عوامل موجب هم‌پوشانی باندهای جذبی و تداخل سیگنال‌های طیفی شده و استخراج اطلاعات مربوط به هر ویژگی خاک را دشوار می‌کنند در نتیجه قابلیت انتقال مدل‌ها بین مناطق مختلف را نیز کاهش می‌دهند. خیامیم و همکاران (۱۳۹۷) نشان دادند که در خاک‌های استان اصفهان، اختلاط کانی‌های ایلیت، اسمکتیت، پالیگورسکیت، گچ و کربنات سبب کاهش توانایی روش حذف پیوستار در برآورد کانی‌های رسی شده است. همچنین پژوهش‌های مینا و همکاران (۲۰۲۲)، اوبرهولزر و همکاران (۲۰۲۴)، تهمورث و همکاران (۲۰۲۴) و بارتیمسکی و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان داده‌اند که مقادیر بالای کربنات، گچ و شوری باعث تضعیف یا ماسک شدن سیگنال‌های ماده آلی و سایر ترکیبات خاک شده و دقت مدل‌های Vis-NIR را کاهش می‌دهد. راهکارهای پیشنهادی برای کاهش این محدودیت‌ها شامل توسعه کتابخانه‌های طیفی بومی، افزایش تعداد و تنوع نمونه‌های آموزشی، تفکیک نمونه‌ها بر اساس کلاس‌های خاک، و استفاده از توابع انتقال طیفی (Spectral Transfer Functions) برای شرایط اقلیمی و خاک‌شناسی مشابه است. این راهکارها می‌توانند بخشی از اثر ناهمگنی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک را کاهش دهند، هرچند کاهش کامل این محدودیت‌ها امکان‌پذیر نیست.

۲. چالش‌های مربوط به اندازه‌گیری و داده‌های طیفی

کیفیت داده‌های طیفی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت پیش‌بینی دارد. وجود نویز، هم‌پوشانی باندهای جذبی، تغییرات بازتاب ناشی از ویژگی‌های فیزیکی خاک و انتخاب نامناسب نواحی طیفی، از مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد مدل‌ها هستند. در خاک‌های آهکی و گچی، هم‌پوشانی باندهای جذبی کربنات، گچ و ماده آلی موجب کاهش قدرت تفکیک اطلاعات طیفی می‌شود. راهکارهای پیشنهادی در این زمینه شامل استفاده از روش‌های مناسب پیش‌پردازش طیفی مانند مشتق اول و دوم، SNV، MSC، حذف پیوستار، هموارسازی Savitzky-Golay، حذف نویز و انتخاب طول موج‌های مؤثر است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این روش‌ها می‌توانند اثر عوامل مزاحم را کاهش داده و کیفیت اطلاعات استخراج‌شده از طیف‌ها را بهبود بخشند.

چالش‌های مربوط به مدل‌سازی

علاوه بر کیفیت نمونه‌ها و داده‌های طیفی، انتخاب روش مدل‌سازی نیز تأثیر زیادی بر دقت پیش‌بینی دارد. انتخاب نامناسب الگوریتم رگرسیون، بیش‌برازش مدل، و عدم تطابق مدل با شرایط خاص خاک‌های خشک و نیمه‌خشک از جمله محدودیت‌های مهم محسوب می‌شوند. خیامیم و همکاران (۱۳۹۷) نشان دادند که رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) نسبت به روش حذف پیوستار عملکرد بهتری در پیش‌بینی کانی‌های رسی دارد. همچنین مینا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که انتخاب الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند SVR در کنار پیش‌پردازش مناسب، نسبت به برخی روش‌های متداول، دقت بیشتری در برآورد ویژگی‌های خاک ایجاد می‌کند. راهکارهای پیشنهادی شامل انتخاب الگوریتم متناسب با نوع ویژگی خاک، استفاده از روش‌های انتخاب ویژگی، تنظیم ابرپارامترها، اعتبارسنجی متقابل، بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین پیشرفته و توسعه مدل‌های ترکیبی است. همچنین استفاده از مجموعه‌داده‌های بزرگ و متنوع و مدل‌های بومی‌سازی شده می‌تواند قابلیت تعمیم مدل‌ها را افزایش دهد. به‌ویژه در مجموعه‌داده‌های کوچک، استفاده از مدل‌های بسیار پیچیده می‌تواند موجب بیش‌برازش شود.

در مجموع، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که کربنات، گچ، شوری و پیچیدگی کانی‌شناسی خاک مهم‌ترین عوامل کاهش دقت مدل‌های Vis-NIR در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. به‌کارگیری پیش‌پردازش‌های طیفی مناسب، انتخاب الگوریتم‌های یادگیری ماشین کارآمد، توسعه کتابخانه‌های طیفی محلی و استفاده از مجموعه‌داده‌های گسترده، مهم‌ترین راهکارهای عملی برای کاهش این محدودیت‌ها محسوب می‌شوند، هرچند کاهش کامل اثر این عوامل در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نیست.

مزایای اقتصادی طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک

طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR) طی دو دهه اخیر به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در کاهش هزینه و افزایش

بهره‌وری پایش ویژگی‌های خاک شناخته شده است. برخلاف روش‌های شیمیایی متداول که برای هر ویژگی خاک به آزمایش‌های مجزا، مصرف مواد شیمیایی، آماده‌سازی زمان‌بر نمونه‌ها و نیروی انسانی متخصص نیاز دارند، در طیف‌سنجی تنها با یک بار ثبت طیف می‌توان اطلاعات مربوط به چندین ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را به‌طور هم‌زمان استخراج کرد. این ویژگی موجب کاهش زمان آنالیز، کاهش مصرف مواد شیمیایی، افزایش سرعت پردازش نمونه‌ها و در نتیجه کاهش هزینه‌های عملیاتی آزمایشگاه می‌شود. افزون بر آن، ماهیت غیرمخرب این روش امکان استفاده مجدد از نمونه‌ها و کاهش تولید پسماندهای شیمیایی را فراهم می‌کند که از دیدگاه اقتصادی و زیست‌محیطی مزیت مهمی به شمار می‌رود.

با وجود این مزایا، مطالعات اخیر تأکید دارند که صرف کاهش هزینه نباید به کاهش کیفیت داده‌های مرجع یا کاهش دقت اندازه‌گیری منجر شود. درواقع، موفقیت اقتصادی طیف‌سنجی زمانی محقق می‌شود که همراه با رعایت اصول نمونه‌برداری، استانداردسازی اندازه‌گیری‌ها، کالیبراسیون مناسب دستگاه‌ها و توسعه کتابخانه‌های طیفی معتبر باشد (Piccini et al. 2024). اگرچه Vis-NIR می‌تواند هزینه و زمان پایش خاک را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد، اما قابلیت اعتماد نتایج به کیفیت داده‌های مرجع، کنترل کیفیت اندازه‌گیری‌ها و استاندارد بودن پروتکل‌های طیفی وابسته است. همچنین (Chinilin et al. 2023) در یک فراتحلیل بر پایه بیش از یکصد مطالعه نشان دادند که عملکرد اقتصادی و فنی طیف‌سنجی زمانی به حداکثر می‌رسد که داده‌های آموزشی از کیفیت کافی برخوردار باشند و روش‌های مناسب پیش‌پردازش و مدل‌سازی به کار گرفته شوند؛ در غیر این صورت، کاهش هزینه اولیه می‌تواند با افت دقت پیش‌بینی همراه باشد و نیاز به تکرار اندازه‌گیری‌ها، هزینه نهایی پروژه را افزایش دهد.

از دیدگاه سرمایه‌گذاری نیز، (Vyavahare et al., 2026) بیان کردند که تجهیزات NIR در دو گروه قابل‌حمل و رومیزی عرضه می‌شوند که اگرچه هزینه اولیه خرید آن‌ها نسبتاً زیاد است، اما کاهش هزینه‌های مربوط به مواد مصرفی، زمان انجام آزمون‌ها و نیروی انسانی، بازگشت سرمایه را در بسیاری از کاربردهای آزمایشگاهی امکان‌پذیر می‌کند. با این حال، این مزیت اقتصادی تنها در صورتی پایدار خواهد بود که تجهیزات به‌طور منظم کالیبره شوند، کتابخانه‌های طیفی متناسب با شرایط منطقه توسعه یابند و کنترل کیفیت داده‌ها در تمامی مراحل اندازه‌گیری رعایت شود. بنابراین، بهینه‌سازی هزینه‌ها باید از طریق افزایش بهره‌وری فرآیند اندازه‌گیری و استفاده هوشمندانه از داده‌های معتبر و نه از طریق کاهش تعداد نمونه‌ها یا کاهش کیفیت داده‌های مرجع حاصل شود.

علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های آزمایشگاهی، طیف‌سنجی نقش مهمی در افزایش کارایی نقشه‌برداری رقومی خاک نیز ایفا می‌کند. اطلاعات طیفی در چارچوب مدل (SCORPAN, Soil, Climate, Organisms, Relief, Parent Material, Age, Spatial Position) به‌عنوان عامل S شناخته می‌شوند و می‌توانند به‌عنوان متغیرهای کمکی در پیش‌بینی ویژگی‌ها و تفکیک کلاس‌های خاک مورد استفاده قرار گیرند (McBratney et al., 2003). در نتیجه، ارزش اقتصادی این فناوری تنها به کاهش هزینه هر آزمایش محدود نمی‌شود، بلکه از طریق افزایش سرعت تولید داده، بهبود دقت مدل‌های پیش‌بینی، کاهش نیاز به آزمایش‌های تکراری و ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری در مدیریت منابع خاک نیز نمود پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR) ظرفیت بالایی برای برآورد سریع، غیرمخرب و کم‌هزینه ویژگی‌های خاک دارد و در صورت تلفیق با روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین، می‌تواند به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی نقشه‌برداری رقومی خاک و کشاورزی دقیق مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، مرور پژوهش‌های انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد که کارایی این فناوری در مناطق خشک و نیمه‌خشک یکنواخت نیست و دقت پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف خاک به‌شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی، کانی‌شناسی و روش‌شناسی مطالعات قرار دارد.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مقاله مروری، تفاوت قابل توجه دقت مدل‌های پیش‌بینی در مطالعات مختلف ایران است. برای مثال، در حالی که برخی پژوهش‌ها برای ویژگی‌هایی مانند ماده آلی خاک، هدایت الکتریکی یا بافت خاک ضرایب تبیین بالایی گزارش کرده‌اند، در مطالعات دیگر عملکرد مدل‌ها به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این اختلاف را نمی‌توان تنها به نوع الگوریتم یادگیری ماشین نسبت داد، بلکه مجموعه‌ای از عوامل شامل تفاوت در نوع خاک، میزان کربنات، گچ و سوری، شرایط رطوبتی، اندازه و تنوع مجموعه داده، روش‌های پیش‌پردازش طیفی، کیفیت داده‌های مرجع و انتخاب مدل‌های رگرسیونی در آن نقش دارند. بنابراین، موفقیت یا عدم موفقیت طیف‌سنجی بیش از آنکه به خود فناوری وابسته باشد، به کیفیت طراحی پژوهش و انطباق مدل‌ها با شرایط محلی بستگی دارد.



از سوی دیگر، این مقاله مروزی نشان داد که اگرچه ویژگی‌هایی مانند بافت خاک، هدایت الکتریکی و در برخی مناطق ماده آلی با دقت مناسبی قابل برآورد هستند، اما پیش‌بینی ویژگی‌هایی نظیر pH، برخی کانی‌های رسی و ماده آلی در خاک‌های آهکی، گچی و شور همچنان با عدم قطعیت قابل توجهی همراه است. علت اصلی این موضوع، هم‌پوشانی باندهای جذبی، پیچیدگی ترکیب کانی‌شناسی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک و محدود بودن کتابخانه‌های طیفی بومی است. این یافته نشان می‌دهد که توسعه مدل‌های عمومی برای کل کشور، بدون در نظر گرفتن تفاوت‌های منطقه‌ای، نمی‌تواند به نتایج پایدار و قابل تعمیم منجر شود.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر توسعه کتابخانه‌های طیفی بومی برای خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، استانداردسازی روش‌های نمونه‌برداری و پیش‌پردازش، تلفیق داده‌های طیف‌سنجی با تصاویر ابرطیفی، سنجش از دور و متغیرهای محیطی، توسعه مدل‌های یادگیری عمیق و انتقال‌پذیر (Transfer Learning)، و ارزیابی عملکرد مدل‌ها در مقیاس‌های مکانی مختلف متمرکز شوند. همچنین، ایجاد یک کتابخانه طیفی ملی خاک ایران و تدوین پروتکل‌های استاندارد کالیبراسیون می‌تواند گامی اساسی در افزایش دقت، قابلیت تعمیم و کاربرد عملی این فناوری در کشور باشد.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که آینده کاربرد طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در ایران، نه تنها در توسعه الگوریتم‌های پیچیده‌تر، بلکه در در تلفیق فناوری‌های نوین، تولید داده‌های مرجع باکیفیت، توسعه زیرساخت‌های ملی و بومی‌سازی مدل‌ها متناسب با تنوع خاک‌های کشور نهفته است. تحقق این رویکرد می‌تواند زمینه استفاده گسترده و قابل اعتماد از این فناوری را در مدیریت پایدار منابع خاک، کشاورزی دقیق و نقشه‌برداری رقومی خاک فراهم کند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر هیچگونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

فاطمه خیامیم: گردآوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش استفاده نکرده‌اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ارزشمند سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- اکبری فضلی، رخسار؛ بابائی نژاد، تیمور؛ قنوتی، نوید؛ حسنی، اکبر و عسکری، محمد صادق (۱۴۰۰). ارزیابی روش طیف‌سنجی امواج مرئی-مادون قرمز و روش‌های PLSR و SVM در مدل‌سازی کربن آلی و کل مواد خنثی شوند خاک. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۴): ۱۰۲۳-۱۰۱۱.
- بابائیان، ابراهیم؛ همایی، مهدی و نوروزی، علی اکبر (۱۳۹۳). اشتقاق و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی پارامتریک به‌منظور برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در گستره VIS-NIR-SWIR. حفاظت منابع آب و خاک، ۳(۳): ۳۵-۲۱.
- چترنور، منصور؛ لندی، احمد؛ فرخیان فیروزی، احمد؛ نوروزی، علی اکبر و بهرامی، حسینعلی (۱۳۹۸). استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز

نزدیک در مدلسازی شوری خاک اراضی مستعد تولید ریزگرد استان خوزستان. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۵): ۱۹۵۱-۱۹۶۲.

خیامیم، فاطمه؛ خادمی، حسین؛ استنبرگ، بو و ویتزلیند، یوهانا (۱۳۹۴). قابلیت روش طیف سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در پیش‌بینی چند ویژگی شیمیایی خاک‌های استان اصفهان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۹(۷۲): ۸۱-۹۱.

خیامیم، فاطمه؛ خادمی، حسین؛ ایوبی، شمس اله (۱۳۹۷). توانمندی و محدودیت‌های روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در پیش‌بینی مقدار کانی‌های رسی غالب در خاک‌های سطحی استان اصفهان. علوم آب و خاک، ۳۲(۱): ۱۲۹-۱۴۰.

دانش، مجید؛ بهرامی، حسینعلی و عمادی، سید مصطفی (۱۴۰۲). کارایی فناوری مجاورت‌سنجی به‌منظور برآورد مقادیر سیلت در خاک‌های استان مازندران. مدیریت حوزه آبخیز، ۲۷: ۳۸-۵۱.

دانش، مجید؛ بهرامی، حسینعلی؛ درویش زاده، روشنک و نوروزی، علی اکبر (۱۳۹۵). بررسی مقادیر رس با استفاده از طیف سنجی ابرطیفی آزمایشگاهی (LDRS). سنجش از دور و GIS ایران، ۸(۱): ۷۱-۹۴.

دانش، مجید؛ بهرامی، حسینعلی؛ درویش زاده، روشنک و نوروزی، علی اکبر (۱۴۰۱). تخمین مقادیر شن در خاک‌های استان مازندران با استفاده از فناوری سنجش مجاورتی. اطلاعات جغرافیایی، ۳(۱۲۲): ۶۳-۸۶.

دستورانی، روح اله و بهرامی، حسینعلی (۱۳۹۴). برآورد برخی از ویژگی‌های خاک جزیره هرمز به کمک طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک. اولین کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکانی. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

رحمتی، فاطمه؛ حجتی، سعید؛ رنگزن، کاظم و لندی، احمد (۱۴۰۱). بررسی کارایی روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در تخمین برخی ویژگی‌های خاک منطقه‌ی سمیرم اصفهان. نشریه آب و خاک، ۶۳(۲): ۲۸۶-۶۴۴.

رزقی، زهرا؛ همایی، مهدی و نوروزی، علی اکبر (۱۳۹۸). برآورد کمی اجزای بافت خاک با استفاده از طیف‌سنجی در ناحیه مرئی-مادون قرمز نزدیک. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۴): ۱۰۳۳-۱۰۴۳.

رسولی، نجمه؛ فرپور، محمد هادی؛ خیامیم، فاطمه و رنجبر، حجت الله (۱۳۹۷). پیش‌بینی برخی ویژگی‌های خاک به روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در منطقه بردسیر کرمان. پژوهشهای خاک، ۳۲(۱۳): ۲۳۱-۲۴۳.

سمیعی فرد، رامین و متین فرد، حمیدرضا (۱۳۹۶). ارزیابی طیف سنجی مرئی و مادون قرمز نزدیک در برآورد مقادیر فلزات سنگین سرب و نیکل در خاک (مطالعه موردی: اراضی شهر ری). علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک)، ۲۱(۴): ۲۰۱-۲۱۴.

شمس‌الدینی، علی و اسماعیلی، شهربانو (۱۴۰۱). مدلسازی آلودگی خاک به فلزات سنگین با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و داده‌های طیف‌سنجی. فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۲۶(۴): ۱۳۹-۱۶۰.

طاقدیس، سحر؛ فرپور، محمد هادی؛ فکری، مجید و محمودآبادی، مجید (۱۴۰۰). برآورد برخی خصوصیات خاک با استفاده از تحلیل داده‌های طیفی (Vis-NIR) و انواع روش‌های پیش‌پردازش. تحقیقات آب و خاک ایران، ۱۲(۶): ۱۵۵۷-۱۵۶۹.

عزیزی، کامران، نبی‌اللهی، کمال و داوری، مسعود (۱۳۹۷). ارزیابی قابلیت روش طیف‌سنجی در تخمین برخی از ویژگی‌های خاک‌های مبتلا به نمک. مهندسی زراعی، ۴۱(۳): ۱-۱۶.

فهندز سعیدی، ساغر و نوشادی، مسعود (۱۳۹۸). تحلیل روش طیف سنجی مادون قرمز و روش‌های پیش‌پردازش در پیش‌بینی شوری خاک. آب و خاک، ۳۳(۱): ۱۱۷-۱۳۰.

کریمی، صلاح الدین؛ داوری، مسعود؛ بهرامی، حسینعلی؛ بابائیان، ابراهیم و حسینی، سید محمدطاهر (۱۳۹۶). برآورد برخی ویژگی‌های مبنایی خاک توسط طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک در استان کردستان. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۳): ۵۷۳-۵۸۵.

محمدی منور، حسنا و باقرپور، حسین (۱۳۹۶). کاربرد روش طیف‌سنجی مرئی و فرو سرخ نزدیک در تشخیص آلودگی خاک به کادمیوم و سرب با مدل‌سازی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی. مهندسی بیوسیستم ایران، ۴۸(۱): ۳۷-۴۳.

نوروزی، علی اکبر؛ رزقی، زهرا و همایی، مهدی (۱۳۹۸). تأثیر رطوبت خاک بر دقت روش طیف‌سنجی در برآورد مقدار ماده آلی خاک. حفاظت منابع آب و خاک، ۸(۳): ۱۱۹-۱۳۱.

REFERENCES

- Akbarifazli, R. Babaeinejad, T. Ghanavati, N. Hasani A. & Askari, M. S. (2021). Assessing the Visible-Near-Infrared Spectroscopy Method and PLSR and SVMR Methods in Modeling Organic Carbon and Total Neutralizing Value of Soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4): 1011-1023. (In Persian).
- Araújo, S. R., Wetterlind, J., Demattêa, J. A. M. & Stenberg, B. (2014). Improving the prediction performance of a large tropical vis-NIR spectroscopic soil library from Brazil by clustering into smaller subsets or use of data mining calibration techniques. *European Journal of Soil Science*, 65, 718-729.
- Azizi, K., Nabiollahi, K., & Davari, M. (2018). Evaluation of the capability of spectroscopic methods in estimating some properties of salt-affected soils. *Agricultural engineering*, 41(3):1-16. (In Persian).



- Babaeian, E., Homaei, M., & Norouzi, A. A. (2014). Deriving and validating parametric spectrotransfer functions for estimating soil hydraulic properties in VIS-NIR-SWIR range. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 3(3):21-35. (In Persian).
- Barra, I., Haefele, S. M., Sakrabani, R., & Kebede, F. (2021). Soil spectroscopy with the use of chemometrics, machine learning and pre-processing techniques in soil diagnosis: Recent advances—A review. *Trends in Analytical Chemistry*, 135, 116166.
- Bartmiński, P., Kołodziej, B., Królczyk, J., & Niedźwiecki, J. (2024). Using spectroradiometry to measure soil organic carbon in carbonate-rich soils. *Sensors*, 24(7), 3012.
- Chang, C. W., Laird, D. A., Mausbach, M. J., & Hurburgh, C. R. (2001). Near-infrared reflectance spectroscopy principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 480-490.
- Chaternour, M. Landi, A., Farrokhan Firouzi, A. Noroozi, A.A. & Bahrami, H. A. (2019). Modeling Soil Salinity in Khuzestan Lands Susceptible for Dust Production Using Visible-Near Infrared Spectroscopic Method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(8): 1951-1962. (In Persian).
- Chinilin, A. V., Vindeker, G. V., & Savin, I. Y. (2023). Vis-NIR Spectroscopy for Soil Organic Carbon Assessment: A Meta-Analysis. *Eurasian Soil Science*, 56(11), 1605–1617.
- Clark, R. N. (1999). Spectroscopy of rock and minerals, principles of spectroscopy. PP. 3-58, In: *Manual of Remote Sensing*. A. Rencz (Ed.), John Wiley & Sons, New York.
- Danesh, M., Darvishzadeh, R. & Noroozi, A.A. (2016). Investigation of Clay Contents Using Lab Diffuse Reflectance Spectroscopy (Lab Hyperspectroscopy). *Iranian Journal of Remote sensing & GIS*. 8(1): 71-94. (In Persian).
- Danesh, M., Bahrami, H. & Emadi, S. M. (2023). Applicability of Proximal Sensing Technology in the study of Silt in the soils of Mazandaran Province. *Journal of Watershed Management Research*, 14(27): 38-51. (In Persian).
- Danesh, M., Bahrami, H.A., Darvishzadeh, R. & Noroozi A.A. (2022). Estimating soil sand content in Mazandaran province using proximal sensing technology. *Geographical Data (SEPEHR)*, 31(122): 63-86. (In Persian).
- Dark, N. A. (1995). Reflectance spectra of evaporate minerals (400-2500 nm): application for remote sensing. *Int. Journal of Remote Sensing*, 16, 2555-2571.
- Dasturani, R. & Bahrami, H. A. (2015). Estimation of some soil properties of Hormuz Island using visible-near infrared spectroscopy. *The 1st National Conference on Geospatial Information Technology*, The Khajeh Nasir Toosi University of Technology. (In Persian).
- Dehaan, R. L. & Taylor, G. R. (2002). Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. *Remote Sensing of Environment*, 80, 406-417.
- Dong, Y. W., Yang, S. Q., Xu, C. Y., Li, Y. Z., Bai, W., Fan, Z. N., Wang, Y. N. & Li, Q. Z. (2011). Determination of soil parameters in apple-growing regions by near- and mid-infrared spectroscopy. *Pedosphere*, 21, 591-602.
- Ehsani, M. R., Upadhyaya, S. K., Slaughter, D., Shafii, S. & Pelletier, M. (1999). A NIR technique for rapid determination of soil mineral nitrogen. *Precision Agriculture*, 1, 217-234.
- Fahandeh Saadi, S. & Noshadi, M. (2019). Analysis of Infrared Spectroscopy and Pre-processing Methods in Soil Salinity Prediction. *Journal of Water and Soil*, 33(1): 117-130. (In Persian).
- Francos, N., Heller-Pearlshtien, D., Demattê, J. A. M., Van Wesemael, B., Milewski, R., Chabrilat, S., Tziolas, N., Sanz Diaz, A., Yagüe Ballester, M. J., Gholizadeh, A., & Ben-Dor, E. (2023). A Spectral Transfer Function to Harmonize Existing Soil Spectral Libraries Generated by Different Protocols. *Applied and Environmental Soil Science*, 2023, Article 4155390.
- Fystro, G. (2002). The prediction of C and N content and their potential mineralization in heterogeneous soil samples using Vis-NIR spectroscopy and comparative methods. *Plant and Soil*, 246, 139-149.
- Gozukara, G. Hartemink, A.E. Huang, J. & Demattê, J. A. M. (2025). Prediction accuracy of pXRF, MIR, and Vis-NIR spectra for soil properties-A review. *Soil Science Society of America Journal*; 89:e70028. 1-26.
- Hasheminejad, Y. & Beyrami, H. (2025). Integration of Remote and Proximal Sensing Techniques for Soil Salinity Assessment of Pistachio Orchards. *Dryland Soil Research*, 1, 43-57.
- Hosseini, E. Zarei, M. Moosavi, A. A., Ghasemi-Fasaei, R. Baghernejad, M. & Mozaffari, H. (2024) Feasibility of Vis-NIR spectroscopy approach to predict soil biological attributes in arid land soils. *PLoS ONE*, 19(9), e0311122.
- Karimi, S., Davari, M., Bahrami, H. A. Babaeian, I. & Taher Hoseini. S. M. (2017). Predicting some soil properties using VIS-NIR spectroscopy in the Kurdistan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(3): 573-585. (In Persian).

- Khayamim, F. Khademi, H. & Ayoubi, S. (2017). Capability and Limitations of Clay Minerals Estimation in Surface Soils of the Isfahan Province by Vis-NIR Spectroscopy. *Journal of Soil Research*; 32(1): 129-140. (In Persian).
- Khayamim, F. Khademi, H. Stenberg, B. & Wetterlind, J. (2015). Capability of vis-NIR Spectroscopy to Predict Selected Chemical Soil Properties in Isfahan Province. *Journal of Water and Soil Science*, 19 (72):81-92. (In Persian).
- Khayamim, F. Wetterlind, J. Khademi, H. Robertson, A.H. J. Cano, A. F. & Stenberg, B. (2015). Using visible and near infrared spectroscopy to estimate carbonates and gypsum in soils in arid and subhumid regions of Isfahan, Iran. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 23, 155-165.
- Li, S., Viscarra Rossel, R. A., & Webster, R. (2022). The cost-effectiveness of reflectance spectroscopy for estimating soil organic carbon. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13202.
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2).
- Mehrabi Gohari, E. Matinfar, H. Jafari, A. Taghizadeh-Mehrjerdi, R. & Kayamim, F. (2020). Comparing Different Statistical Models and Pre-processing Techniques for Estimation several chemical properties of the soil Using VNIR/SWIR Spectrum. *Remote sensing & GIS*. 11(4): 47-60
- Mina, M., Rezaei, M., Abadi, L. H. & Sameni, A. (2023). Vis-NIR spectroscopy coupled with machine learning algorithms to predict and identify the key wavelengths of soil gypsum content in Fars province, southern Iran. *Advanced Geomatics*, 3(1), 09-15
- Mohammadi Monavar, H. & Bagherpour, H. (2017). Application of visible and near-infrared spectroscopy for identification of cadmium (Cd) and lead (Pb) pollution in soil using regression models and ANN. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*. 48(1): 37-43. (In Persian).
- Mozaffari, H., Moosavi, A. A. Ostovari, Y., Nematollahi, M. A. & Rezaei, M. (2022). Developing spectrotransfer functions (STFs) to predict basic physical and chemical properties of calcareous soils. *Geoderma*, 428, 116174
- Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B Dor, EB., Brownm D.J., Clairotte, M. & Csorba, A. (2015) Soil spectroscopy: An alternative to wet chemistry for soil monitoring. *Advance Agronomy*, 132:139-159.
- Noroozi, A. A., Rezghi, Z. & Homaei, M. (2019). The effect of soil moisture on the accuracy of the spectroscopy method in estimating the amount of soil organic matter. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(3): 119-132. (In Persian).
- Oberholzer, S., Leifeld, J., Don, A., Meuli, R. G., Gubler, A., & Six, J. (2024). Best performances of visible-near-infrared models in soils with little carbonate – a field study. *Soil*, 10, 231-246.
- Piccini, C., Metzger, K., Debaene, G., Stenberg, B., et al. (2024). In-field soil spectroscopy in Vis-NIR range for fast and reliable soil analysis: A review. *European Journal of Soil Science*, 75(2), e13481.
- Rahmati, F., Hojati, S., Rangzan, K., & Landi, A. (2022). Investigating the Efficiency of Visible-Near Infra-Red (NIR) Spectrometry to Estimate Selected Soil Properties in Semirom Area, Isfahan. *Journal of Water and Soil*, 36(2): 283-300. (In Persian).
- Rasooli, N. Farpoor, M. H. Khayamim, F. & Ranjbar, H. (2018). Prediction of Selected Soil Properties Using Visible and Near Infrared Spectroscopy in Bardsir Area, Kerman Province. *Journal of Soil Research*, 32(2): 231-242. (In Persian).
- Reeves, J.B., McCarty, G.W. & Reeves, V. B. (2001). Mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for the quantitative analysis of agricultural soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 766-772.
- Rezghi, Z., Homaei, M. & Noroozi, A.A. (2019). Quantitative estimation of soil texture components using spectroscopy in the visible-near infrared region. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 11(4): 1033-1043. (In Persian).
- Samieifard, R. & Matinfar, H.R. (2017). Evaluation of visible and near-infrared spectroscopy in estimating the amounts of heavy metals lead and nickel in soil (Case study: Rey city lands). *Journal of Water and Soil Sciences*, 21(4): 201-214. (In Persian).
- Savitzky, A. & Golay, M. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36, 1627-1639.
- Shamsoddini, A., & Esmaeili, S. (2023). Modelling of Soil Heavy Metal Contamination Using Machine Learning Techniques and Spectroscopic Data. *The Journal of Spatial Planning*, 26(4): 139-160.
- Soriano-Disla, J. M., Janik, L. J. Viscarra Rossel, R. A. Macdonald, L. M. & McLaughlin, M. J. (2014). The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical,



- chemical, and biological properties. *Applied Spectroscopy Reviews*, 49, 139-186.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R. A., Mouazen, A. M. & Wetterlind, J. (2010). Visible and near infrared spectroscopy in soil science. PP. 163-215. In: D. L. Sparks (Ed), *Advances in Agronomy*, Academic Press. Burlington.
- Taghdiz, S. Farpoor, M. H. Fekri, M. & Mahmoodabadi, M. (2021). Estimation of Some Soil Properties Using Spectral Data Analysis (Vis-NIR) and Various Pre-Processing Methods. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(6): 1557-1569. (In Persian).
- Tajmoures, A., Farifteh, J., & Omran, E. S. E. (2024). Quantifying soil salinity in calcareous soils through advanced vis-NIR spectroscopy and multivariate modelling. *PLOS One*, 19(2), e0300153.
- Viscarra Rossel, R. A. & Chen, C. (2011). Digitally mapping the information content of visible–near infrared spectra of surficial Australian soils. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1443-1455.
- Viscarra Rossel, R. A., McGlynn, R. N. & McBratney, A. B. (2006). Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137, 70-82.
- Viscarra Rossel, R. A., Shen, Z., Ramirez-Lopez, L., Behrens, T., Shi, Z., Wetterlind, J., Sudduth, K. A., Guerrero, C., Gholizadeh, A., Ben-Dor, E., St. Luce, M., & Orellana, C. (2024). An imperative for soil spectroscopic modelling is to think global but fit local with transfer learning. *Earth-Science Reviews*, 257, 104933.
- Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J. & Skjemstad, J. O. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131, 59-75.
- Vyavahare, G. D., Yun, J.-J., Park, J.-H., Shim, J.-H., Kim, S. H., Kim, K., Roh, A., Kim, S. H., Jang, H. J., Ng, W., & Jeon, S. (2026). Applications and Challenges of Visible-Near-Infrared and Mid-Infrared Spectroscopy in Soil Analysis: Chemometric Approaches and Data Fusion. *Agriculture*, 16(1), 135.
- Xie, X. L., Pan, X. Z. & Sun, B. (2012). Visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for prediction of soil properties near a copper smelter. *Pedosphere*, 22, 351-366.
- Xuemei, L. & Jianshe, L. 2013. Measurement of soil properties using visible and short wave-near infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Measurement*, 46, 3808-3814.
- Yang, H., Kuang, B. & Mouazen, A. M. (2012). Quantitative analysis of soil nitrogen and carbon at a farm scale using visible and near infrared spectroscopy coupled with wavelength reduction. *European Journal of Soil Science*, 63, 410-420.
- Zare, S., Ali Abtahi, A., Fallah Shamsi, S.R., & Lagacherie, P. (2021). Combining laboratory measurements and proximal soil sensing data in digital soil mapping approaches, *Catena*, 207: 105702.
- Zhang, Q. Li, F. & Yang, W. (2024). A deep spectral prediction network to quantitatively determine heavy metal elements in soil by X-ray fluorescence *Available to Purchase. Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 39 (2): 478-490.
- Zhang, Y., Wang, J., & Liu, X. (2020). Enhancing the prediction of soil properties by integrating proximal soil sensing and environmental covariates. *Geoderma*, 273, 114145.
- Zhao, S., Ayoubi, S., Mousavi, S.R., Mireei, S.A., Shahpouri, F., Wu, S.X., Chen, C.B., Zhao, Z.Y., Tian, C.Y. (2024). Integrating proximal soil sensing data and environmental variables to enhance the prediction accuracy for soil salinity and sodicity in a region of Xinjiang Province, China. *Journal of Environmental Management*. 364: 121311.