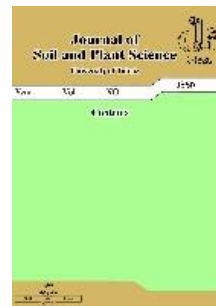




J Soil Plant Sci, 2026, 36(3): 55-74.
<https://doi.org/10.22034/sps.2026.73527.1050>

Journal of Soil and Plant Science

E-ISSN: 3092-6106
<https://sps.tabrizu.ac.ir>



Research Article

Spatial Evaluation of Soil Suitability for Sustainable Soybean Production in Mazandaran Province, Iran

Faezeh Mohammadi-Kashka¹ , Zeinolabedin Tahmasebi Sarvestani² ,
Hemmatollah Pirdashti³ , Ali Cherati Araei⁴ 

1-Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: f.mohammadikashka@modares.ac.ir or faezemohammadi8@gmail.com

2-Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
E-mail: tahmaseb@modares.ac.ir

3-Department of Agronomy, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: h.pirdashti@sanru.ac.ir

4-Soil and Water Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran. E-mail: acherati@yahoo.com

Received: July 13, 2026

Revised: August 28, 2026

Accepted: September 6, 2026

Published: September 6, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

Soil sustainability is key to coping with the pressures of a growing population. Therefore, identifying areas with suitable soil characteristics for crop cultivation can increase productivity, reduce production costs, and prevent environmental degradation. With this aim, a study was conducted to evaluate the soil suitability of agricultural lands in Mazandaran province, Iran for soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivation.

Materials and Methods

In this study, a spatial analysis of the soil suitability of agricultural lands for soybean cultivation in Mazandaran province was conducted using the Analytical Hierarchy Process (AHP) as a criterion-weighting approach, spatial interpolation methods to estimate the spatial distribution patterns of soil variables, and the Geographic Information System (GIS) as a data integration platform. For this purpose, four major soil characteristics, including soil texture, organic matter (OM), electrical conductivity (EC), and soil pH, were first selected as evaluation criteria based on the ecological requirements of soybean. Subsequently, spatial distribution maps of each criterion were generated using radial basis function (RBF) interpolation methods, including completely regularized spline, spline with tension, multiquadric, inverse multiquadric, and thin-plate spline; inverse distance weighting (IDW) with powers of 1, 2, 3, and 4; and ordinary, simple, and universal kriging with circular, spherical, exponential, Gaussian, and stable variogram models. Next, the corresponding values were extracted from each raster layer and compared with the observed values at the sampling locations using the coefficient of determination (r^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and mean bias error (MBE) as validation criteria. Finally, the interpolation method with the lowest estimation error and the highest prediction accuracy was selected as the most appropriate method for preparing each spatial layer. The relative importance of the evaluation criteria was then determined through pairwise comparisons based on expert judgment using the AHP pairwise comparison matrix. Subsequently, the standardized layers of all criteria were integrated and overlaid in the GIS environment using the weighted overlay technique. Finally, the resulting suitability maps were classified into four suitability classes, ranging from highly suitable to unsuitable, and the area of each suitability class was calculated in hectares and as a percentage of the total agricultural area.

Results

The results of the AHP weighting analysis showed that EC and OM had the greatest influence on determining the suitability of agricultural lands for soybean cultivation, with weights of 0.457 and 0.307, respectively. Soil pH and soil texture ranked third and fourth, with weights of 0.148 and 0.088, respectively, while the consistency ratio was 0.01, indicating an acceptable level of consistency in the pairwise comparisons matrix. A comparison of the different interpolation methods revealed that the completely regularized spline model based on the radial basis function (RBF) approach, as well as ordinary kriging with exponential and stable variogram models, provided the lowest estimation errors (lowest RMSE and MAE values) and the highest prediction accuracy for the spatial distribution of soil OM, EC, and pH, respectively. The resulting spatial distribution maps indicated that all agricultural lands in Mazandaran province had EC values below 3.5 dS/m, corresponding to the highly suitable class, suggesting that soil salinity does not currently pose a limitation to optimal soybean growth in the study area. Regarding soil OM, only 1.13% of the agricultural lands (4,968.97 ha) contained between 1% and 2% OM and were therefore classified as relatively suitable, whereas the remaining lands, containing more than 2% OM, were classified as suitable or highly suitable for soybean cultivation. Soil pH ranged from 6.5 to 8.5 across the study area. Approximately 41% of the agricultural lands (178,985.39 ha), with pH values between 6.5 and 7.5, were classified as highly suitable for soybean cultivation, while the remaining 59% (259,541.12 ha) were classified as suitable for soybean cultivation. The final soil suitability map classified the agricultural lands into two suitability classes only, namely suitable (97,413.71 ha) and highly suitable (341,112.80 ha). The spatial distribution of the suitable class was mainly concentrated in the eastern part of Mazandaran province, particularly in the counties of Galugah, Behshahr, and Neka.

Conclusion

The classification of all agricultural lands in the study area into only two suitability classes, namely highly suitable (representing approximately three-quarters of the total area) and suitable, indicates that soil characteristics impose very limited constraints on soybean cultivation in Mazandaran province. Therefore, the likelihood of crop failure due to soil-related factors is expected to be very low, suggesting that the existing soil conditions are generally favorable for sustainable soybean production and expansion throughout the study area.

Keywords: Interpolation, Kriging, Land suitability assessment, Radial basis functions, Weighting.

Author Contributions

F.M-K: Conceptualization, Analysis, Methodology, and Writing-original draft preparation. Z.T-S: Supervision, Project administration. H.P: Conceptualization, Supervision, Project administration, Review & editing. A.C-A: Data curation. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This article is based on research conducted as part of a Ph.D. thesis at Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. The authors gratefully acknowledge the financial support provided by Tarbiat Modares University.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Mohammadi Kashka, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Pirdashti, H., & Cherati Araei, A. (2026). Spatial evaluation of soil suitability for sustainable soybean production in Mazandaran province, Iran. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(3), 55-74.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.73527.1050>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz





نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۶، شماره ۳

صفحه‌های ۵۵ تا ۷۴، مهر ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.73527.1050>

E-ISSN: 3092-6106
<https://sps.tabrizu.ac.ir>



مقاله پژوهشی

ارزیابی مکانی تناسب خاک برای تولید پایدار سویا در استان مازندران، ایران

فائزه محمدی کشکا^۱، زین العابدین طهماسبی سروستانی^۲، همت‌اله پیردشتی^۳، علی چراتی^۴
آرائی^۴

۱- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: f.mohammadikashka@modares.ac.ir

۲- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: tahmaseb@modares.ac.ir

۳- گروه زراعت، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: h.pirdashti@sanru.ac.ir

۴- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران. رایانامه: acherati@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵	تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

چکیده

شناسایی مناطق دارای خاک مناسب برای کشت محصولات زراعی می‌تواند ضمن افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید، از تخریب محیط‌زیست جلوگیری کند. برای این کار، پژوهشی برای ارزیابی تناسب خاک اراضی کشاورزی استان مازندران برای کشت سویا (*Glycine max* (L.) Merr.) با بهره‌گیری از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، درون‌یابی مکانی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. بر اساس نیازهای بوم‌شناختی سویا، چهار ویژگی اصلی خاک شامل بافت، ماده آلی، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و pH به‌عنوان معیارهای ارزیابی انتخاب شدند. اهمیت نسبی این معیارها با بهره‌گیری از AHP تعیین و الگوی توزیع مکانی آن‌ها از طریق روش‌های مختلف درون‌یابی تخمین زده شد. در پایان، لایه‌های استاندارد شده هر یک با به‌کارگیری ابزار هم‌پوشانی وزنی در محیط GIS تلفیق و روی هم‌گذاری شدند. نتایج نشان داد که EC و ماده آلی بیشترین تأثیر (به ترتیب ارزش وزنی ۰/۴۵۷ و ۰/۳۰۷) را در تعیین تناسب خاکی برای کشت سویا داشتند. مدل‌های اسپیلان کاملاً منظم و کریجینگ معمولی بیشترین دقت را در پیش‌بینی ویژگی‌های خاک نشان دادند. توزیع مکانی نقشه‌های حاصل نشان داد که با مقادیر EC کمتر از ۳/۵ dS/m، تنش شوری در شرایط فعلی تهدیدی برای رشد بهینه سویا محسوب نمی‌شود. از نظر مقدار ماده آلی (۲ تا ۶ درصد) و pH (۶/۵ تا ۸/۵) نیز شرایط مساعدی برای رشد سویا فراهم بود. قرارگیری اراضی کشاورزی منطقه در دو طبقه بسیار مستعد (سه‌چهارم اراضی) و مستعد نشان می‌دهد که محدودیت‌های خاکی برای کشت سویا در منطقه ناچیز و خطر شکست محصول بسیار پایین بود.

واژه‌های کلیدی: استعداسنجی اراضی، توابع پایه شعاعی، درون‌یابی، کریجینگ، وزندهی.

استناد به این مقاله: محمدی کشکا، ف.، طهماسبی سروستانی، ز.، پیردشتی، ه. و چراتی آرائی، ع. (۱۴۰۵). ارزیابی مکانی تناسب خاک برای تولید پایدار سویا در استان مازندران، ایران. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۶ (۳)، ۷۴-۵۵.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.73527.1050>

مقدمه

امروزه تأمین امنیت غذایی در مواجهه با رشد جمعیت، محدودیت منابع آبی و تخریب اراضی کشاورزی به یکی از چالش‌های اساسی کشورها تبدیل شده است (FAO, 2022). در این میان، تداوم تخریب خاک همچنان تهدیدی جدی برای امنیت غذایی آینده است (Bindraban *et al.*, 2012)؛ چرا که خاک به‌عنوان بستر اصلی تولید محصول، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت یا شکست کشت دارد. خاک حاوی اجزای معدنی، آلی و میکروارگانیسم‌ها در یک تعادل پویای طبیعی است که اختلال در این تعادل به‌دلیل فشارهای انسانی و استفاده نادرست از زمین منجر به تخریب آن می‌شود (AbdelRahman, 2023). بنابراین بدیهی است که کشت هر محصول در اراضی با تناسب بالا نه تنها عملکرد را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه نهاده‌ها (کود، آب، سم) و خسارت‌های زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها را نیز کاهش می‌دهد (Radočaj *et al.*, 2020). از این رو، ارزیابی دقیق و اصولی تناسب اراضی برای محصولات راهبردی چون سویا که سهم عمده‌ای در سبد غذایی مردم جهان از جمله کشور ایران دارد ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

در ایران نیز طی دهه‌های اخیر فعالیت‌های انسانی به‌تدریج در حال تخریب منابع زمین می‌باشد که این امر لزوم شناسایی و ارزیابی پتانسیل‌ها و محدودیت‌های زمین در مقیاس محلی را برای کشت یک محصول برجسته می‌کند (Tashayo *et al.*, 2020). در این راستا و به‌منظور حمایت از تولید پایدار کشاورزی در ایران، ارزیابی تناسب اراضی به‌عنوان اولین قدم از برنامه آمایش اراضی می‌تواند برای سنجش مناسب بودن کشت یک محصول خاص در منطقه مورد استفاده قرار گیرد و ضمن کاهش نهاده‌های کشاورزی، حفظ منابع طبیعی و کاهش اثرات تغییر اقلیم، در استفاده کارآمد از منابع زمین در سطح منطقه‌ای مؤثر باشد (Gong *et al.*, 2012; Bilas *et al.*, 2022). تجزیه و تحلیل تناسب اراضی^۱ در حقیقت ابزاری مهم برای برنامه‌ریزی خردمندانه کاربری اراضی و بهینه‌سازی استفاده از منابع است که با شناسایی و ارزیابی عوامل محدودکننده تولید کشاورزی، زمینه تصمیم‌گیری آگاهانه و مدیریت پایدار اراضی را فراهم می‌کند (Seif-Ennasr *et al.*, 2020).

ابزارهای تناسب اراضی به‌طور گسترده‌ای برای شناسایی شیوه‌های مدیریتی بهتر در نواحی کشاورزی به‌کار گرفته شده‌اند. در این بین، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۲ ابزاری کاملاً شناخته‌شده، دقیق و با قابلیت انعطاف بالا است که به بررسی داده‌های مکانی در تحلیل تناسب اراضی کمک می‌کند (Roy & Saha, 2018; Ramamurthy *et al.*, 2020). ویژگی‌های خاک تنها در نقاط معدودی مطالعه می‌شوند؛ درحالی‌که تصمیم‌گیری برای کل منطقه نیازمند نقشه‌های پیوسته است. درون‌یابی مکانی (مانند کریجینگ) با برآورد مقادیر ویژگی در مکان‌های فاقد داده بر اساس مقادیر مشاهده‌شده در نقاط نمونه‌برداری مجاور، این خلأ اطلاعاتی را برطرف می‌کند (Morgan *et al.*, 2017; Radočaj *et al.*, 2021). از طرفی، تناسب اراضی برای یک کاربری ویژه یک مسئله چندبعدی است و نیازمند در نظر گرفتن عوامل و معیارهای مختلفی است (Ramamurthy *et al.*, 2020) که می‌توان با روش هم‌پوشانی وزنی آن را مدل‌سازی نمود (Jaiswal *et al.*, 2022). اما مدل‌های درون‌یابی و GIS به‌تنهایی قادر به اولویت‌بندی چند معیار به‌طور هم‌زمان نیستند. اینجاست که نیاز به روشی برای وزن‌دهی معیارها احساس می‌شود. در این زمینه روش‌های مختلفی وجود دارد که فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۳ به‌عنوان یک رویکرد تصمیم‌گیری

1 Land Suitability Analysis (LSA)

2 Geographic Information System (GIS)

3 Weighted Overlay

4Analytic Hierarchy Process (AHP)

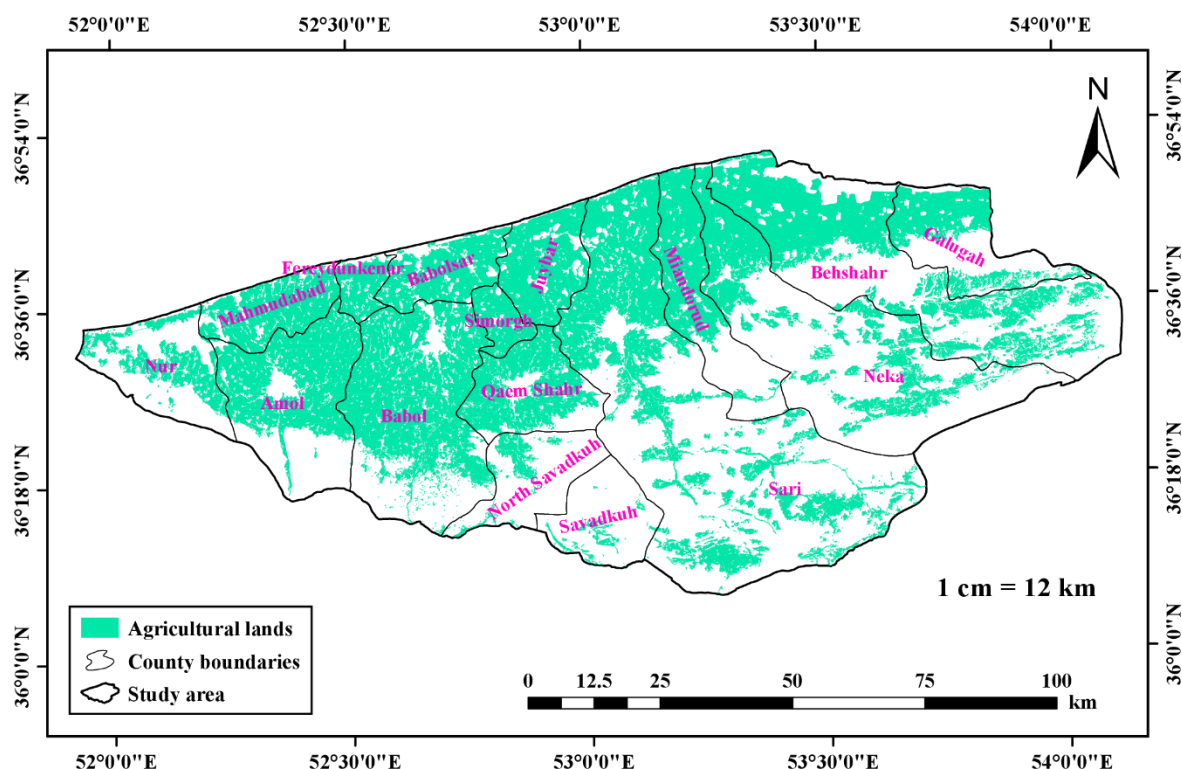
چندمعیاره/شاخصه (MCDM) به طور گسترده برای تصمیم‌گیری مبتنی بر چند معیار با تعیین وزن (اهمیت) عوامل در فرآیند ارزیابی تناسب اراضی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pramanik, 2016; Ramamurthy *et al.*, 2020). ماتریس مقایسه زوجی سنگ‌بنای این روش است که برای رتبه‌بندی و تخمین وزن کلی معیارها یا شاخص‌های فردی استفاده می‌شود (Singha *et al.*, 2020).

در زمینه کاربرد مدل‌های درونیابی، GIS و AHP در پهنه‌بندی تناسب اراضی، پژوهش‌های متعددی انجام شده که برای نمونه می‌توان به ارزیابی تناسب اراضی برای کشت محصولات زراعی چون سویا در اندونزی (Subiyanto *et al.*, 2018)، کرواسی (Radočaj *et al.*, 2020)، چین (Han *et al.*, 2021) و ایران (Kazemi *et al.*, 2021; Kamkar *et al.*, 2014) اشاره کرد. با این اوصاف، با توجه به نقش پراهمیت سویا در تأمین امنیت غذایی خانواده‌های ایرانی و از سویی لزوم توسعه هر چه بیشتر کشت آن با در نظر گرفتن اهداف توسعه پایدار، بر اهمیت و ضرورت توسعه برنامه‌های علمی و تحقیقاتی کافی در این زمینه افزوده است. با وجود پتانسیل بالای استان مازندران برای کشت محصول ارزشمندی چون سویا (Mohammadi-Kashka *et al.*, 2024)، مطالعات پیشین در ایران عمدتاً بر ارزیابی تناسب سویا در مناطق دیگر، مانند استان گلستان، یا بر ارزیابی تناسب سایر محصولات، از جمله کلزا (Abshenas *et al.*, 2024) در مازندران متمرکز بوده‌اند. همچنین، ارزیابی‌ها در مقیاس ملی، اگرچه وضعیت کلی تناسب اراضی کشاورزی ایران را بررسی کرده‌اند، اما فاقد ارزیابی اختصاصی و تفصیلی تناسب مکانی اراضی مازندران برای کشت سویا هستند (Mesgaran *et al.*, 2017). از این رو، نیاز به یک ارزیابی به‌روز و اختصاصی از تناسب مکانی اراضی کشاورزی مازندران برای کشت سویا همچنان وجود دارد. بر این اساس در مطالعه حاضر سعی شد با بهره‌گیری از روش‌های درونیابی مکانی و AHP در محیط GIS به ارزیابی تناسب خاکی اراضی کشاورزی این استان برای کشت سویا پرداخته شود تا کمکی به سازمان‌های ذی‌ربط در جهت تحقق تولید پایدار محصولات کشاورزی از طریق تطابق نیازهای بوم‌شناختی گیاه با ویژگی‌های خاک منطقه باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شامل اراضی کشاورزی ۱۶ شهرستان استان مازندران مشتمل بر نور، آمل، بابل، بابلسر، محمودآباد، فریدونکنار، جویبار، سیمرغ، قائمشهر، سوادکوه، سوادکوه شمالی، ساری، میانرود، نکا، بهشهر و گلوگاه است. به منظور تفکیک زمین‌های زراعی (دیم و آبی) و باغی از سایر کاربری‌ها و تهیه نقشه محدوده کاری از لایه کاربری اراضی اخذ شده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مازندران استفاده شد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه در استان مازندران، ایران.

Figure 1- Geographical location of agricultural lands in the study area, Mazandaran province, Iran.

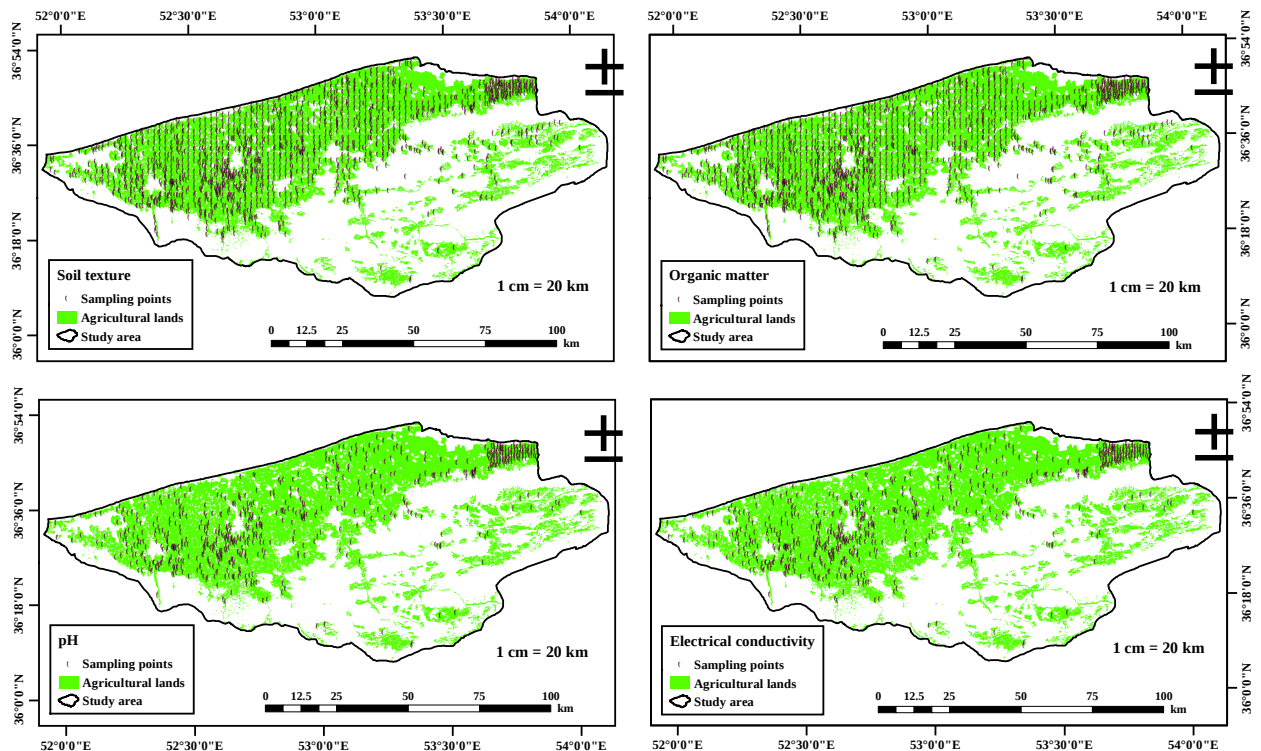
در ادامه چگونگی تهیه لایه‌های اطلاعاتی هر یک از ویژگی‌های خاک تحت بررسی برای تعیین تناسب اراضی کشت سویا در منطقه مورد مطالعه و انطباق نیازمندی‌های محیطی گیاه با خصوصیات اراضی، نحوه وزندهی لایه‌ها، هم‌پوشانی وزنی و تهیه نقشه نهایی استعدادسنجی اراضی کشاورزی به تشریح آمده است:

تهیه لایه‌های اطلاعاتی ویژگی‌های خاکی در تعیین تناسب اراضی

به‌منظور تهیه لایه‌های رستری ویژگی‌های خاک اراضی کشاورزی منطقه، ماده آلی، هدایت الکتریکی (EC)، بافت و pH که در ارزیابی ویژگی‌ها و محدودیت‌های خاک مؤثر بر تناسب اراضی مورد توجه قرار می‌گیرند استفاده شد (FAO, 1993). برای این کار، از نقاط نمونه‌گیری شده توسط بخش خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران استفاده گردید که این داده‌های خام از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر خاک در سطح اراضی کشاورزی منطقه تهیه شده‌اند. وضعیت پراکنش نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه برای هر یک از ویژگی‌های بافت خاک، pH، هدایت الکتریکی و ماده آلی که به‌ترتیب شامل ۱۵۶۰، ۶۵۱، ۶۵۱ و ۱۴۸۱ نقطه می‌باشند در شکل ۲ نشان داده شده است.

خلاصه آماری ویژگی‌های خاک منطقه نیز با استفاده از مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) محاسبه شد. پیش از اجرای مدل‌های درونیابی، نرمال بودن داده‌ها در مجموعه آموزشی (۸۰ درصد داده‌ها) بررسی شد که در این بین ویژگی هدایت الکتریکی از توزیع نرمال برخوردار نبود. ازاین‌رو، پیش از برازش مدل‌های درونیابی، تبدیل لگاریتمی بر روی داده‌های هدایت الکتریکی اعمال شد. پس از انجام تبدیل لگاریتمی، داده‌های آن شرایط نرمال بودن

را برآورده نمودند؛ درحالی که سایر ویژگی های خاک (pH و ماده آلی) با مقادیر اولیه خود در مدل های درونیابی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۲- وضعیت پراکندگی نقاط نمونه برداری خاک در اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه در استان مازندران.
Figure 2- Distribution of soil sampling points in agricultural lands within the study area in Mazandaran province.

پس از بررسی نرمال بودن داده های مربوط به هر کدام از ویژگی های خاکی، کار میان یابی آن ها با به کارگیری روش های درونیابی توابع پایه شعاعی^۱ (اسپیلان کاملاً منظم، اسپیلان کششی،^۲ چندربعی،^۳ چندربعی معکوس^۴ و نواری کم ضخامت)، وزن دهی معکوس فاصله^۵ (مقادیر توان از ۱ تا ۴) و کریجینگ معمولی، ساده و جهانی (مدل های دایره ای «Circular»، کروی «Spherical»، نمایی «Exponential»، گوسی «Gaussian» و ثابت «Stable») در محیط ArcMap و با کمک نوار ابزار تحلیل گر زمین آماری^۶ صورت گرفت. در ادامه نقاط متناظر از روی هر یک از این لایه های رستری استخراج و به واسطه معیارهای اعتبارسنجی ضریب تعیین (r^2)، ریشه میانگین

- 1 Radial Basis Function (RBF)
- 2 Completely Regularized Spline
- 3 Spline With Tension
- 4 Multiquadric
- 5 Inverse Multiquadric
- 6 Thin Plate Spline
- 7 Inverse Distance Weighted (IDW)
- 8 Geostatistical Analyst

مربعات خطا (RMSE)^۱، میانگین خطای مطلق (MAE)^۲ و میانگین خطای اریب (MBE)^۳ با مقادیر واقعی این نقاط مقایسه شدند. در نهایت روشی که دارای خطای کمتر و دقت بیشتری بود به عنوان روشی مناسب و منتخب برای تهیه هر لایه استفاده شد. در معادلات ۱ تا ۳ چگونگی محاسبه هر یک از سنجه‌های آماری به تفکیک آمده است:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (۱)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

در روابط فوق P_i : مقادیر پیش‌بینی‌شده (درون‌یابی‌شده) ویژگی مورد نظر، O_i : مقادیر واقعی (اندازه‌گیری‌شده) همان ویژگی و n : تعداد نقاط یا نمونه می‌باشند.

برای تهیه لایه بافت خاک منطقه مورد مطالعه نیز به علت طبقه‌ای بودن این ویژگی خاکی از روش چندضلعی‌های تیسسن^۴ در محیط ArcMap استفاده شد. در این روش، محدوده مورد مطالعه به پلیگون‌هایی تقسیم می‌شود که هر مکان درون هر پلیگون به نقطه نمونه‌برداری متناظر نزدیک‌تر از سایر نقاط نمونه‌برداری است (Esri, 2021). در نهایت، لایه چندضلعی حاصل به قالب رستری تبدیل شد تا با سایر لایه‌ها برای انجام تحلیل تناسب اراضی سازگار باشد.

طبقه‌بندی لایه‌های اطلاعاتی

برای مکان‌یابی مناطق مستعد کشت گیاه سویا، نیاز به انطباق خصوصیات و نیازهای بوم‌شناختی گیاه مذکور با شرایط محیطی منطقه می‌باشد. برای این کار، نخست نیازهای بوم‌شناختی و زراعی گیاه سویا با استفاده از منابع علمی موجود تهیه و جمع‌بندی شدند (جدول ۱). در گام بعدی، کار طبقه‌بندی و رتبه‌بندی هر یک از لایه‌های اطلاعاتی منابع خاکی (که در محدوده کاربری کشاورزی با استفاده از ابزار Extract by mask برش داده شده‌اند) بر اساس جدول نیازمندی‌های سویا (جدول ۱) در چهار طبقه بسیار مستعد (بسیار مناسب)، مستعد (مناسب)، نسبتاً مستعد (نسبتاً مناسب) و نامناسب (غیرمستعد) صورت گرفت و لایه‌های رستری طبقه‌بندی‌شده (Reclassify) آن‌ها تهیه شدند. پس از طبقه‌بندی این لایه‌ها، مساحت هر طبقه نیز محاسبه شد.

1 Root Mean Square Error (RMSE)

2 Mean Absolute Error (MAE)

3 Mean Bias Error (MBE)

4 Thiessen Polygons

جدول ۱- طبقات تناسب ویژگی‌های خاکی برای کشت سویا (Kazemi *et al.*, 2014).

Table 1- Suitability classes of soil properties for soybean cultivation (Kazemi *et al.*, 2014).

ویژگی‌های خاک (Soil properties)	بسیار مناسب (Highly suitable)	مناسب (Suitable)	نسبتاً مناسب (Moderately suitable)	نامناسب (Unsuitable)
بافت خاک (Soil texture)	Loam, Sandy loam, Clay loam, and Silty loam	Sandy loam, Sandy clay loam, Silty clay loam	Silt, Sand, Silty clay	Other classes
ماده آلی (%) (Organic matter)	>3	2-3	1-2	<1
EC (dS/m)	0-3.5	3.5-6	6-10	>10
pH	6.5-7.5	5.5-6.5, 7.5-8.5	5-5.5	<5

وزن‌دهی به لایه‌ها و استعدادسنجی منطقه برای کشت سویا

با توجه به این واقعیت که هر یک از لایه‌های نام‌برده در تعیین تناسب اراضی کشت سویا دارای اثرات متفاوتی می‌باشند؛ بر این اساس جهت تدقیق بیشتر در تلفیق این لایه‌ها از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای تعیین اهمیت و ارزش نسبی هر ویژگی استفاده شد. برای این کار، نخست ساخت درخت سلسله مراتبی این پژوهش که گام ابتدایی هر فرآیند تحلیل سلسله مراتبی است صورت گرفت. در این سلسله مراتب، سطح اول نمایانگر هدف است که در این پژوهش هدف ارزیابی تناسب خاک اراضی کشاورزی استان مازندران برای کشت سویا است. در سطح دوم معیارهای مسئله قرار می‌گیرند که معیارهای تحت بررسی این مطالعه عبارت بودند از: بافت خاک، ماده آلی، هدایت الکتریکی و pH. سپس برای تعیین وزن معیارهای ذکرشده، پرسشنامه AHP برای این کار طراحی و در اختیار ۲۰ تن از کارشناسان خبره زراعت و متخصصین این حوزه از دانشگاه‌های علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و گرگان، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی و جهاد کشاورزی استان مازندران قرار داده شد. روش پاسخ‌دهی به پرسش‌ها و الگوی امتیازدهی توسط افراد خبره به این صورت بود که هر معیار طبق جدول مقادیر ترجیحات ساعتی بین ۱ تا ۹ رتبه‌بندی شده و رتبه کمتر حداقل اهمیت و رتبه بالاتر مهم‌ترین معیار از دیدگاه فرد خبره در نظر گرفته شد (Han *et al.*, 2021; Sadiq *et al.*, 2023). پس از تکمیل پرسشنامه‌ها، نظرات ارائه‌شده هر یک از متخصصین جمع‌آوری و وارد ماتریس مقایسات زوجی در نرم‌افزار Expert Choice (v 11) شدند و در نهایت وزن نسبی هر ویژگی از طریق نرم‌افزار به روش میانگین هندسی استخراج گردید. لازم به ذکر است که سازگاری در قضاوت‌ها (مقایسه‌های زوجی در هر ماتریس) با ضریبی به نام نرخ سازگاری^۴ سنجیده می‌شود که در نتیجه تقسیم شاخص سازگاری به شاخص سازگاری تصادفی است. مقدار این ضریب باید کمتر مساوی ۰/۱ باشد تا عنوان نمود که سازگاری در قضاوت‌ها مورد قبول است و در غیر این صورت باید تجدیدنظر و اصلاح ماتریس زوجی انجام شود (Mu & Pereyra-Rojas, 2018).

پس از تعیین ضرایب تأثیر (وزن) هر لایه با الگوریتم AHP، لایه‌های رستری طبقه‌بندی‌شده با ابزار Reclassify (با امتیازهای ۱ تا ۴) در محیط ArcMap فراخوانی شدند. سپس با به‌کارگیری ابزار هم‌پوشانی وزنی تلفیق و روی هم‌گذاری لایه‌ها با اختصاص وزن AHP مختص به هر لایه اطلاعاتی صورت گرفت. در پایان، خروجی حاصل در دو طبقه مستعد و بسیار مستعد قرار گرفت و مساحت و درصد هر طبقه محاسبه شد.

⁴ Consistency Ratio

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک منطقه

خلاصه آماری ویژگی‌های خاک مورد استفاده در ارزیابی تناسب خاکی برای سویا در جدول ۲ ارائه شده است. ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه تغییرپذیری متفاوتی را نشان می‌دهند. مقدار pH در محدوده ۵/۸۹ تا ۹/۱۱ قرار دارد و میانگین و میانه آن به ترتیب ۷/۵۸ و ۷/۵۹ است. نزدیکی میانگین و میانه، همراه با چولگی بسیار کم (۰/۰۹-) نشان‌دهنده توزیع تقریباً متقارن pH در منطقه است. دامنه محتوای ماده آلی نیز بین ۰/۰۳ و ۶/۸۹ درصد متغیر بوده و مقادیر میانگین (۳/۰۸٪) و میانه (۲/۹۲٪) آن اختلاف کمی را نشان می‌دهند. در مقابل، هدایت الکتریکی دامنه تغییرات گسترده‌تری دارد (۸/۲۰-۰/۱۴ dS/m) و میانگین آن (۱/۱۸ dS/m) بیشتر از میانه (۰/۹۱ dS/m) است. برای ارزیابی بیشتر تغییرپذیری این ویژگی‌های خاکی از ضریب تغییرات (CV) استفاده شد. بر اساس معیارهای گزارش‌شده توسط Sadiq et al., 2023، مقادیر ضریب تغییرات کمتر از ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۳۵ درصد و بیشتر از ۳۵ درصد به ترتیب نشان‌دهنده تغییرپذیری کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته می‌شوند. بر این اساس، pH با ضریب تغییرات ۵/۰۹ درصد، تغییرپذیری کمی نشان داد و ماده آلی و هدایت الکتریکی به ترتیب با ۴۰/۵۳ و ۸۲/۹۷ درصد، تغییرپذیری زیادی داشتند (جدول ۲). این الگو با یافته‌های Sadiq et al., 2023 نیز مطابقت داشت؛ به‌طوری‌که در مطالعه آنان نیز pH تغییرپذیری کم (۵/۳۶٪) و کربن آلی خاک تغییرپذیری زیادی (۴۱/۰۷٪) نشان داد.

اگرچه محتوای ماده آلی نمونه‌های خاکی تغییرپذیری زیادی داشته، اما نزدیکی نسبی میانگین و میانه و چولگی نسبتاً پایین آن (۰/۵۳)، همراه با بررسی توزیع فراوانی و نمودار Q-Q، نشان داد که انحراف آن از تقارن زیاد نیست. در مقابل، چولگی زیاد هدایت الکتریکی (۳/۸۲) بیانگر عدم تقارن قابل‌توجه توزیع این ویژگی بود و بر همین اساس، تبدیل لگاریتمی این متغیر را پیش از اجرای مدل‌های درونیابی توجیه نمود. همچنین، بیشترین سهم نمونه‌های خاک منطقه مربوط به کلاس‌های بافت لومی رسی (۲۰/۷۱٪)، لوم‌رسی سیلتی (۱۸/۴۰٪)، رسی (۱۷/۶۳٪)، رسی سیلتی (۱۵/۹۶٪) و لومی (۱۲/۵۶٪) است؛ درحالی‌که کلاس‌های بافت سبک مانند شنی (۰/۱۳٪)، شنی لومی (۰/۲۶٪) و لومی شنی (۲/۷۶٪) سهم بسیار محدودی دارند. در مجموع، غلبه این کلاس‌ها بیانگر ظرفیت نسبتاً بالای نگهداری آب و عناصر غذایی در خاک‌های منطقه است؛ هرچند با توجه به سهم بالای کلاس‌های رسی و رسی سیلتی، محدودیت زهکشی و تهویه در برخی اراضی نیز محتمل است.

جدول ۲- آمار توصیفی ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه، استان مازندران.

Table 2- Descriptive statistics of soil properties in the study area, Mazandaran province.

ویژگی‌های خاک (Soil properties)	حداقل (Minimum)	حداکثر (Maximum)	میانگین (Mean)	میانه (Median)	انحراف معیار (Standard deviation)	ضریب تغییرات (Coefficient of variation, %)	چولگی (Skewness)
ماده آلی (%) (Organic matter)	0.03	6.89	3.08	2.92	1.24	40.53	0.53
EC (dS/m)	0.14	8.20	1.18	0.91	0.97	82.97	3.82
pH	5.89	9.11	7.58	7.59	0.38	5.09	-0.09

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

نتایج مندرج در جدول ۳ نشان می‌دهد که از بین ویژگی‌های خاکی مورد مطالعه برای کشت سویا در منطقه، معیار شوری (هدایت الکتریکی) خاک با وزن نسبی ۰/۴۵۷ اهمیت بیشتری برای امکان‌سنجی کشت سویا در زمین‌های کشاورزی استان مازندران داراست. ماده آلی، pH و بافت خاک نیز به ترتیب با ارزش وزنی ۰/۳۰۷، ۰/۱۴۸ و ۰/۰۸۸ در مراتب بعدی اهمیت از نظر کارشناسان می‌باشند. این نتایج با توجه به نرخ ناسازگاری قابل قبول از تحلیل سلسله مراتبی به دست آمده که نشان‌دهنده هماهنگی قضاوت‌های انجام شده در مورد معیارهای تحت بررسی است (جدول ۳). شایان ذکر است که اگرچه در برخی منابع علمی مستند شده که سویا گیاهی نسبتاً متحمل به شوری است و آستانه تحمل به شوری در آن ۵ dS/m است (Rao & Reddy, 2010; Fageria *et al.*, 2011)؛ اما این نکته را نباید از نظر دور داشت که شوری یک عامل محدودکننده مهم برای تولید محصولات زراعی است (Ledesma *et al.*, 2016) و ارقام زراعی مختلف سویا نیز دارای قدرت تحمل به شوری متفاوتی می‌باشند (Phang *et al.*, 2002; Essa, 2002; Phang *et al.*, 2008; Ledesma *et al.*, 2016). به طوری که در برخی منابع علمی دیگر به صراحت عنوان شده که سویا به طور کلی یک محصول حساس به نمک است که در شرایط شور، علائم کلروز برگ و کاهش رشد و زیست توده ناشی از سمیت کلرید در آن ظاهر می‌گردد (Tewari *et al.*, 2016) و به طور قابل توجهی گره‌زایی، کمیت و کیفیت دانه تحت تأثیر قرار گرفته و در نتیجه عملکرد آن کاهش می‌یابد (Phang *et al.*, 2008; Mangena, 2023). این در حالی است که سویا گیاهی با سامانه ریشه‌ای عمیق و پراکنده است که قابلیت تثبیت نیتروژن به صورت همزیستی را دارا بوده و همراه با افزودن مقادیر زیادی زیست توده از طریق ریشه‌ها و ریزش برگ‌ها می‌تواند سبب افزایش محتوای ماده آلی و بهبود ساختار فیزیکی خاک گردد. علاوه بر این، از این طریق، افزایش محتوای کربن آلی و سایر یون‌ها، ظرفیت تبادل کاتیونی و هدایت الکتریکی (EC) خاک نیز احتمالاً تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Singh & Shivakumar, 2010).

جدول ۳- ارزش وزنی (ضرایب) و اهمیت ویژگی‌های خاکی تأثیرگذار بر کشت سویا در استان مازندران.
Table 3- Weighted values (coefficients) and the importance of soil properties affecting soybean cultivation in Mazandaran province.

معیارها (Criteria)	ضرایب (Coefficients)	اهمیت (Importance)
۱. بافت خاک (Soil texture)	0.088	(4)
۲. قابلیت هدایت الکتریکی خاک (Soil EC)	0.457	(1)
۳. pH خاک (Soil pH)	0.148	(3)
۴. ماده آلی خاک (Soil organic matter)	0.307	(2)
ضریب ناسازگاری (Inconsistency ratio, IR)	0.01	

انتخاب مدل درونیابی مناسب برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی

قابلیت هدایت الکتریکی (EC)

در بررسی روش‌های مختلف درونیابی برای تخمین هدایت الکتریکی خاک اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه مشخص شد که روش کریجینگ معمولی بهتر از سایر روش‌ها عمل کرده و در میان مدل‌های مختلف آن، مدل نمایی با کمترین میزان خطا و بیشترین صحت مناسب‌ترین روش برای میان‌یابی بود (جدول ۴). به طور مشابه، نتایج مطالعه‌ای در استرالیای غربی نشان داد که روش کریجینگ معمولی در مقایسه با روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله

و اسپیلان‌ها برای درون‌یابی هدایت الکتریکی خاک از عملکرد بهتری برخوردار است (Robinson & Metternicht, 2006). در ایران نیز، Nourzadeh Haddad, 2013 در مطالعه‌ای دقت روش‌های مختلف درون‌یابی را در تولید نقشه هدایت الکتریکی خاک دشت قم مورد ارزیابی قرار داد که نتایج نشان از عملکرد خوب کریجینگ معمولی نسبت به دو روش وزن‌دهی معکوس فاصله و اسپیلان بود.

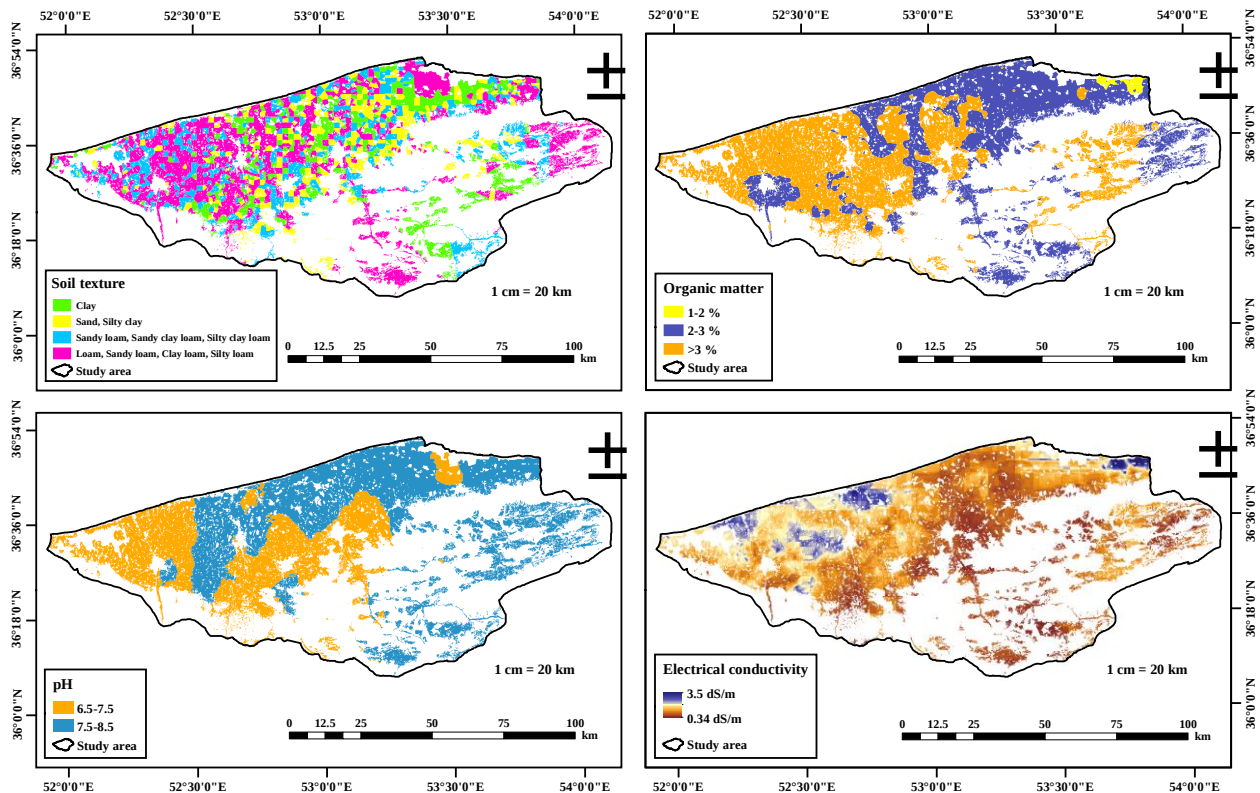
به خوبی شناخته شده که شوری خاک معمولاً در مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل میزان تبخیر بالا رخ می‌دهد. خاک‌های شور به طرق مختلف بر رشد گیاه تأثیر منفی می‌گذارند. علاوه بر سمیت‌های یونی خاص مانند سدیم (Na)، کلر (Cl) و بور (B) باعث آسیب مستقیم به گیاهان می‌شوند (Mustafa *et al.*, 2011). به این ترتیب شوری خاک را می‌توان یکی از موانع مهم تولید محصولات کشاورزی دانست که باید به عنوان معیاری مهم و اساسی برای نشان دادن زمین‌های کشاورزی مناسب در ارزیابی‌ها مورد توجه قرار گیرد. شکل ۳ روند تغییرات هدایت الکتریکی در اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نقشه میان‌یابی شده آن پیداست؛ تمامی اراضی در محدوده مورد مطالعه شوری کمتر از ۳/۵ dS/m داشته که نشان می‌دهد در شرایط کنونی تنش شوری رشد بهینه سویا را تهدید نمی‌کند و از این نظر تناسب بسیار مستعدی برای توسعه کشت آن فراهم است. در مطالعه Ahmad *et al.*, 2023 برای تعیین مناطق مستعد کشت سویا در جرانواله فیصل آباد پاکستان نیز گزارش شد که کیفیت خاک این منطقه به لحاظ شوری در محدوده قابل قبولی قرار دارد و تقریباً ۷۶/۶۵ درصد از اراضی با شوری کمتر از ۲ dS/m دارای شرایط بسیار مستعدی برای تولید سویا هستند. با این حال، اگرچه نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی در اراضی کشاورزی منطقه در محدوده مناسب برای کشت سویا قرار دارد، اما وزن نسبتاً بالای این ویژگی در فرآیند AHP نشان‌دهنده اهمیت آن در تعیین تناسب خاکی محدوده مورد مطالعه است. این یافته بیانگر آن است که شوری، حتی در شرایط فعلی که محدودیت قابل توجهی ایجاد نمی‌کند، می‌تواند در ارزیابی تناسب سویا عاملی تعیین‌کننده باشد. از این رو، پایش مستمر و مدیریت به موقع تغییرات آن، به ویژه در مناطق دارای استعداد تجمع نمک، برای حفظ تناسب اراضی و پایداری کشت سویا ضروری است.

جدول ۴- نتایج ارزیابی روش‌های درون‌یابی در تخمین ویژگی‌های خاک محدوده مورد مطالعه در استان مازندران.

Table 4- Evaluation results of interpolation methods for estimating soil properties in the study area in Mazandaran province.

MAE	RMSE	MBE	r ²	b	a	معادله رگرسیونی	روش (مدل)	ویژگی‌های خاک
						Regression) (equation	(Method, model)	(Soil properties)
0.806	1.008	0.125	0.293	0.2703	2.3120	$y = 0.2703x + 2.3120$	RBF*, Completely Regularized Spline	ماده آلی (%) (Organic matter)
0.320	0.402	0.039	0.276	0.3312	0.6663	$y = 0.3312x + 0.6663$	Ordinary Kriging, Exponential	EC (dS/m)
0.174	0.250	0.002	0.311	0.4207	4.3640	$y = 0.4207x + 4.3640$	Ordinary Kriging, Stable	pH

*Radial Basis Function



شکل ۳- نقشه ویژگی‌های خاک اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه در استان مازندران.

Figure 3- Map of soil properties for agricultural lands in the study area, Mazandaran province.

ماده آلی

با توجه به جدول ۴، مدل اسپیلان کاملاً منظم از روش توابع پایه شعاعی (RBF) با داشتن کمترین خطای برآورد ($MAE=0.086$ و $RMSE=0.08$) به عنوان بهترین مدل برای میان‌یابی محتوای ماده آلی خاک در سطح اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه انتخاب شد. در همین راستا، Sarmadian *et al.*, 2014، Bhunia *et al.*, 2016 و Singh & Sarma, 2023 نیز برای بررسی الگوی فضایی کربن آلی خاک از روش تابع پایه شعاعی (RBF) استفاده نمودند که نتایج این مطالعات حاکی از عملکرد رضایت‌بخش این روش در میان‌یابی بود.

ماده آلی خاک از ترکیبات آلی حاوی کربن (C)، هیدروژن (H)، اکسیژن (O)، نیتروژن (N)، گوگرد (S) و فسفر (P) تشکیل شده که در رابطه با حاصلخیزی خاک، سامانه‌های کشاورزی پایدار و بهره‌وری محصولات مهم است (Johnston *et al.*, 2009). نقشه محتوای ماده آلی خاک در اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که تقریباً تمامی اراضی از نظر محتوای ماده آلی در طبقات مستعد (با ۲-۳ درصد ماده آلی) و بسیار مستعدی (با ۳-۶ درصد ماده آلی) برای رشد و توسعه سویا قرار دارند و تنها بخش کوچکی از اراضی که دارای ۱ تا ۲ درصد ماده آلی و ۱/۱۳ درصد (۴۹۶۸/۹۷ هکتار) از وسعت اراضی را به خود اختصاص داده‌اند برای کشت سویا نسبتاً مستعد می‌باشند (شکل ۳). این الگو نشان می‌دهد که ماده آلی در بخش عمده اراضی محدودیت قابل‌توجهی برای کشت سویا ایجاد نمی‌کند و وضعیت مطلوب آن می‌تواند با بهبود نگهداری و فراهمی آب و افزایش دسترسی به عناصر غذایی، شرایط مناسب‌تری را برای رشد و عملکرد محصول فراهم کند (Lal, 2020). در مقابل،

در اراضی دارای ماده آلی کمتر، تقویت مدیریت ماده آلی خاک می‌تواند به حفظ کیفیت خاک و پایداری تولید سویا کمک کند.

pH خاک

نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درونیابی نشان داد که روش کریجینگ بهترین الگو را برای تخمین pH خاک اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه ارائه می‌دهد که با در نظر گرفتن آماره‌های خطاسنجی مندرج در جدول ۴ از کریجینگ معمولی با مدل ثابت به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای انجام میان‌یابی استفاده شد. مشابه این نتایج، Robinson & Metternicht, 2006 در استرالیای غربی، Mehdi *et al.*, 2013 در پنجاب پاکستان و Emadi & Baghernejad, 2014 در شمال ایران نیز به برتری روش کریجینگ معمولی در درونیابی pH خاک اشاره کردند. شکل ۳ توزیع فضایی میزان pH در سراسر اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج، میزان pH این اراضی در محدوده ۶/۵ تا ۸/۵ در نوسان است که در این بین ۴۱ درصد از اراضی (۱۷۸۹۸۵/۳۹ هکتار) با pH ۵/۵-۶/۷ برای رشد سویا بسیار مستعد بوده و ۵۹ درصد (۲۵۹۵۴۱/۱۲ هکتار) دیگر از این اراضی با pH ۵/۵-۷/۸ از تناسب مناسبی (مستعد) برای کشت سویا برخوردارند. در مطالعه Han *et al.*, 2021 در استان جیلین چین نیز ۸۱/۸۲ درصد از کل زمین‌های زیرکشت سویا از نظر pH در محدوده مناسب قرار داشتند؛ درحالی‌که Munene *et al.*, 2017 گزارش کردند که تنها ۰/۶۲ درصد از ناحیه کابووی در زامبیای مرکزی دارای خاک‌های کمی اسیدی مناسب برای رشد سویا می‌باشند. pH یکی از ویژگی‌های مهم خاک در ارزیابی تناسب اراضی است؛ زیرا بر مجموعه‌ای از فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و به‌ویژه فراهمی عناصر غذایی، رشد و عملکرد محصول اثر می‌گذارد (Sadiq *et al.*, 2023). ازاین‌رو، انحراف pH از محدوده مطلوب می‌تواند با کاهش فراهمی برخی عناصر غذایی یا افزایش خطر سمیت برخی عناصر، شرایط رشد گیاه و بهره‌وری کلی را محدود کند. با توجه به قرارگیری تمام اراضی محدوده مورد مطالعه در دو طبقه مستعد و بسیار مستعد، pH خاک در شرایط فعلی محدودیت قابل‌توجهی برای کشت سویا در منطقه ایجاد نمی‌کند؛ بااین‌حال، پایش تغییرات آن برای حفظ کیفیت خاک و تداوم تناسب اراضی ضروری است.

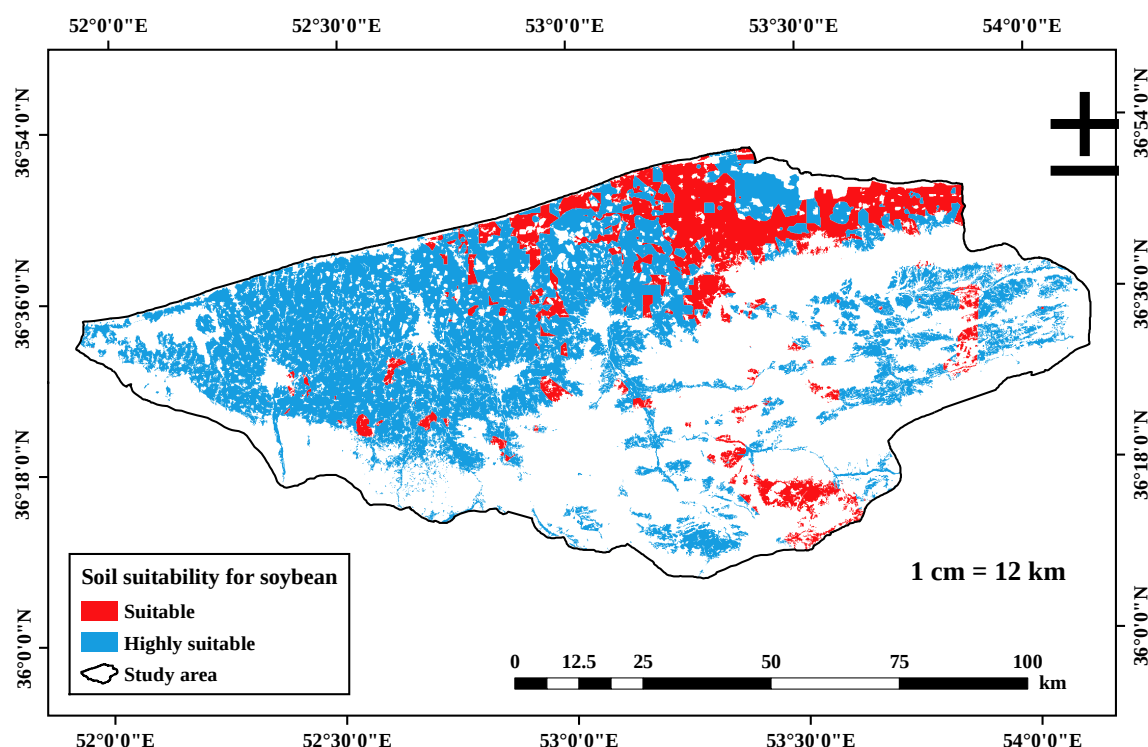
بافت خاک

بافت یکی از پارامترهای مهم خاک است که نقش مهمی در الگوی کشت منطقه دارد. دلیل اصلی این مهم آن است که محصولات مختلف نیازهای رشدی متفاوتی دارند و بیشتر ویژگی‌های فیزیکی خاک به کلاس بافت بستگی دارد (Mustafa *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2021). در شکل ۳ تنوع فضایی طبقات بافت خاک اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه آورده شده که شامل ده کلاس لوم، لومی‌شنی، لومی‌رسی، لومی‌سیلتی، شنی‌لومی، لوم‌رسی‌شنی، لوم‌رسی‌سیلتی، شنی، رسی‌سیلتی و رسی می‌باشند. بررسی این شکل نشان می‌دهد که طبقه غالب بافت خاک در محدوده مورد مطالعه خاک‌های لوم، لومی‌شنی، لومی‌رسی و لومی‌سیلتی هستند که ۴۱/۹۴ درصد (۱۸۳۹۱۶/۶۱ هکتار) از کل اراضی کشاورزی را در بر گرفته و شرایط بسیار مستعدی را برای کشت سویا فراهم می‌کنند. در مقابل، خاک‌های با بافت رسی قرار دارند که به‌تنهایی ۸۳۵۴۲/۶۴ هکتار (۱۹/۰۵ درصد) از زمین‌های کشاورزی

محدوده مورد مطالعه را پوشش داده و از کیفیت نامناسبی برای تولید سویا برخوردارند. طبقات بزرگ بعدی که دارای تناسب‌های مستعد (خاک‌هایی با بافت شنی‌لومی، لوم‌رسی‌شنی و لوم‌رسی‌سیلتی) و نسبتاً مستعدی (خاک‌هایی با بافت شنی و رسی‌سیلتی) برای رشد و تکامل سویا هستند به ترتیب ۲۲/۷۵ و ۱۶/۲۶ درصد از وسعت اراضی کشاورزی را به خود اختصاص داده‌اند.

ارزیابی مکانی تناسب خاک برای کشت سویا

نقشه تناسب خاک محدوده مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده که از هم‌پوشانی وزنی لایه‌های ماده آلی، هدایت الکتریکی (EC)، بافت و pH خاک به دست آمده است. نقشه حاصل نشان می‌دهد که اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه در دو طبقه مستعد (۹۷۴۱۳/۷۱ هکتار) و بسیار مستعد (۳۴۱۱۱۲/۸۰ هکتار) برای کشت سویا قرار دارند و طبقه بسیار مستعد حدود سه‌چهارم اراضی را شامل می‌شود. غلبه این طبقه نشان‌دهنده آن است که در بخش عمده اراضی، ترکیب ویژگی‌های منتخب خاکی شرایط مطلوبی را برای رشد و توسعه سویا فراهم می‌کند و این چهار ویژگی در وضعیت فعلی محدودیت قابل‌توجهی برای کشت آن ایجاد نمی‌کنند. با این حال، سهم بالای طبقه بسیار مستعد به معنی نبود مطلق محدودیت‌های خاکی نیست؛ بلکه بیانگر مناسب بودن اراضی بر اساس ویژگی‌های منتخب این مطالعه است. از این رو، تفسیر نتایج باید با توجه به دامنه ویژگی‌های خاکی وارد شده به مدل انجام شود. افزون بر این، یکی از مزایای به‌کارگیری تلفیق وزنی در محیط GIS، امکان ترکیب هم‌زمان ویژگی‌های خاکی مختلف و لحاظ تفاوت اهمیت نسبی آن‌ها در تعیین تناسب است. در نتیجه، اثر هر معیار صرفاً به صورت مستقل ارزیابی نمی‌شود و نقشه نهایی تصویری یکپارچه از تناسب خاکی منطقه خواهد بود. با این حال، این رویکرد به کیفیت لایه‌های ورودی و نحوه تعیین وزن معیارها وابسته است. در مطالعه حاضر، وزن‌دهی انجام شده با روش AHP متکی بر قضاوت کارشناسی است و بنابراین می‌تواند با درجه‌ای از عدم قطعیت همراه باشد.



شکل ۴- نقشه تناسب کشت سویا بر اساس ویژگی‌های خاکی در اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه، استان مازندران.

Figure 4- Map of soybean cultivation suitability based on soil properties in agricultural lands within the study area, Mazandaran province.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش بیانگر وجود تنوع مکانی در میزان تناسب خاکی مناطق مختلف بود که اهمیت ارزیابی مکانی اراضی در برنامه‌ریزی پایدار کشاورزی را آشکار می‌سازد. در بررسی روش‌های مختلف درون‌یابی برای تخمین ویژگی‌های هدایت الکتریکی و pH، روش کریجینگ معمولی بهتر از سایر روش‌ها عمل کرده و نقشه‌های حاصل، جزئیات مکانی دقیق‌تری را در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه دادند. مدل اسپیلان کاملاً منظم از روش توابع پایه شعاعی (RBF) با داشتن کمترین خطای برآورد ($MAE=0/806$ و $RMSE=1/008$) بهترین مدل برای میان‌یابی محتوای ماده آلی بود. از توزیع مکانی نقشه‌های حاصل مشخص شد که اراضی محدوده مورد مطالعه با شوری کمتر از $3/5$ dS/m از تناسب بسیار مستعدی برای توسعه کشت سویا برخوردارند. میزان pH این اراضی نیز در محدوده $6/5$ تا $8/5$ در نوسان است و از این نظر محدودیت قابل‌توجهی رشد سویا را تهدید نمی‌کند. از نظر محتوای ماده آلی، تقریباً تمامی اراضی در تناسب‌های مستعد (با ۲-۳ درصد ماده آلی) و بسیار مستعد (با ۳-۶ درصد ماده آلی) قرار دارند و تنها بخش کوچکی از اراضی ($1/13$ درصد، $4968/97$ هکتار) با کمتر از ۲ درصد ماده آلی نسبتاً مستعد می‌باشند.

نقشه نهایی تناسب خاکی توانست مناطق مختلف را در طبقات مستعد و بسیار مستعد طبقه‌بندی کرده و چارچوبی مکانی برای شناسایی مناطق اولویت‌دار کشت سویا فراهم کند. به‌گونه‌ای که پهنه بسیار مستعد

(۳۴۱۱۱۲/۸۰ هکتار) عمدتاً در بخش‌های مرکزی، پایین‌دست و غرب منطقه متمرکز شده‌اند و پهنه مستعد (۹۷۴۱۳/۷۱ هکتار) بخش‌های شرقی یعنی شهرستان‌های گلوگاه، بهشهر و نکا را شامل می‌شوند. این یافته‌ها ضمن تأکید بر پتانسیل بالای بخش‌های بسیار مستعد برای توسعه پایدار کشت سویا، ضرورت اعمال مدیریت‌های ویژه در اراضی با تناسب مستعد را نیز آشکار می‌کند. با استناد به یافته‌های این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که ارزیابی تناسب اراضی ابزاری کارآمد برای شناسایی مناطق مناسب کشت سویا است و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی کشت و مدیریت بهینه اراضی مورد استفاده قرار گیرد. در پایان، انجام مطالعات تکمیلی با استفاده از روش‌های درونیابی غیرخطی (مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN)) برای بهبود دقت پیش‌بینی در شرایط توپوگرافی پیچیده (Philippopoulos & Deligiorgi, 2012; Morgan *et al.*, 2017; Taghipour *et al.*, 2025) و نیز تلفیق رویکرد AHP با منطق فازی (Fuzzy AHP) برای لحاظ کردن عدم قطعیت در قضاوت‌های خبرگان (Wang *et al.*, 2008) پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

به‌این‌وسیله از حمایت‌های مالی دانشگاه تربیت مدرس تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

منابع مورد استفاده

References

- AbdelRahman, M.A. (2023). An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 34, 767-808. <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3>
- Abshenas, M., Kamkar, B., Soltani, A., & Kazemi, H. (2024). Predicting the effect of climate change on the suitability of canola (*Brassica napus* L.) cultivation land using SDSM and Lars-WG models in Mazandaran province. *Journal of Agroecology*, 15(4), 843-862. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/agry.2022.76858.1112>
- Ahmad, N., Younas, F., Ahmad, H.R., Sarfraz, M., Ayub, M.A., Maqsood, M.A., Rasul, F., Sardar, M.F., Mehmood, T., Ajarem, J.S., Maoda, S.N., Li, X., & Cui, Z. (2023). Soybean (*Glycine max*) cropland suitability analysis in subtropical desert climate through GIS-based multicriteria analysis and Sentinel-2 multispectral imaging. *Land*, 12(11), 2034. <https://doi.org/10.3390/land12112034>
- Bhunia, G.S., Shit, P.K., & Maiti, R. (2016). Spatial variability of soil organic carbon under different land use using radial basis function (RBF). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(17), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0070-x>
- Bilas, G., Karapetsas, N., Gobin, A., Mesdanitis, K., Toth, G., Hermann, T., Wang, Y., Luo, L., Koutsos, T.M., Moshou, D., & Alexandridis, T.K. (2022). Land suitability analysis as a tool for evaluating soil-improving cropping systems. *Land*, 11(12), 2200. <https://doi.org/10.3390/land11122200>
- Bindraban, P.S., van der Velde, M., Ye, L., Van den Berg, M., Materechera, S., Kiba, D.I., Tamene, L., Ragnarsdóttir, K.V., Jongschaap, R., Hoogmoed, M., & Hoogmoed, W.

- (2012). Assessing the impact of soil degradation on food production. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 478-488.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.015>
- Emadi, M., & Baghernejad, M. (2014). Comparison of spatial interpolation techniques for mapping soil pH and salinity in agricultural coastal areas, northern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(9), 1315-1327.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2014.880837>
- Esri. (2021). *Create Thiessen Polygons (Analysis)*. ArcGIS 10.8 Documentation. Esri.
- Essa, T.A. (2002). Effect of salinity stress on growth and nutrient composition of three soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 188(2), 86-93. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2002.00537.x>
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., & Jones, C.A. (2011). *Growth and mineral nutrition of field crops*. Third Edition, CRC Press.
- FAO. (1993). Guidelines for land-use planning. FAO Development Series No. 1. Rome: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 96 Pp.
<https://www.fao.org/4/T0715E/t0715e06.htm>
- FAO. (2022). State of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW21): Executive summary (COAG/2022/14). FAO.
- Gong, J., Liu, Y., & Chen, W. (2012). Land suitability evaluation for development using a matter-element model: a case study in Zengcheng, Guangzhou, China. *Land Use Policy*, 29(2), 464-472. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.09.005>
- Han, C., Chen, S., Yu, Y., Xu, Z., Zhu, B., Xu, X., & Wang, Z. (2021). Evaluation of agricultural land suitability based on RS, AHP, and MEA: a case study in Jilin Province, China. *Agriculture*, 11(4), 370. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040370>
- Jaiswal, R.K., Yadav, S. & Yadava, R.N. (2022). Management of environmentally stressed areas in watershed using multi-criteria decision tool in GIS: a noble technique to conserve soil for agriculture. Pp. 279-299. In: Singh V.P., Yadav S., Yadav K.K., Corzo Perez G.A., Muñoz-Arriola F., & Yadava R.N. (eds.). *Application of Remote Sensing and GIS in Natural Resources and Built Infrastructure Management: Water Science and Technology Library*. Springer, Cham.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., & Coleman, K. (2009). Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in Agronomy*, 101, 1-57.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00801-8)
- Kamkar, B., Alizadeh Dehkordi, P., Aalae Bazkiaee, P., & Abdi, O. (2021). Determination of the compliance of soybean lands with land suitability maps (case study: Golestan province). *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 44(1), 121-139. (In Persian with English Abstract)
<https://doi.org/10.22055/agen.2021.37398.1604>
- Kazemi, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kamkar, B., Shataei, SH., & Sadeghi, S. (2014). Agro-Ecological zoning of Golestan Province lands for soybean cultivation using geographical information system (GIS). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 23(4), 21-40. (In Persian with English Abstract)
- Lal, R. (2020). Soil organic matter content and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 27A-32A. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.27A>
- Ledesma, F., Lopez, C., Ortiz, D., Chen, P., Korth, K.L., Ishibashi, T., Zeng, A., Orazaly, M., & Florez-Palacios, L. (2016). A simple greenhouse method for screening salt tolerance in soybean. *Crop Science*, 56(2), 585-594.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2015.07.0429>

- Mangena, P. (2023). *Plant transformation via agrobacterium tumefaciens: culture conditions, recalcitrance and advances in soybean*. CRC Press.
- Mehdi, S.M., Mian, S.M., Ghani, S., Khalid, M., Sheikh, A.A., Rasheed, S., & Iqbal, M.A.J. (2013). Modelling of surface soil pH using geostatistical methods in Punjab province, Pakistan. *International Journal of Scientific Engineering and Research*, 4(11), 359-377.
- Mesgaran, M.B., Madani, K., Hashemi, H., & Azadi, P. (2017). Iran's land suitability for agriculture. *Scientific Reports*, 7, 7670. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08066-y>
- Mohammadi-Kashka, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Pirdashti, H., Hosseinzadeh Bandbafha, H. (2024). Assessing the life cycle cost (LCC) and energy of soybean agroecosystems in Mazandaran province. *Crop Production Journal*, 16(4), 169-198. (In Persian with English Abstract) <https://doi.org/10.22069/ejcp.2024.21649.2598>
- Morgan, R.S., Abd El-Hady, M., Rahim, I.S., Silva, J., & Ribeiro, S. (2017). Evaluation of various interpolation techniques for estimation of selected soil properties. *GEOMATE Journal*, 13(38), 23-30. <http://dx.doi.org/10.21660/2017.38.606721>
- Mu, E., & Pereyra-Rojas, M. (2018). *Understanding the Analytic Hierarchy Process*. In: *Practical Decision Making using Super Decisions v3*. SpringerBriefs in Operations Research. Springer, Cham. Pp. 7-22.
- Munene, P., Chabala, L.M., & Mweetwa, A.M. (2017). Land suitability assessment for soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) production in Kabwe District, Central Zambia. *Journal of Agricultural Science*, 9(3), 74-89. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v9n3p74>
- Mustafa, A.A., Singh, M., Sahoo, R.N., Ahmed, N., Khanna, M., Sarangi, A., & Mishra, A.K. (2011). Land suitability analysis for different crops: a multi criteria decision making approach using remote sensing and GIS. *Researcher*, 3(12), 61-84.
- Nourzadeh Haddad, M. (2013). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping electrical conductivity and acidity of soils: a case study of Qom Plain, Iran. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(11), 2827-2832.
- Phang, T.H., Shao, G., & Lam, H.M. (2008). Salt tolerance in soybean. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(10), 1196-1212. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00760.x>
- Philippopoulos, K., & Deligiorgi, D. (2012). Application of artificial neural networks for the spatial estimation of wind speed in a coastal region with complex topography. *Renewable Energy*, 38(1), 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.007>
- Pramanik, M.K. (2016). Site suitability analysis for agricultural land use of Darjeeling district using AHP and GIS techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(56), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0116-8>
- Radočaj, D., Jurišić, M., & Antonić, O. (2021). Determination of soil C: N suitability zones for organic farming using an unsupervised classification in eastern Croatia. *Ecological Indicators*, 123, 107382. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107382>
- Radočaj, D., Jurišić, M., Gašparović, M. & Plaščak, I. (2020). Optimal soybean (*Glycine max* L.) land suitability using gis-based multicriteria analysis and sentinel-2 multitemporal images. *Remote Sensing*, 12(9), 1463. <https://doi.org/10.3390/rs12091463>
- Ramamurthy, V., Obi Reddy, G.P., & Kumar, N. (2020). Assessment of land suitability for maize (*Zea mays* L.) in semi-arid ecosystem of southern India using integrated AHP and GIS approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105806. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105806>
- Rao, A.S., & Reddy, K.S. (2010). Nutrient management in soybean. Pp. 161–190. In: Singh G. (eds.). *The Soybean: Botany, Production and Uses*. CAB International.

- Robinson, T.P., & Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(2), 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.07.003>
- Roy, J., & Saha, S. (2018). Assessment of land suitability for the paddy cultivation using analytical hierarchical process (AHP): a study on Hinglo river basin, Eastern India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 601-618. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0467-4>
- Sadiq, F.K., Ya'u, S.L., Aliyu, J., & Maniyunda, L.M. (2023). Evaluation of land suitability for soybean production using GIS-based multi-criteria approach in Kudan Local Government area of Kaduna State Nigeria. *Environmental and Sustainability Indicators*, 20, 100297. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100297>
- Sarmadian, F., Keshavarzi, A., Odagiu, A., Zahedi, G., & Javadikia, H. (2014). Mapping of spatial variability of soil organic carbon based on radial basis functions method. *Proenvironment Promediu*, 7, 3-9.
- Seif-Ennasr, M., Bouchaou, L., El Morjani, Z.E.A., Hirich, A., Beraaouz, E.H., & Choukr-Allah, R. (2020). Gis-based land suitability and crop vulnerability assessment under climate change in Chtouka Ait Baha, Morocco. *Atmosphere*, 11(11), 1167. <https://doi.org/10.3390/atmos11111167>
- Singh, G., & Shivakumar, B.G. (2010). The Role of soybean in agriculture. Pp. 24-47. In: Singh G. (Eds.). *The Soybean: Botany, Production and Uses*. CAB International.
- Singh, S., & Sarma, K. (2023). Spatial variability of soil parameters: A geostatistical approach. *International Journal of Geography, Geology and Environmen*, 5(2), 11-16. <https://doi.org/10.22271/27067483.2023.v5.i2a.166>
- Singha, C., Swain, K.C., & Swain, S.K. (2020). Best crop rotation selection with GIS-AHP technique using soil nutrient variability. *Agriculture*, 10(6), 213. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060213>
- Subiyanto., Hermanto Arief, U.M., & Nafi, A.Z. (2018). An accurate assessment tool based on intelligent technique for suitability of soybean cropland: Case study in Kebumen Regency, Indonesia. *Heliyon*, 4(7), e00684.
- Taghipour, F., Emadi, S.M., Danesh, M., & Sepanlou, M.G. (2025). Interpolation and artificial neural network to estimate soil spatial variability affected by land use and altitude. *Journal of South American Earth Sciences*, 157, 105485. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105485>
- Tashayo, B., Honarbakhsh, A., Akbari, M., & Eftekhari, M. (2020). Land suitability assessment for maize farming using a GIS-AHP method for a semi-arid region, Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(5), 332-338. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.03.003>
- Tewari, S., Arora, N.K., & Miransari, M. (2016). Plant growth promoting rhizobacteria to alleviate soybean growth under abiotic and biotic stresses. Pp. 131-155. In: Miransari M. (eds.). *Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production*. Volume 1, Academic Press, San Diego.
- Wang, Y.M., Luo, Y., & Hua, Z. (2008). On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications. *European Journal of Operational Research*, 186(2), 735-747. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.050>