Research Article

Agricultural Engineering., 49(3) (2026) 339-357

ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2026.52920.1822

ISSN (E): 2588-5944

Data-Driven Optimization of a Fuzzy Model for Soil Suitability Evaluation of Grain Maize

M. Eskandari[1]*, M.N. Navidi[2], J. Seyedmohammadi[1] and F. Ebrahimi Meymand[3]

1. Assistant Prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
2. Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3. Researcher, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 11 August 2026 Accepted: 30 September 2026 *Corresponding Author: mahnazskandari@yahoo.com

Abstract

Introduction: Accurate land suitability evaluation is an important basis for sustainable agricultural land management and improved crop productivity. Conventional parametric land evaluation methods commonly represent the effects of soil limitations using predefined, piecewise-linear relationships between soil properties and suitability scores. Although these relationships provide a continuous representation of suitability, their fixed linear form may not adequately capture nonlinear crop responses to variation in soil properties. Fuzzy logic provides an alternative framework by expressing the degree of suitability through continuous membership functions whose shape and parameters can be adjusted to represent nonlinear responses. However, the parameters of these functions are commonly defined using expert knowledge or predefined threshold values, which may not fully reflect crop responses under specific field conditions. A data-driven calibration approach can reduce reliance on manual parameter setting by optimizing membership-function parameters against observed crop performance. Therefore, the objective of this study was to develop a data-driven fuzzy soil suitability model for irrigated grain maize by optimizing the parameters of fuzzy membership functions using the Differential Evolution (DE) algorithm, and to examine the contribution of individual soil properties to the relationship between soil suitability and observed maize yield.

Materials and Methods: The study was conducted using observations from 100 irrigated grain-maize farms distributed across four agricultural regions of Iran, located in Khuzestan, Fars, Qazvin, and Kerman provinces. Climatic suitability was considered similar and suitable for maize across the study areas; therefore, the analysis focused on soil-related limitations. The soil and land characteristics considered as model inputs were soil pH, electrical conductivity (EC), exchangeable sodium percentage (ESP), calcium carbonate equivalent (CCE), gypsum content, soil texture, drainage condition, and slope. Actual maize yield, calculated as the average yield of each farm over five years, was used as an independent criterion for evaluating the relationship between the soil suitability index and crop performance and as the objective variable for data-driven optimization; it was not used as a direct input for calculating the suitability index. A classical parametric suitability model based on the framework of Sys et al. (1991) was first implemented as the reference approach. Subsequently, a fuzzy model was developed in which continuous membership functions were defined for the quantitative soil properties according to the agronomic response of maize, while qualitative variables were represented using expert-defined suitability functions. The parameters of the membership functions were then optimized using the DE algorithm by maximizing the coefficient of

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

determination (R^2) between the resulting fuzzy soil suitability index (FSI) and observed maize yield. The initial fuzzy model was also evaluated before optimization to quantify the effect of parameter optimization. Sensitivity analysis was conducted by removing each soil variable individually from the optimized model and assessing the resulting change in R^2. Permutation-based importance analysis was additionally used to examine the independent contribution of each predictor by randomly permuting its values while keeping the other predictors unchanged. Alternative aggregation operators were examined using the generalized power mean, and the effect of assigning variable-specific weights on the resulting suitability index was also evaluated.

Results and Discussion: The results showed that data-driven optimization of the membership-function parameters improved the relationship between the fuzzy soil suitability index and observed maize yield. The coefficient of determination increased from 0.45 for the initial fuzzy model to 0.69 after optimization, whereas the classical parametric suitability approach produced an R^2 of 0.59. Accordingly, the optimized fuzzy model provided a stronger explanation of the observed variation in maize yield than both the initial fuzzy formulation and the classical parametric approach. These results indicate that, in addition to adopting continuous fuzzy membership functions, appropriate calibration of their parameters is important for representing the field-level response of maize to soil limitations. Sensitivity analysis and permutation-based importance analysis did not produce identical rankings of soil properties, reflecting differences in the information captured by the two approaches; nevertheless, both analyses highlighted the greater contribution of several chemical soil properties to the observed relationship between soil suitability and maize yield. The complementary nature of the two analyses provides additional information on the influence of individual soil properties without implying that either analysis alone represents a unique causal ranking of the variables. Evaluation of alternative aggregation operators showed that the generalized power mean approached the geometric mean, with the optimized power parameter close to zero. Consequently, the geometric mean was retained for the final suitability index. Furthermore, applying variable-specific weights did not increase the coefficient of determination of the fuzzy model, indicating that weighting the membership functions did not provide an improvement over their unweighted geometric aggregation under the conditions of this study.

Conclusion: This study developed a data-driven framework for fuzzy soil suitability assessment of irrigated grain maize by optimizing membership-function parameters using the Differential Evolution algorithm and observed field yield. The results showed that optimization increased the coefficient of determination between the soil suitability index and observed maize yield from 0.45 to 0.69, compared with 0.59 obtained using the classical parametric approach. The findings demonstrate that data-driven adjustment of membership-function parameters can improve the ability of a fuzzy soil suitability index to explain variation in observed maize yield under field conditions. Sensitivity and permutation-based importance analyses provided complementary information on the contribution of individual soil properties, with several chemical properties showing greater influence than the evaluated topographic factors. The geometric mean remained the appropriate aggregation operator after evaluation of alternative power-mean formulations, while variable-specific weighting did not improve the model's R^2. Overall, the proposed framework provides a data-driven approach for reducing reliance on manual specification of membership-function parameters and may be considered in future soil suitability studies for other crops and regions where reliable field-performance data are available.

Acknowledgment: The authors gratefully acknowledge the support of the Soil and Water Research Institute in conducting the research project entitled "Determination of Crop Growth Requirements for Maize in the Provinces of Khuzestan, Fars, Kerman, and Qazvin" (Project No. 014-10-10-9452-94001). Some of the data used in this article were obtained from this project.

Keywords: Differential Evolution; fuzzy logic; maize; membership-function optimization; soil suitability evaluation.

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی داده‌محور یک مدل فازی در ارزیابی تناسب خاک برای کشت ذرت دانه‌ای

مهناز اسکندری[1*]، میرناصر نویدی[2]، جواد سیدمحمدی[1] و فاطمه ابراهیمی میمند[3]

۱- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲- دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- پژوهشگر، بخش تحقیقات شناسایی خاک و ارزیابی اراضی، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰

پذیرش نهایی:۱۴۰۵/۰۷/۰۸

کلمات کلیدی:
ارزیابی تناسب خاک،
الگوریتم تکامل تفاضلی،
بهینه‌سازی تابع عضویت،
ذرت دانه‌ای،
منطق فازی.

* عهده دار مکاتبات

Email: mahnazskandari@yahoo.com

چکیده

ارزیابی تناسب اراضی یکی از ابزارهای اساسی در مدیریت پایدار منابع خاک و افزایش بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی است. در سال‌های اخیر، استفاده از منطق فازی به دلیل توانایی در نمایش تدریجی محدودیت‌های خاک، مورد توجه قرار گرفته است، لیکن پارامترهای توابع عضویت در اغلب مطالعات بر پایه قضاوت کارشناسی، تعیین شده است. هدف از این پژوهش، توسعه یک مدل فازی داده‌محور برای ارزیابی تناسب خاک در کشت ذرت دانه‌ای از طریق بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی بود. برای این منظور، اطلاعات ۱۰۰ مزرعه ذرت دانه‌ای از چهار منطقه زراعی کشور شامل استان‌های فارس، خوزستان، قزوین و کرمان مورد استفاده قرار گرفت. تناسب اقلیم برای هر چهار منطقه، مشابه و مناسب بود. بنابراین تنها ویژگی‌های مختلف خاک شامل واکنش خاک، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی، درصد کربنات کلسیم معادل و گچ، بافت، وضعیت زهکشی و شیب اراضی به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل فازی انتخاب و شاخص تناسب خاک محاسبه شد. پارامترهای توابع عضویت با هدف بیشینه‌سازی ضریب تبیین رابطه بین شاخص تناسب خاک و عملکرد واقعی ذرت بهینه شدند. عملکرد مدل فازی با روش پارامتریک کلاسیک بر پایه رابطه شاخص تناسب خاک و عملکرد واقعی ذرت دانه‌ای مقایسه و اهمیت هر یک از ویژگی‌های خاک با استفاده از تحلیل حساسیت و روش اهمیت مبتنی بر جایگشت (permutation importance)، براساس مقدار کاهش ضریب تبیین پس از جابه‌جایی تصادفی مقادیر هر متغیر، ارزیابی شد. همچنین، عملگرهای تجمیع و اثر وزن‌دهی در محاسبه شاخص نهایی تناسب خاک مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل حساسیت و اهمیت مبتنی بر جایگشت از نظر رتبه‌بندی ویژگی‌های خاک کاملاً یکسان نبودند، لیکن هر دو روش بر اهمیت بیشتر برخی ویژگی‌های

خاک، به‌ویژه ویژگی‌های شیمیایی، تأکید داشتند. میانگین هندسی به‌عنوان مناسب‌ترین عملگر تجمیع انتخاب شد و اعمال وزن‌دهی موجب افزایش ضریب تبیین مدل فازی نشد. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی توابع عضویت مدل فازی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی، ضریب تبیین رابطه بین شاخص تناسب خاک و عملکرد واقعی ذرت را از ۰/٤٥ در مدل فازی اولیه به ۰/٦۹ افزایش می‌دهد، این آماره در روش پارامتریک کلاسیک، ۰/۵۹ به‌دست آمده بود. نتایج این پژوهش نشان داد که بهینه‌سازی داده‌محور توابع عضویت می‌تواند توانایی شاخص تناسب خاک در تبیین تغییرپذیری عملکرد واقعی ذرت را افزایش دهد. در نتیجه، وابستگی به تعیین دستی پارامترهای توابع عضویت کاهش می‌یابد. چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند در مطالعات آتی برای ارزیابی تناسب خاک در مقیاس‌های منطقه‌ای و ملّی به‌کار برده شود.

مقدمه

امنیت غذایی و توسعه پایدار کشاورزی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی جهان در دهه‌های اخیر به شمار می‌روند. افزایش جمعیت، محدودیت منابع خاک و آب، تغییرات اقلیمی و ضرورت افزایش بهره‌وری تولید، موجب شده است که استفاده بهینه از اراضی کشاورزی، بیش از گذشته مورد توجه قرار گیرد. در چنین شرایطی، استقرار هر محصول در مناسب‌ترین اراضی، یکی از مؤثرترین راهکارهای افزایش تولید، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و حفظ منابع طبیعی محسوب می‌شود. از این‌رو، ارزیابی تناسب اراضی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی برنامه‌ریزی کاربری اراضی، نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع خاک و تدوین الگوی کشت ایفا می‌کند (FAO, 1976; FAO, 1985).

در میان محصولات زراعی، ذرت دانه‌ای (*Zea mays L*) یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی جهان و ایران محسوب می‌شود. این محصول افزون‌بر نقش اساسی در تأمین خوراک دام و طیور، در صنایع غذایی، نشاسته، روغن و تولید فرآورده‌های مختلف نیز کاربرد گسترده‌ای دارد. عملکرد ذرت تحت تأثیر هم‌زمان عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شرایط اقلیمی و مدیریت زراعی قرار دارد. بنابراین، شناسایی اراضی مناسب برای کشت این محصول، علاوه بر افزایش عملکرد، می‌تواند در کاهش هزینه‌های تولید، استفاده بهینه از نهاده‌ها و افزایش پایداری سیستم‌های کشاورزی نقش مؤثری داشته باشد (FAO, 2023; Liu et al., 2023).

یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های کمّی مبتنی بر چارچوب FAO، روش پارامتریک سایس و همکاران (Sys et al., 1991) است که در آن، برای هر ویژگی خاک یک درجه تناسب تعیین شده و سپس از طریق یک عملگر ریاضی، شاخص نهایی تناسب محاسبه می‌شود. این روش طّی سال‌های گذشته در ارزیابی تناسب بسیاری از محصولات زراعی و باغی در نقاط مختلف جهان و ایران به‌کار گرفته شده و به دلیل سادگی محاسبات و قابلیت اجرا در محیط سامانه‌های اطلاعات مکانی (GIS)[1]، همچنان یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی تناسب اراضی محسوب می‌شود.

با وجود کاربرد گسترده روش‌های پارامتریک، یکی از محدودیت‌های بالقوه این روش‌ها به نحوه امتیازدهی به متغیرهای اقلیمی، خاک و اراضی و تبدیل مقادیر آن‌ها به درجات بدون‌بُعد تناسب مربوط می‌شود. در این روش‌ها، بسته به نوع متغیر، از توابع امتیازدهی قطعه‌ای خطی با شیب‌های متفاوت در بازه‌های مختلف یا توابع دارای یک نقطه بهینه استفاده می‌شود که در آن‌ها درجه تناسب با فاصله گرفتن از مقدار بهینه، در دو سوی آن و بر اساس روابط قطعه‌ای خطی کاهش می‌یابد. در این توابع، نقاط مرجع و شیب هر قطعه از پیش تعیین شده‌اند و اگرچه رابطه در هر بازه خطی است، شیب آن می‌تواند در نقاط شکست تغییر کند. ازاین‌رو، توانایی این توابع در بازنمایی پاسخ واقعی گیاه به

1- Geospatial Information Systems

تغییرات ویژگی‌های خاک و اراضی به شکل تابع و نقاط مرجع تعریف‌شده، وابسته است. بنابراین در مواردی که پاسخ واقعی گیاه، الگویی متفاوت از روابط تعریف‌شده داشته باشد، امتیازدهی به کمک این توابع ممکن است نتواند تغییرات تناسب را به‌طور کامل منعکس کند.

به‌منظور کاهش این محدودیت، طیّ دو دهه اخیر استفاده از منطق فازی در ارزیابی تناسب اراضی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در مدل‌های فازی، هر ویژگی خاک به‌جای تعلق کامل به یک کلاس، دارای درجه‌ای از عضویت در بازه صفر تا یک است و بدین ترتیب، تغییرات تدریجی شرایط خاک به‌صورت پیوسته مدل‌سازی می‌شود (Ross, 2010). این ویژگی موجب شده است که مدل‌های فازی در بسیاری از مطالعات، انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش‌های پارامتریک کلاسیک داشته باشند و بتوانند عدم قطعیت موجود در مرز کلاس‌های تناسب را بهتر مدیریت کنند. یکی از نخستین مطالعات شاخص در این زمینه پژوهشی بود که در آن با استفاده از توابع عضویت فازی و درون‌یابی مکانی، تناسب اراضی ذرت در شمال غنا را ارزیابی کردند (Braimoh et al., 2004). نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص تناسب حاصل از مدل فازی همبستگی بالایی با عملکرد واقعی ذرت ($R^2 \approx 0.87$) دارد، اما پارامترهای توابع عضویت بر پایه قضاوت کارشناسی تعیین شده و فرآیند کالیبراسیون داده‌محور انجام نشده بود. همچنین، پژوهش‌های متعددی تلاش کردند با تلفیق منطق فازی و GIS، دقت نقشه‌های تناسب اراضی را افزایش دهند. برای مثال، در پژوهشی با استفاده از روش Fuzzy AHP[1] و تحلیل خودهمبستگی فضایی، تناسب اراضی تحت کشت ذرت در اندونزی ارزیابی شد. اگرچه نتایج این مطالعه نشان داد که تلفیق منطق فازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند مناطق مناسب کشت را با دقت نسبتاً مناسبی تفکیک کند، اما همچنان از ضعف‌هایی برخوردار بود. به عنوان مثال، وزن‌دهی معیارها بر اساس مقایسات زوجی توسط خبرگان انجام شد که می‌تواند با تغییر افراد و منطقه کاملاً تغییر کند و پارامترهای توابع عضویت فازی نیز با استفاده از داده‌های واقعی عملکرد محصول بهینه‌سازی نشدند (Arif et al., 2025).

مطالعات مروری جدید نیز نشان می‌دهند که همچنان روش‌های AHP[2]، Fuzzy AHP، GIS و سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، رایج‌ترین ابزارهای ارزیابی تناسب اراضی هستند، در حالی که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تنظیم خودکار توابع عضویت هنوز محدود است (Abdullah et al., 2025; Mema et al., 2024). در یک مطالعه مروری دامنه‌دار که ۷۵ پژوهش منتشرشده طیّ سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ را بررسی کرده است، مشخص شد که رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCEA)[3] به‌طور گسترده در ارزیابی تناسب اراضی به‌کار گرفته شده است. همچنین نشان داده شد که در بخش عمده‌ای از این مطالعات، توابع عضویت فازی و وزن معیارها بر پایه مقادیر از پیش تعریف‌شده یا قضاوت کارشناسان تعیین شده است (Dang, 2024). بنابراین رویکردهای داده‌محور برای تنظیم این پارامترها تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، لو و همکاران (Lou et al., 2022) با ارائه توابع تناسب اصلاح‌شده برای ارزیابی اراضی زیر کشت محصولات زراعی نشان دادند که شکل تابع عضویت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نتایج ارزیابی داشته باشد. بنابراین پیشنهاد دادند که توسعه روش‌های داده‌محور برای تعیین پارامترهای این توابع، یکی از نیازهای مهم در تحقیقات آینده است. همچنین یک مقاله مروری منتشرشده در ۲۰۲۵، نشان داد که اگرچه ارزیابی کمّی تناسب اراضی نسبت به روش‌های کیفی، پیشرفت قابل توجهی داشته است، اما بسیاری از مدل‌های موجود هنوز ماهیتی ایستا داشته و به تغییرات واقعی سیستم خاک–گیاه و اطلاعات عملکرد مزرعه توجه کافی ندارند. نویسندگان این مطالعه بر ضرورت استفاده از روش‌های هوشمند، داده‌محور و قابل کالیبراسیون برای افزایش دقت ارزیابی تناسب اراضی تأکید داشتند (Bai et al., 2025).

در ایران نیز طیّ سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی تناسب اراضی محصولات زراعی بر پایه چارچوب FAO، روش پارامتریک و منطق فازی انجام شده است. در یکی از این مطالعات، عملکرد روش‌های مختلف ارزیابی تناسب خاک در برآورد عملکرد ذرت در خاک‌های آهکی مقایسه شده است و نشان دادند که مدل‌های غیرخطی قادرند ارتباط مناسب‌تری بین شاخص تناسب و عملکرد

1- Fuzzy Analytic Hierarchy Process
2- Analytic Hierarchy Process
3- Multi-Criteria Evaluation Analysis

واقعی محصول برقرار می‌کنند (Azadi et al., 2024). همچنین سیدمحمدی و همکاران (Seyedmohammadi et al., 2019; Seyedmohammadi et al., 2022) و نویدی و همکاران (Navidi et al., 2021)، در چندین مطالعه از روش فازی در ارزیابی تناسب اراضی ایران استفاده نموده و به نتایج نسبتاً مطلوبی نیز دست یافته‌اند. لیکن، بهینه‌سازی داده‌محور پارامترهای مدل فازی با عملکرد واقعی مزارع و استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی در این مطالعات مورد توجه قرار نگرفته است.

بنابراین با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در کاربرد منطق فازی، مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که در اغلب پژوهش‌ها، شکل توابع عضویت و پارامترهای آن‌ها بر اساس قضاوت کارشناسی، مقادیر پیشنهادی در منابع علمی یا تجربه پژوهشگر تعیین شده است. اگرچه این رویکرد از نظر اجرایی ساده و قابل استفاده است، اما لزوماً بهترین نمایش از رابطه واقعی بین ویژگی‌های خاک و عملکرد محصول را ارائه نمی‌دهد، زیرا پارامترهای توابع عضویت به‌طور مستقیم بر پایه داده‌های عملکرد واقعی کالیبره نشده‌اند. در نتیجه، دقت مدل‌های حاصل تا حدّ زیادی به تجربه کارشناس وابسته بوده و امکان تعمیم آن‌ها به شرایط مختلف محدود می‌شود.

در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی برای تنظیم خودکار پارامترهای مدل‌های غیرخطی نیز مورد توجه قرار گرفته است. در میان این روش‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی (DE)[1] به دلیل توانایی مناسب در جستجوی سراسری، همگرایی مطلوب و عملکرد مناسب در مسائل غیرخطی و چندپارامتری، به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های بهینه‌سازی شناخته می‌شود (Das and Suganthan, 2011; Storn and Price, 1997). با وجود این، استفاده از این الگوریتم برای کالیبراسیون توابع عضویت فازی در ارزیابی تناسب خاک بر پایه عملکرد واقعی مزارع، به‌ویژه در شرایط ایران، تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب داده‌محور برای ارزیابی تناسب خاک در کشت ذرت دانه‌ای انجام شد. توسعه مدل‌های داده‌محور مانند آنچه در این پژوهش ارائه شد، می‌تواند به ابزاری کارآمد تبدیل شود که افزون‌بر بهینه‌سازی توابع عضویت بر پایه عملکرد واقعی، قابل استفاده برای توسعه یک روش عینی و قابل تعمیم در ارزیابی تناسب خاک و فراهم‌کردن مبنایی برای تهیه نقشه‌های تناسب اراضی در مقیاس‌های بزرگ باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

به‌منظور توسعه یک مدل فازی برای ارزیابی تناسب خاک در کشت ذرت دانه‌ای، از اطلاعات عملکرد واقعی ۱۰۰ مزرعه ذرت آبی واقع در چهار منطقه عمده تولید ذرت کشور استفاده شد. این مناطق شامل شوش در استان خوزستان، زرقان در استان فارس، دشت قزوین در استان قزوین و ارزوئیه در استان کرمان بود که دامنه وسیعی از شرایط خاک و اراضی را شامل می‌شدند. انتخاب این مناطق برپایه ترکیبی از اهمیت تولید ذرت دانه‌ای، وجود مزارع ذرت آبی با سابقه کشت و عملکرد قابل دسترس و پوشش دامنه‌ای از شرایط متفاوت خاک و اراضی انجام شد. خوزستان، فارس و کرمان از مناطق مهم تولید ذرت دانه‌ای کشور محسوب می‌شوند و قزوین نیز از مناطق شناخته‌شده کشت ذرت آبی است. بنابراین، انتخاب این مناطق با هدف دستیابی به مجموعه‌ای از مزارع واقعی ذرت در شرایط متنوع خاکی و محیطی و افزایش قابلیت تعمیم نتایج مدل انجام شد. سپس به‌منظور بررسی تناسب اقلیمی، از داده‌های بلند مدت ایستگاه‌های هواشناسی شوش، زرقان، قزوین و ارزوئیه استفاده شد.

به‌منظور کاهش اثر عوامل مدیریتی بر عملکرد و تفکیک اثر ویژگی‌های خاک، مزارع نمونه به‌گونه‌ای انتخاب شدند که از نظر شیوه مدیریت زراعی تا حد امکان شرایط مشابهی داشته باشند. تمامی مزارع مورد مطالعه تحت نظام مدیریت متعارف و با عملیات زراعی مشابه، از جمله روش کشت، مدیریت آبیاری، مصرف نهاده‌ها و عملیات داشت، مدیریت می‌شدند. بنابراین، مدیریت به‌عنوان یک عامل نسبتاً ثابت در بین مزارع در نظر گرفته شد و تغییرات آن به‌عنوان منبع اصلی تفاوت عملکرد، فرض نشد.

1- Differential Evolution (DE) optimization algorithm

اطلاعات عملکرد مزارع بصورت متوسط پنج ساله در هر مزرعه بود که طیّ این دوره توسط جهاد کشاورزی منطقه مورد نظر، پایش و از زارع استعلام شده بود. شکل ۱، مناطق مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

نخست به منظور بررسی نقش اقلیم در عملکرد ذرت، شاخص تناسب اقلیمی چهار منطقه به کمک داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های مناسب به روش سایس و همکاران (Sys et al., 1991) بدست آمد. سپس برای تعیین ویژگی‌های خاک در محل نمونه‌برداری و ارتباط دادن آن‌ها با عملکرد واقعی همان مزرعه، هر مزرعه به‌عنوان یک واحد نمونه‌برداری مستقل در نظر گرفته شد و یک خاکرخ در محل منتخب هر مزرعه حفر گردید. خاکرخ‌ها برپایه راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک سرویس حفاظت خاک آمریکا (Soil Survey Staff, 2024)، تشریح شده و از هر افق نمونه‌برداری خاک انجام گرفت و برای آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی مرسوم به آزمایشگاه ارسال شد. آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری واکنش خاک به روش گل اشباع به‌وسیله الکترود شیشه، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج در دمای آزمایشگاه و سپس تصحیح آن برای دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، کربنات کلسیم معادل با روش تیتراسیون برگشتی با استفاده از اسید کلریدریک و سود نرمال، درصد گچ با استفاده از روش استن، سدیم تبادلی با دستگاه فلیم‌فتومتر، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با استفاده از استات سدیم و همچنین جداسازی اجزای مختلف شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری بایکوس انجام و کلاس بافت خاک با استفاده از مثلث بافت خاک تعیین شد (Soil Survey Staff, 2014).

پس از اخذ نتایج، متوسط‌گیری متغیرهای مورد نیاز با اعمال ضرایب وزنی در اعماق مختلف خاک انجام شد (Sys et al., 1991)، به گونه‌ای که برای هر مزرعه از هر متغیر، تنها یک عدد به عنوان نماینده در مدل‌سازی به‌کار گرفته شود. ویژگی‌های مورد استفاده به عنوان ورودی مدل‌های ارزیابی تناسب اراضی در این پژوهش، شامل شیب اراضی، وضعیت زهکشی، بافت و ساختمان خاک، درصد کربنات کلسیم معادل و گچ، واکنش خاک، هدایت الکتریکی عصاره اشباع و درصد سدیم تبادلی بود. لازم به ذکر است که ساختمان خاک به‌صورت کیفی و بر اساس نوع و وضعیت ساختمان در نیمرخ خاک ثبت شد. این ویژگی در ارزیابی تناسب اراضی، به‌ویژه در خاک‌ها با بافت سنگین و رسی، اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا تفاوت میان خاک‌های دارای ساختمان مشخص، مانند ساختمان مکعبی و خاک‌های توده‌ای و فاقد ساختمان مشخص، می‌تواند بر شرایط فیزیکی خاک و توسعه ریشه اثرگذار باشد. ازاین‌رو، ساختمان خاک مطابق چارچوب استفاده شده در جدول نیازهای رویشی خاک و زمین‌نما برای کشت ذرت دانه‌ای (Sys et al., 1991) تنها در بافتهای سنگین در ورودی مدل‌ها بکار گرفته شد. بنابراین ساختمان خاک به‌صورت یک متغیر مستقل با تابع عضویت جداگانه در محاسبه کمّی شاخص تناسب خاک وارد مدل نشده است.

در انتخاب متغیرهای ورودی مدل، ویژگی‌هایی در نظر گرفته شدند که برای تمامی ۱۰۰ مزرعه به‌صورت قابل اعتماد و با روش‌های استاندارد، اندازه‌گیری یا ثبت شده بودند. برخی ویژگی‌های دیگر، از جمله سنگریزه و فرسایش، اگرچه از جنبه نظری می‌توانند بر تناسب اراضی و عملکرد محصول اثرگذار باشند، به دلیل یکنواخت بودن برای تمامی مزارع در مجموعه داده حاضر وارد مدل نشدند.

جدول ۱، آماره‌های توصیفی متغیرهای کمّی مورد استفاده در این پژوهش را برای ۱۰۰ مزرعه نمونه نشان می‌دهد.

وضعیت زهکشی در هر یک از مزارع بصورت کیفی بررسی شد. نتایج نشان داد که ۹۵ درصد مزارع دارای زهکشی خوب، سه درصد دارای زهکشی متوسط و دو درصد دارای زهکشی ناقص بودند.

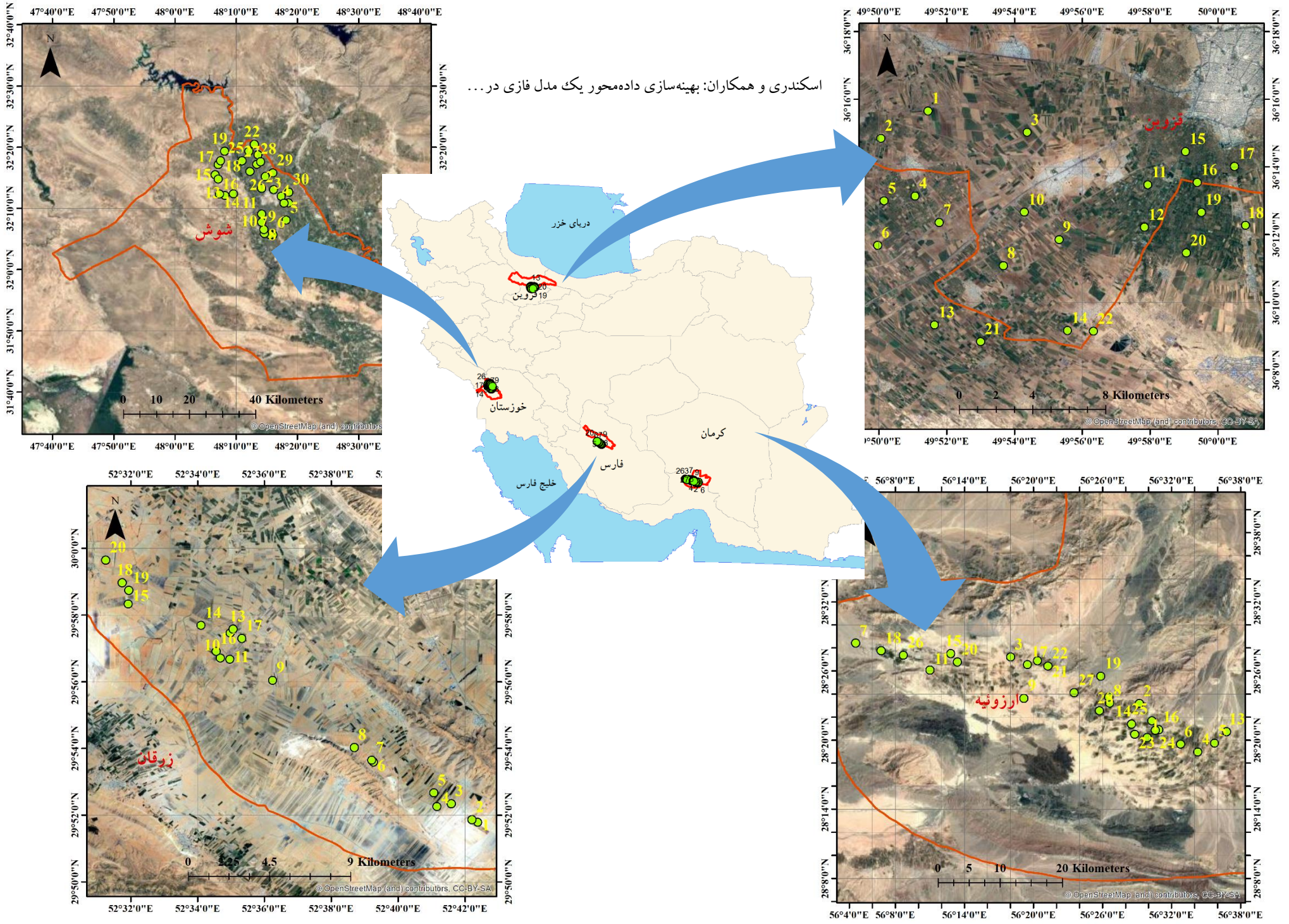


Figure 1. Geographic location of the study areas

Table 1. Descriptive statistics of soil and land properties for the 100 maize fields used in the study

Soil property	Mean	SD	Minimum	Maximum	CV (%)	Median
pH	7.72	0.42	6.80	8.50	5.45	7.80
EC (dS m^{-1})	3.31	4.02	0.50	29.00	121.66	1.98
ESP (%)	5.93	9.49	0.00	46.60	160.11	0.00
$CaCO_3$ equivalent (%)	29.19	12.48	7.08	61.29	42.76	32.52
Gypsum (%)	0.69	1.69	0.00	8.80	245.04	0.00
Sand (%)	34.77	16.50	14.05	92.00	47.45	30.00
Silt (%)	38.36	10.91	4.00	70.00	28.44	38.85
Clay (%)	26.87	9.26	4.00	46.65	34.48	27.64
Slope(%)	1.05	0.20	1.00	2.00	18.61	1.00

*Note. EC = Electrical Conductivity; ESP = Exchangeable Sodium Percentage; CV = Coefficient of Variation.

روش پارامتریک

به‌عنوان مدل پایه، روش پارامتریک سایس و همکاران (Sys et al., 1991)، مورد استفاده قرار گرفت. برای جداول نیازهای رویشی اقلیم و خاک و اراضی ذرت دانه‌ای ازکتاب سیدجلالی و همکاران (Seyedjalali et al., 2019)، استفاده شد. در نهایت، شاخص تناسب اقلیمی، شاخص تناسب خاک و شاخص تناسب اراضی به روش ریشه دوم محاسبه گردید.

مدل فازی

به‌منظور توسعه مدل فازی، برای هر یک از متغیرهای خاک و اراضی یک تابع عضویت فازی پیوسته تعریف شد. توابع عضویت اولیه با تکیه بر دانش زراعی درباره چگونگی و جهت پاسخ گیاه ذرت نسبت به هر ویژگی خاک و محدوده مطلوب رشد این گیاه، انتخاب شد. برای متغیرهایی که با افزایش مقدار آن‌ها کاهش تدریجی تناسب انتظار می‌رفت (مانند شوری، درصد سدیم تبادلی و کربنات کلسیم معادل و گچ)، از تابع سیگموئیدی کاهشی (رابطه ۱) استفاده شد:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(\frac{x - C}{s})} \quad (۱)$$

که در آن، (C) پارامتر مرکز تابع و (S) پارامتر شیب تابع است. در این رابطه، افزایش مقدار متغیر باعث کاهش تدریجی درجه عضویت می‌شود.

برای متغیر واکنش خاک که دارای دامنه بهینه است و افزایش یا کاهش آن از مقدار بهینه موجب کاهش عملکرد می‌شود، تابع گوسی (رابطه ۲)، مورد استفاده قرار گرفت:

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - P}{\sigma}\right)^2\right] \quad (۲)$$

که در آن، (P) مقدار بهینه و (σ) پارامتر کنترل‌کننده پهنای تابع گوسی است.

به‌منظور جلوگیری از اعمال قضاوت ذهنی در تعیین شکل توابع عضویت، نوع تابع برپایه دانش زراعی انتخاب شد، لیکن پارامترهای مربوط به هر تابع، نخست برپایه جدول نیازهای رویشی گیاه و سپس به کمک داده‌های واقعی از عملکرد مزارع، بهینه شدند. برای عوامل کیفی شامل بافت و ساختمان خاک، شیب و زهکشی، درجات عضویت بر اساس دانش کارشناسی و شرایط مناسب رشد ذرت تعیین و در فرآیند بهینه‌سازی ثابت نگه داشته شدند. بنابراین، بهینه‌سازی داده‌محور تنها برای پنج متغیر کمی شامل واکنش خاک، شوری و سدیمی بودن، درصد کربنات کلسیم معادل و گچ انجام شد.

پس از محاسبه درجه عضویت هر عامل، شاخص نهایی تناسب فازی (FSI) با استفاده از میانگین هندسی درجات عضویت (رابطه ۳) محاسبه شد:

$$FSI = exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} ln(\mu_i)\right) \quad (۳)$$

که در آن:

n تعداد عوامل محدودکننده،

μi درجه عضویت عامل i است.

سپس به‌منظور هم‌مقیاس شدن شاخص فازی با روش پارامتریک، مقدار FSI در عدد ۱۰۰ ضرب شد. نخست، با توجه به وجود ساختار ضربی در برخی روش‌های پارامتریک ارزیابی تناسب اراضی، از جمله روش ریشه دوم خدیر (Khiddir, 1986) که درکتاب سایس و همکاران (Sys et al., 1991) تشریح شده است، میانگین هندسی به‌عنوان عملگر تجمیع درجات عضویت در مدل فازی این پژوهش انتخاب شد. این انتخاب با هدف بهره‌گیری از یک عملگر مبتنی بر ضرب برای ترکیب درجات عضویت صورت گرفت. سپس، مناسب‌بودن این انتخاب از طریق بهینه‌سازی عددی بر مبنای میانگین توان تعمیم‌یافته (PM)[6] ارزیابی شد.

در اغلب مطالعات مبتنی بر منطق فازی، پارامترهای توابع عضویت بر اساس نظر کارشناسی یا مقادیرگزارش‌شده در منابع علمی تعیین می‌شوند. با وجود این، چنین رویکردی لزوماً منجر به بهترین تطابق میان شاخص تناسب و عملکرد واقعی محصول نمی‌شود، زیرا پاسخ گیاه به عوامل خاکی تحت تأثیر شرایط محلی، مدیریت مزرعه و برهم‌کنش عوامل مختلف قرار دارد. به همین منظور، در این پژوهش پارامترهای توابع عضویت به‌صورت داده‌محور و با استفاده از عملکرد واقعی ۱۰۰ مزرعه ذرت کالیبره شدند. در این راستا از الگوریتم تکامل تفاضلی که در بسته نرم‌افزاری DEoptim در محیط R پیاده‌سازی شده است، استفاده شد. این الگوریتم به دلیل توانایی مناسب در حل مسائل غیرخطی و چندپارامتری و بدون نیاز به محاسبه مشتق، برای کالیبراسیون مدل انتخاب شد. پارامترهای پنج تابع عضویت پیوسته شامل واکنش خاک، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی، درصد کربنات کلسیم معادل و گچ، به‌طور همزمان بهینه شدند. اما درجات عضویت عوامل کیفی، ثابت باقی ماندند. به این مفهوم که این عوامل در فرآیند بهینه‌سازی توابع عضویت وارد نشدند و درجات عضویت آنها بر اساس قواعد اولیه تعریف‌شده در مدل حفظ شد. بهینه‌سازی تنها برای ویژگی‌های کمّی خاک انجام گرفت. الگوریتم با اندازه جمعیت ۸۰ عضو و حداکثر ۱۵۰ نسل اجرا شد. برای سایر پارامترهای الگوریتم از مقادیر پیش‌فرض بسته DEoptim استفاده شد. در هر نسل، مقدار ضریب تبیین بین شاخص تناسب فازی و عملکرد واقعی ذرت به‌عنوان تابع هدف محاسبه شد و مجموعه پارامترهایی که بیشترین مقدار ضریب تبیین را ایجاد می‌کردند به نسل بعد منتقل گردید. به‌منظور جلوگیری از تولید مقادیر فاقد توجیه زراعی، برای هر پارامتر دامنه مشخصی تعریف شد. این دامنه‌ها بر اساس ترکیبی از اطلاعات منابع علمی، ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه ذرت و دامنه تغییرات مشاهده‌شده در داده‌های واقعی مزارع تعیین شد. این حدود به الگوریتم اجازه داد تا تنها در بازه‌های منطقی به جستجو بپردازد و از تولید توابع عضویت فاقد تفسیر زیستی جلوگیری شود. پارامترهای مورد جستجو در الگوریتم DEoptim در جدول ۲ ارائه شده است.

Table 2. Search ranges of membership-function parameters optimized by Differential Evolution for quantitative soil variables

Variable	Membership function	Parameter	Lower limit	Upper limit
pH	Gaussian	Center (*P*)	6.20	7.20
pH	Gaussian	σ	0.40	1.20
EC	Decreasing sigmoid	Center (*C*)	2.00	8.00
EC	Decreasing sigmoid	Slope (*S*)	0.20	3.00
ESP	Decreasing sigmoid	Center (*C*)	2.00	20.00
ESP	Decreasing sigmoid	Slope (*S*)	0.20	2.00
$CaCO_3$ equivalent	Decreasing sigmoid	Center (*C*)	20.00	60.00
$CaCO_3$ equivalent	Decreasing sigmoid	Slope (*S*)	0.05	0.50
Gypsum	Decreasing sigmoid	Center (*C*)	4.00	20.00
Gypsum	Decreasing sigmoid	Slope (*S*)	0.20	2.00

[6] Power Mean

تحلیل حساسیت

به‌منظور ارزیابی سهم نسبی هر یک از عوامل خاکی در عملکرد مدل فازی، تحلیل حساسیت بر روی مدل بهینه انجام شد. در این روش، هر بار یکی از توابع عضویت مربوط به یک عامل از فرآیند محاسبه شاخص تناسب حذف گردید، در حالی‌که سایر عوامل بدون تغییر باقی ماندند (Pianosi et al., 2016). سپس، شاخص تناسب فازی مجدداً محاسبه و رابطه آن با عملکرد واقعی ذرت مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار کاهش ضریب تبیین نسبت به مدل کامل، به‌عنوان شاخص حساسیت آن عامل در نظر گرفته شد. هر چه حذف یک عامل موجب کاهش بیشتری در ضریب تبیین شود، اهمیت آن عامل در پیش‌بینی عملکرد محصول بیشتر خواهد بود. این روش امکان مقایسه سهم نسبی عوامل مختلف خاک را در مدل فراهم نمود و مشخص ساخت که کدام ویژگی‌ها بیشترین نقش را در تغییرات عملکرد ذرت دارند. برای روش پارامتریک، به دلیل ساختار متفاوت و مبتنی بر ضرایب و حدود ازپیش‌تعریف‌شده، تحلیل حساسیت متغیرها بدین شکل اعمال نشد.

تحلیل اهمیت متغیرها

به‌منظور بررسی پایداری نتایج تحلیل حساسیت و ارزیابی مستقل اهمیت هر عامل، اهمیت متغیرها بر اساس جایگشت تصادفی نیز محاسبه شد. در این روش یعنی تحلیل اهمیت مبتنی بر جایگشت، به‌منظور ارزیابی اهمیت هر ویژگی خاک، مقادیر آن متغیر به‌صورت تصادفی بین نمونه‌ها جابه‌جا شد، در حالی که سایر متغیرها بدون تغییر باقی ماندند. سپس مدل بدون آموزش مجدد، اجرا گردید و کاهش ضریب تبیین نسبت به حالت اولیه، به‌عنوان شاخص اهمیت آن متغیر در نظر گرفته شد. هرچه کاهش ضریب تبیین بیشتر باشد، آن متغیر نقش مهم‌تری در پیش‌بینی عملکرد ایفا می‌کند. استفاده همزمان از تحلیل حساسیت وجایگشت تصادفی این امکان را فراهم نمود تا اهمیت عوامل خاک از دو دیدگاه مکمل مورد بررسی قرار گیرد.

مقایسه عملگرهای تجمیع

اگرچه در اغلب مطالعات مبتنی بر منطق فازی از میانگین هندسی برای تجمیع درجات عضویت استفاده می‌شود، در این پژوهش مناسب بودن این عملگر نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، شاخص تناسب خاک با استفاده از رابطه میانگین توانی تعمیم‌یافته محاسبه شد. بدین ترتیب که پارامتر λ با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی بهینه‌سازی شد. این پارامتر، میزان جبران‌پذیری بین عوامل محدودکننده را کنترل می‌کند و مشخص می‌کند که میانگین حسابی، هندسی، هارمونیک یا بین آن‌ها باشد. در صورتی که مقدار بهینه آن برابر با صفر باشد، عملگر مناسب میانگین هندسی خواهد بود.

بررسی اثر وزن‌دهی متغیرها

پس از کالیبراسیون مدل، امکان استفاده از وزن‌های متفاوت برای عوامل خاک نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، وزن نسبی هر عامل بر پایه نتایج تحلیل حساسیت استخراج و در محاسبه شاخص تناسب فازی وارد شد. سپس عملکرد مدل وزن‌دار با مدل بدون وزن مقایسه شد.

نرم‌افزارهای مورد استفاده

تمامی محاسبات و تحلیل‌های آماری در محیط R (Version 4.4.2) انجام شد. برای اجرای الگوریتم بهینه‌سازی جهانی از بسته DEoptim و برای مدیریت و پردازش داده‌ها از بسته‌های dplyr و سایر توابع پایه R استفاده گردید.

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

به‌منظور ارزیابی عملکرد این دو مدل مختلف، رابطه بین شاخص‌های تناسب خاک و عملکرد واقعی ذرت با استفاده از رگرسیون خطی ساده بررسی شد. بنابراین دو شاخص خاک برای تمام مزارع که به روش‌های سایس و همکاران (Sys et al., 1991) و فازی محاسبه شده بود، به کمک ضریب تبیین حاصل از هریک، مورد مقایسه قرار گرفت.

چکیده‌ای از روش‌های به‌کار رفته در این پژوهش برای ساخت و ارزیابی مدل‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

Table 3. Summary of Model Development and Evaluation Methods

Output	Approcah	Satge
Optimal Membership Function Parameters	DEoptim	Calibration
Coefficient of Determination	Linear Regression	Model Evaluation
Relative Importance of Factors	One-factor removal	Sensitivity Analysis
Independent Variable Importance	Permutation	Variable Importance
Selection of the Best Operator	Power Mean	Aggregation Test
Evaluation of Weight Effects	Weighted Geometric Mean	Weighting Test

نتایج

نتایج تناسب اقلیمی

با در نظر گرفتن تقویم فنولوژی و زمان کشت ذرت دانه‌ای، کشت بهاره در شوش و ارزوئیه (برای پشت سر گذاشتن بخش حساس گل‌دهی و گرده‌افشانی گیاه قبل از اوج گرمای تابستان) و کشت تابستانه در زرقان و قزوین در نظر گرفته شد. سپس شاخص تناسب اقلیمی با استفاده از جدول نیازهای رویشی گیاهان زراعی (Seyedjalali et al., 2019) و بر اساس شرایط اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی شوش، ارزوئیه، قزوین و زرقان محاسبه شد. شاخص اقلیمی برای ایستگاه‌های هواشناسی شوش، ارزوئیه، قزوین و زرقان به ترتیب برابر با ۸۴، ۸۲/۷، ۸۱/۵ و ۸۱/۳۴ بدست آمد. نتایج نشان داد که شرایط اقلیمی در هر چهار منطقه برای کشت ذرت دانه‌ای در تقویم کشت مربوطه، در محدوده تناسب بالا قرار داشته و تفاوت اقلیمی قابل‌توجهی که بتواند منبع اصلی تغییرات عملکرد در مزارع مورد مطالعه باشد، مشاهده نشد.

روش پارامتریک

در نخستین مرحله، توانایی شاخص‌های حاصل از روش پارامتریک برای پیش‌بینی عملکرد واقعی ذرت مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، رابطه بین عملکرد مشاهده‌شده مزارع و سه شاخص اقلیمی، شاخص خاک و شاخص نهایی اراضی با استفاده از رگرسیون خطی بررسی شد. نتایج نشان داد که شاخص اقلیمی دارای کمترین قدرت تبیین عملکرد بوده و تنها بخش اندکی از تغییرات عملکرد را توضیح می‌دهد که با توجه به ارقام بدست آمده به عنوان شاخص اقلیم در این چهار منطقه، کاملاً قابل پیش‌بینی بود. این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایط آبی و در محدوده مناطق مورد مطالعه، محدودیت‌های خاک نقش بسیار پررنگ‌تری نسبت به محدودیت‌های اقلیمی در تعیین عملکرد ذرت دانه‌ای ایفا می‌کنند. در مقابل، شاخص خاک و البته شاخص اراضی (ترکیب خاک و اقلیم)، عملکرد قابل قبولی داشتند، به‌طوری‌که ضریب تبیین آن‌ها به‌ترتیب حدود ۰/۵۹ و ۰/۵۸ به‌دست آمد. برپایه این نتایج، شاخص خاک به‌عنوان بهترین شاخص کلاسیک، مبنای مقایسه با مدل پیشنهادی قرار گرفت.

عملکرد مدل فازی اولیه

همانطور که گفته شد در اولین مدل فازی تهیه شده، از اعداد ارائه شده در جدول نیازهای رویشی خاک و اراضی ذرت دانه‌ای برای ساخت پارامترهای توابع عضویت استفاده شد. سپس شاخص تناسب فازی (FSI) با استفاده از میانگین هندسی درجات عضویت محاسبه گردید. در نسخه اولیه مدل، شکل توابع عضویت برپایه دانش زراعی و ارتباط هر متغیر با عملکرد انتخاب شد. همچنین هیچ‌گونه کالیبراسیونی با داده‌های واقعی انجام نگرفت. نتایج نشان داد که گرچه مدل فازی قادر به نمایش تغییرات تدریجی به شکل مناسب‌تری از روش رتبه‌بندی کلاسیک بود، لیکن استفاده از پارامترهای اولیه نتوانست بهبودی نسبت به شاخص خاک روش پارامتریک ایجاد کند. این نتایج نشان داد که انتخاب شکل تابع عضویت به‌تنهایی برای دستیابی به یک مدل مناسب کافی نیست و پارامترهای توابع عضویت نیز باید با استفاده از داده‌های واقعی عملکرد و متناسب با شرایط منطقه مورد مطالعه بهینه‌سازی شوند.

بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت

به‌منظور افزایش دقت مدل، پارامترهای پنج تابع عضویت پیوسته شامل واکنش خاک، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی، گچ و کربنات کلسیم معادل با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) تنظیم شدند. فرآیند بهینه‌سازی به‌طور همزمان بر روی ده پارامتر انجام شد و تابع هدف به‌صورت بیشینه کردن ضریب تبیین بین شاخص FSI و عملکرد واقعی ذرت تعریف گردید. الگوریتم DE بدون بروز مشکل همگرایی به مجموعه‌ای از پارامترها رسید که بیشترین مقدار ضریب تبیین را ایجاد نمود. الگوریتم DE در ۱۰ اجرای مستقل با seedهای مشخص ۱۰۰۱ تا ۱۰۱۰ اجرا شد و برای هر اجرا مقدار تابع هدف و پارامترهای بهینه ثبت شدند. پس از بهینه‌سازی، ضریب تبیین رابطه بین شاخص خاک در مدل فازی و عملکرد واقعی، بیش از ۰/۲ افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود انطباق مدل فازی با داده‌های عملکرد واقعی در مقایسه با حالت اولیه آن است. ضریب تبیین مدل فازی بهینه برابر با ۰/۶۹ بود و فاصله اطمینان ۹۵ درصدی آن بر اساس ۲۰۰۰ تکرارBootstrap، برابر با ۰/۵۷ تا ۰/۷۹ به‌دست آمد.

الگوریتم DE پس از ۱۵۰ نسل به مجموعه‌ای از پارامترها همگرا شد که بیشترین ضریب تبیین را بین شاخص تناسب فازی و عملکرد واقعی ذرت دانه‌ای ایجاد نمود. مقادیر بهینه پارامترها در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج نشان داد که پارامترهای بهینه استخراج‌شده توسط الگوریتم DE در بسیاری از موارد با مقادیر اولیه مبتنی بر دانش کارشناسی تفاوت دارند. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه دانش کارشناسی نقطه شروع مناسبی برای تعریف توابع عضویت است، اما بهینه‌سازی مبتنی بر داده‌های واقعی می‌تواند شکل این توابع را به‌گونه‌ای اصلاح کند که ارتباط میان ویژگی‌های خاک و عملکرد محصول با دقت بیشتری بازنمایی شود.

Table 4. Optimal Membership Function Parameters for the Optimized Soil Variables

Soil Property	Parameter	Optimal Value
pH	Optimum	7.200
pH	σ	0.402
EC	Center	2.004
EC	Slope	0.458
ESP	Center	2.014
ESP	Slope	0.400
$CaCO_3$ equivalent	Center	37.580
$CaCO_3$ equivalent	Slope	0.488
Gypsum	Center	4.618
Gypsum	Slope	0.781

همچنین جدول ۵، مقایسه ضرایب تبیین حاصل از مراحل مختلف ساخت مدل‌ها را ارائه می‌دهد.

Table 5. Comparison of Suitability Indices Based on Their Coefficients of Determination (R^2) with Observed Grain Maize Yield Values

Model	(R^2)
Climatic Index	0.08
Land Index	0.58
Soil Index	0.59
FSI Initial	0.45
FSI afterward calibration	**0.69**

تحلیل حساسیت مدل فازی پیشنهادی

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که همه عوامل سهم یکسانی در پیش‌بینی عملکرد ذرت دانه‌ای ندارند. حذف تابع عضویت مربوط به درصد گچ خاک، بیشترین کاهش در ضریب تبیین را ایجاد کرد، به‌طوری‌که مقدار R^2 از ۰/۶۹ به حدود ۰/۴۸۸ کاهش یافت. این نتیجه بیانگر نقش تعیین‌کننده گچ در تغییرات عملکرد ذرت در مزارع مورد مطالعه است. پس از گچ، حذف تابع عضویت مربوط به هدایت الکتریکی خاک، کاهش قابل توجهی در ضریب تبیین ایجاد نمود و مقدار R^2 را به حدود ۰/۵۲۵ رساند. همچنین حذف تابع عضویت درصد کربنات کلسیم معادل خاک موجب کاهش محسوس قدرت پیش‌بینی مدل شد.

در مقابل، حذف توابع عضویت مربوط به متغیرهای شیب، زهکشی و بافت خاک تنها کاهش اندکی در ضریب تبیین ایجاد کرد، به‌گونه‌ای که عملکرد مدل تقریباً مشابه مدل کامل باقی ماند. این نتیجه نشان می‌دهد که در محدوده تغییرات مشاهده‌شده در مزارع مورد مطالعه، این عوامل نقش محدودتری در تعیین عملکرد ذرت دانه‌ای داشته‌اند. حذف تابع عضویت مربوط به واکنش خاک نیز کاهش متوسطی در ضریب تبیین ایجاد نمود که نشان‌دهنده اهمیت این عامل در کنار ویژگی‌های شیمیایی اصلی خاک است. جدول ۶، نتایج کاهش ضریب تبیین پس از انجام تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد.

تحلیل اهمیت متغیرها

تحلیل اهمیت متغیرها به کمک الگوریتم جایگشت تصادفی نشان داد که همه متغیرها از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند و مقدار کاهش ضریب تبیین پس از جابه‌جایی هر متغیر، تفاوت قابل توجهی داشت. بیشترین کاهش ضریب تبیین مربوط به واکنش خاک بود که نشان می‌دهد این متغیر بیشترین سهم را در قدرت پیش‌بینی مدل داشته است. پس از آن، درصد کربنات کلسیم معادل و هدایت الکتریکی خاک در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در مقابل، درصد سدیم تبادلی نسبت به سایر ویژگی‌های شیمیایی خاک کاهش کمتری در عملکرد مدل ایجاد کرد. نتایج کاربرد این الگوریتم نشان داد که اگرچه همه ویژگی‌های شیمیایی خاک در عملکرد مدل نقش دارند، اما حساسیت مدل نسبت به برهم خوردن اطلاعات واکنش خاک و درصد کربنات کلسیم معادل بیش از سایر متغیرهاست.

ترتیب اهمیت متغیرها در تحلیل حساسیت و جایگشت تصادفی با یکدیگر متفاوت بود چرا که تحلیل حساسیت بررسی کننده اثر حذف کامل یک متغیر از مدل است در حالیکه جایگشت تصادفی بررسی می‌کند که اگر اطلاعات مرتبط با یک متغیر به‌هم‌ریخته شود، مدل چقدر آسیب می‌بیند.

Table 6. Sensitivity Analysis Results for the Fuzzy Model

Removed variable	Model R^2	Reduction relative to the full model
Full model	0.690	—
Slope	0.688	0.002
Drainage	0.688	0.002
$CaCO_3$ equivalent	0.547	0.142
Texture	0.686	0.004
pH	0.641	0.048
EC	0.525	0.164
Gypsum	0.488	0.202
ESP	0.685	0.004

Table 7. Relative importance of variables based on random permutation

Variable	Importance score
pH	0.595
$CaCO_3$ equivalent	0.453
EC	0.380
ESP	0.250

نتایج ارزیابی عملگرهای تجمیع

میانگین توانی تعمیم‌یافته نشان داد که مقدار بهینه برای پارامتر λ به صفر میل می‌کند و الگوریتم تکامل تفاضلی نتوانست مقداری متفاوت از صفر را به‌عنوان راه‌حل پایدار شناسایی کند. از آنجا که مقدار λ=0 متناظر با میانگین هندسی است، نتایج این بخش نشان داد که میانگین هندسی همچنان مناسب‌ترین عملگر برای تجمیع درجات عضویت در این پژوهش محسوب می‌شود. این نتیجه بیانگر آن است که بهبود دقت مدل عمدتاً ناشی از بهینه‌سازی مناسب توابع عضویت بوده است و تغییر عملگر تجمیع تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مدل ندارد.

نتایج اثر وزن‌دهی متغیرها

همانطور که گفته شد، وزن نسبی هر متغیر بر اساس نتایج تحلیل حساسیت استخراج و در محاسبه شاخص تناسب فازی اعمال شد. سپس عملکرد مدل وزن‌دار با مدل بدون وزن مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان داد که اعمال وزن‌ها نه تنها موجب افزایش ضریب تبیین نشد، بلکه باعث کاهش آن از حدود ۰/۶۹ به حدود ۰/۶۲ گردید. این یافته نشان می‌دهد که اگرچه برخی متغیرها سهم بیشتری در پیش‌بینی عملکرد دارند، اما الزاماً این موضوع به معنای مناسب بودن استفاده از وزن بیشتر برای آن‌ها در فرآیند تجمیع نیست. در واقع، میانگین هندسی بدون وزن توانسته است تعادل مناسبی بین اثر متغیرهای مختلف برقرار کند و اعمال وزن‌ها موجب برهم خوردن این تعادل شده است. بنابراین، مدل نهایی بدون استفاده از وزن‌های اختصاصی به‌عنوان مدل منتخب در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

بحث

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، افزایش قابل توجه توانایی شاخص تناسب خاک در تبیین تغییرات عملکرد پس از بهینه‌سازی توابع عضویت بود. در حالی که بهترین شاخص حاصل از روش پارامتریک کلاسیک تنها حدود ۵۹ درصد از تغییرات عملکرد ذرت دانه‌ای را تبیین می‌کرد، استفاده از توابع عضویت بهینه‌شده این مقدار را به حدود ۶۹ درصد افزایش داد. این بهبود را می‌توان به تفاوت بنیادی میان روش‌های پارامتریک و مدل فازی نسبت داد. در روش پارامتریک، تغییرات شاخص هر ویژگی خاک نسبت به عملکرد گیاه به‌صورت یک رابطه خطی یا قطعه‌ای–خطی در نظر گرفته می‌شود، در حالی که پاسخ گیاه به بسیاری از ویژگی‌های خاک، از دیدگاه زیستی، معمولاً غیرخطی است. افزون‌بر این، بهینه‌سازی توابع فازی با استفاده از داده‌های واقعی عملکرد موجب شد پارامترهای این توابع با شرایط واقعی مزارع مورد مطالعه تطبیق داده شوند. اهمیت کالیبراسیون داده‌محور معیارها و پارامترهای مدل‌های فازی در ارزیابی تناسب اراضی نیز در مطالعات پیشین مورد تأکید قرار گرفته است؛ به عنوان مثال، لیو و همکاران (Liu et al., 2013)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، معیارهای ارزیابی یک سیستم فازی را بر اساس داده‌های نمونه تنظیم کردند و بهبود عملکرد معیارهای بهینه‌شده را گزارش نمودند. بنابراین، افزایش مقدار ضریب تبیین در پژوهش حاضر را نباید تنها به دلیل استفاده از منطق فازی دانست، بلکه بهینه‌سازی داده‌محور پارامترهای توابع عضویت نیز نقش مهمی در این بهبود داشته است.

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که انتقال مستقیم جداول رتبه‌بندی پارامتریک به محیط فازی، بدون تنظیم پارامترهای توابع عضویت، لزوماً به بهبود رابطه شاخص تناسب خاک و عملکرد منجر نمی‌شود. این موضوع با مطالعاتی که بر اهمیت انتخاب و تنظیم شکل توابع عضویت در مدل‌های فازی تناسب اراضی تأکید داشته‌اند، همخوانی دارد. برای نمونه، ندرلو و همکاران (Naderloo et al., 2014)، نشان دادند که نوع تابع عضویت می‌تواند بر نتایج مدل فازی تناسب خاک اثر قابل توجهی داشته باشد. نتایج تحلیل حساسیت و آزمون جایگشت تصادفی نشان دادند که ویژگی‌های شیمیایی خاک نسبت به ویژگی‌های فیزیکی سهم بیشتری در تعیین عملکرد ذرت دانه‌ای دارند، اگرچه ترتیب اهمیت آن‌ها در دو روش کاملاً یکسان نبود. در میان ویژگی‌های مورد بررسی، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی، واکنش خاک و درصد کربنات کلسیم معادل و گچ، بیشترین سهم را در عملکرد مدل داشتند؛ در

حالی که حذف بافت و ساختمان خاک و شیب و زهکشی اراضی، تغییر اندکی در ضریب تبیین ایجاد نمود. این الگو با برخی مطالعات تناسب اراضی برای کشت ذرت در مناطق تحت تأثیر شوری، سدیمی‌بودن و آهکی‌بودن خاک نیز سازگار است؛ برای مثال، در مطالعه‌ای در دشت مرودشت، شوری، سدیمی‌بودن و کربنات کلسیم به‌عنوان محدودیت‌های مهم مرتبط با تولید ذرت گزارش شدند (Tashayo et al., 2020).

یافته‌های حاصل با شرایط مناطق مورد مطالعه نیز سازگار بود. مزارع مورد بررسی همگی در اراضی آبی واقع شده و نسبتاً هموار بودند. بنابراین دامنه تغییرات شیب، زهکشی و حتی بافت محدود بود و این عوامل نقش محدودی در تغییرات عملکرد ایفا کردند. در مقابل، تغییرات قابل توجه ویژگی‌های شیمیایی خاک موجب ایجاد محدودیت‌های مستقیم در جذب عناصر غذایی، توسعه ریشه و وضعیت اسمزی گیاه شده و در نتیجه تأثیر بیشتری بر عملکرد ذرت دانه‌ای داشته‌اند.

به‌ویژه در خاک‌های آهکی ایران، برهم‌کنش میان شوری، سدیمی‌بودن، کربنات کلسیم و گچ می‌تواند دسترسی گیاه به عناصر کم‌مصرف مانند آهن، روی و منگنز را کاهش دهد و از این طریق موجب افت عملکرد شود. بنابراین، طبیعی است که مدل پیشنهادی حساسیت بیشتری نسبت به این متغیرها نشان دهد.

یکی از یافته‌های قابل توجه این پژوهش، تفاوت در رتبه‌بندی اهمیت متغیرها میان تحلیل حساسیت و آزمون جایگشت تصادفی بود. در تحلیل حساسیت، حذف تابع عضویت مربوط به گچ بیشترین کاهش در ضریب تبیین را ایجاد کرد، در حالی که در آزمون جایگشت تصادفی، بیشترین افت عملکرد مدل مربوط به واکنش خاک بود. در نگاه نخست ممکن است این تفاوت متناقض به نظر برسد، اما در واقع این دو روش جنبه‌های متفاوتی از اهمیت متغیرها را اندازه‌گیری می‌کنند. در تحلیل حساسیت، هر متغیر به‌طور کامل از مدل حذف می‌شود؛ بنابراین این روش میزان وابستگی ساختاری مدل به حضور آن متغیر را ارزیابی می‌کند. به عبارت دیگر، اگر حذف یک متغیر موجب افت شدید عملکرد مدل شود، آن متغیر نقش اساسی در ساختار مدل دارد. در مقابل، در آزمون جایگشت تصادفی، متغیر از مدل حذف نمی‌شود، بلکه فقط ارتباط میان مقادیر آن و عملکرد واقعی از طریق جابه‌جایی تصادفی داده‌ها از بین می‌رود. بنابراین، این روش میزان اطلاعات پیش‌بینی‌کننده موجود در آن متغیر را اندازه‌گیری می‌کند.

بر این اساس، نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار گچ، نقش ساختاری مهمی در مدل دارد، در حالی که واکنش خاک بیشترین اطلاعات مستقل را برای پیش‌بینی عملکرد فراهم می‌کند. از این رو، تفاوت مشاهده‌شده میان این دو روش نه تنها تناقض محسوب نمی‌شود، بلکه بیانگر آن است که هر یک از آن‌ها جنبه متفاوتی از رفتار مدل را آشکار می‌کنند. بنابراین، استفاده همزمان از این دو روش موجب شد اهمیت متغیرها از دو دیدگاه مکمل بررسی شود و درک جامع‌تری از رفتار مدل پیشنهادی حاصل گردد.

بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، انتظار می‌رفت اختصاص وزن بیشتر به متغیرهای با اهمیت بالاتر موجب افزایش قدرت پیش‌بینی مدل شود. با این حال، نتایج نشان داد که اعمال وزن‌های متفاوت نه تنها باعث افزایش ضریب تبیین نشد، بلکه مقدار آن را کاهش داد. این نتیجه بیانگر آن است که اهمیت نسبی متغیرها الزاماً به معنای مناسب بودن استفاده از آنها به عنوان ضرایب وزن در فرآیند تجمیع نیست. در مدل حاضر، هر تابع عضویت پس از بهینه‌سازی، اطلاعات مربوط به همان ویژگی خاک را در مقیاس مشترک صفر تا یک بیان می‌کند. بنابراین، میانگین هندسی بدون وزن، تعادل مناسبی میان اثر تمامی ویژگی‌ها برقرار می‌کند.

در مقابل، اعمال وزن‌های بزرگ‌تر برای برخی متغیرها موجب شد سهم سایر ویژگی‌ها در محاسبه شاخص تناسب کاهش یابد و در نتیجه بخشی از اطلاعات مکمل موجود در سایر ویژگی‌های خاک از دست برود. از آنجا که عملکرد گیاه حاصل اثر همزمان مجموعه‌ای از عوامل خاک است، تمرکز بیش از حد بر یک یا چند ویژگی می‌تواند تعادل مدل را بر هم زند. نتایج این بخش نشان می‌دهد که بهینه‌سازی دقیق توابع عضویت نسبت به اعمال وزن‌های متفاوت، نقش مؤثرتری در افزایش دقت مدل ایفا می‌کند.

یکی دیگر از یافته‌های مهم این پژوهش، عدم بهبود عملکرد مدل با استفاده از میانگین توانی تعمیم‌یافته بود. به‌عبارت ساده‌تر، ساختار داده‌های مورد مطالعه به گونه‌ای بود که هیچ‌یک از عملگرهای مبتنی بر میانگین حسابی یا میانگین‌های توانی قادر به ایجاد تعادل مناسب‌تر میان درجات عضویت نبودند. میانگین هندسی به دلیل ماهیت ضربی خود، حضور همزمان تمامی محدودیت‌های خاک را در شاخص نهایی منعکس می‌کند و اجازه نمی‌دهد عملکرد بسیار مناسب یک ویژگی، اثر محدودکننده یک ویژگی دیگر را کاملاً جبران کند. از دیدگاه ارزیابی تناسب اراضی نیز این رفتار کاملاً منطقی است، زیرا رشد گیاه تابع اصل عامل محدودکننده است. بنابراین وجود یک محدودیت شدید در یکی از ویژگی‌های خاک می‌تواند عملکرد محصول را حتی در حضور سایر شرایط مناسب، کاهش دهد.

چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش قابلیت تعمیم به سایر محصولات زراعی و باغی را نیز دارد، مشروط بر آنکه داده‌های عملکرد واقعی و اطلاعات مربوط به ویژگی‌های خاک برای محصول مورد نظر در دسترس باشد. در چنین شرایطی، می‌توان پارامترهای توابع عضویت را متناسب با پاسخ واقعی هر محصول تنظیم نمود و از این طریق دقت ارزیابی تناسب اراضی را افزایش داد.

افزون بر این، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به‌عنوان یکی از اجزای اصلی توسعه مدل‌های ارزیابی تناسب اراضی در مقیاس ملی مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه در این مطالعه اختلاف اقلیمی میان مناطق مورد بررسی محدود بود و اثر اقلیم بر تغییرات عملکرد ناچیز ارزیابی شد، انتظار می‌رود در مقیاس ملی، با افزایش تنوع اقلیمی و تفاوت در شرایط فنولوژیکی محصول، ترکیب مدل فازی خاک با شاخص‌های اقلیمی و فنولوژیکی بتواند چارچوب جامع‌تری برای تهیه نقشه‌های ملی تناسب اراضی فراهم آورد.

رویکرد پیشنهادی این پژوهش را می‌توان گامی در راستای گذار از سیستم‌های امتیازدهی ایستا و مبتنی بر قضاوت کارشناسی، به مدل‌های پویا، داده‌محور و قابل تنظیم و بهینه‌سازی دانست. رویکردی که می‌تواند در تدوین الگوی کشت، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از اراضی و توسعه سامانه‌های تصمیم‌یار کشاورزی نقش مؤثری ایفا کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور افزایش دقت شاخص تناسب خاک برای ذرت دانه‌ای، توابع عضویت فازی ویژگی‌های اصلی خاک با استفاده از داده‌های واقعی عملکرد ۱۰۰ مزرعه در چهار منطقه کشور و الگوریتم بهینه‌سازی DE تنظیم شدند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی داده‌محور توابع عضویت موجب افزایش ضریب تبیین مدل از حدود ۰/۵۹ در روش پارامتریک کلاسیک به حدود ۰/۶۹ در مدل فازی شد. همچنین تحلیل حساسیت و آزمون جایگشت تصادفی نشان دادند که ویژگی‌های شیمیایی خاک، به‌ویژه واکنش خاک، کربنات کلسیم معادل، شوری، درصد سدیم تبادلی و گچ، بیشترین نقش را در عملکرد مدل دارند. در حالی که اعمال وزن‌های متفاوت برای متغیرها موجب بهبود دقت مدل نشد و میانگین هندسی همچنان مناسب‌ترین عملگر تجمیع درجات عضویت باقی ماند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از توابع عضویت بهینه‌شده بر پایه داده‌های واقعی عملکرد می‌تواند دقت مدل‌های ارزیابی تناسب خاک را افزایش داده و چارچوب مناسبی برای توسعه مدل‌های ارزیابی تناسب اراضی در مطالعات آینده فراهم آورد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از حمایت‌های مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای به انجام رسیدن پروژه تحقیقاتی "تعیین نیازهای رویشی برای ذرت در استان‌های خوزستان، فارس، کرمان و قزوین" با شماره مصوب ۰۱۴-۱۰-۱۰-۹۴۵۲-۹۴۰۰۱ قدردانی می‌نمایند. بخشی از داده‌های این مقاله از پروژه ذکرشده استخراج شده است.

References

Abdullah, N., Zolkafli, A., & Omar, M. (2025). Advancements and integration of biophysical, socio-economic, and local knowledge in agricultural land suitability assessments: A systematic literature review. *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 53(1), 168–192. https://doi.org/10.33998/mja.2025.156944.1531.

Arif, S., Baja, S., Nurmiaty, N., Syamsuddin, E., & Syamsuddin, S. (2025). Optimizing maize cultivation through Fuzzy AHP: Balancing land suitability, land use, and environmental sustainability. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(4), 8219–8233. https://doi.org/10.15243/jdmlm.2025.124.8219.

Bai, S., Chen, Y., Fu, B., Wu, M., Yu, T., & Cui, X. (2025). Cropland suitability assessment evolution and outlooks. *Discover Sustainability*, 6, Article 773. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01712-w.

Braimoh, A. K., Vlek, P. L. G., & Stein, A. (2004). Land evaluation for maize based on fuzzy set and interpolation. *Environmental Management*, 33(2), 226–238. https://doi.org/10.1007/s00267-003-0171-6.

Dang, M. (2024). Assessment of crop-land suitability by the multi-criteria evaluation approach and geographic information system: A scoping review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *26*(2), 57–78. https://cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/view/9049.

Das, S., & Suganthan, P. N. (2011). Differential evolution: A survey of the state-of-the-art. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 15(1), 4–31. https://doi.org/10.1109/TEVC.2010.2059031.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1976). *A framework for land evaluation.*

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1985). *Guidelines: Land evaluation for irrigated agriculture.*

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *FAOSTAT: Crops and livestock products*. https://www.fao.org/faostat.

Liu, Y., Jiao, L., Liu, Y., & He, J. (2013). A self-adapting fuzzy inference system for the evaluation of agricultural land. *Environmental Modelling & Software*, 40, 226–234. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.013.

Liu, Y., Li, Y., & Zhang, X. (2023). Land suitability evaluation for sustainable agricultural development: A review. *Land*, 12(9), Article 1705. https://doi.org/10.3390/land12091705.

Luo, F., He, L., Chen, Z., He, Z., Bai, W., Zhao, Y., & Cen, Y. (2024). Optimizing arable land suitability evaluation using improved suitability functions in the Anning River Basin. *Scientific Reports*, 14(1):28886. Doi:10.1038/s41598-024-80302-8.

Mema, O., Jojic, E., & Laze, P. (2024). GIS-based multi-criteria decision making approach as a tool for land suitability analysis: A review. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources*, *68*(3), 87–93. https://stumejournals.com/journals/am/2024/3/87.

Naderloo, L., Sarmadian, F., Alimardani, R., & Omid, M. (2014). Optimizing the fuzzy model for land suitability evaluation by GA approach and choosing the kind of membership function. *In Proceedings of the First National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources*. [In Persian].

Navidi, M. N., Seyedmohammadi, J., Bazargan, K., Khosravinejad, A., & Delsouz Khaki, B. (2021). Identification of land potential and characterizing limitations for irrigated wheat cultivation in a part of Qazvin Plain using fuzzy and AHP techniques. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 943–955. 943–955. https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.316251.668859. [in Persian with English Abstract].

Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B., & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214–232. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008.

Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.

Seyedjalali, S. A., Navidi, M. N., Zeynoddini Meymand, A., & Mohammad Esmaeil, Z. (2019). field crops requirements. Soil and Water Research Institute. http://www.swri.ir/fa-IR/DouranPortal/5118/page/%D8%A7%D9%86%D8%AA%D8%B4%D8%A7%D8%B1%D8%A7%D8%AA. [In Persian].

Seyedmohammadi, J., Navidi, M. N., Seyedjalali, S. A., Farajnia, A., & Fatehi, S. (2022). Analyzing land limitations and determining their degree of suitability for cereals cultivation in the irrigated plains of Iran.

Iranian Journal of Soil and Water Research. https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342737.669266. [in Persian with English Abstract].

Seyedmohammadi, J., Sarmadian, F., Jafarzadeh, A. A., & McDowell, R. W. (2019). Integration of ANP and fuzzy set techniques for land suitability assessment based on remote sensing and GIS for irrigated maize cultivation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(8), 1063–1079. https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1549363.

Soil Survey Staff. (2014). *Kellogg Soil Survey Laboratory methods manual* (Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0; R. Burt & Soil Survey Staff, Eds.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. https://files.isric.org/public/documents/KelloggSSL_MethodsManual_R42V5_2014.pdf.

Soil Survey Staff. (2024). *Field book for describing and sampling soils* (Version 4.0). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/field-book-for-describing-and-sampling-soils.

Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359. https://doi.org/10.1023/A:1008202821328.

Sys, C., Van Ranst, E., & Debaveye, J. (1991). Land evaluation (Parts I–II). General Administration for Development Cooperation.

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, 332–338. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.03.003.