Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research

(Soil and Water Sci.)

https:// srjournal.areeo.ir/

Land Suitability Evaluation in a Part of the Dasht-e-Moghan for Irrigated Alfalfa Cultivation Development: A Comparative Approach Between Parametric and ELECTRE-TRI Methods

Javad Seyedmohammadi[a*], and Mir Naser Navidi[a]

[a] Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article Type
Research Article

Received
June 30, 2026
Revised
August 30, 2026
Accepted
September 02, 2026
Published online
November 17, 2026

Keywords
Alfalfa
Dasht-e-Moghan
ELECTRE-TRI
Land suitability evaluation
Square root method

***Corresponding author's email**
j.mohammadi@areeo.ac.ir

Extended Abstract

Background and Objectives: Given the decline in agricultural land over the past decades, determining land suitability is a vital step toward sustainable agriculture and environmental preservation. Alfalfa is one of the most important forage crops in the world, playing a vital role in providing livestock feed and supporting the development of the livestock industry. This crop has a special place in crop rotation due to its high production potential, excellent nutritional value, and positive role in improving soil structure. However, to sustainably increase yield and prevent soil quality decline, it is essential to pay attention to optimal land management. Considering the strategic importance of alfalfa cultivation, the necessity of land suitability assessment studies for sustainable exploitation of soil resources, and the research gap in the study area in the field of applying advanced decision-making models, this study aims to determine the suitability of land units under sprinkler irrigation, identify susceptible and limiting areas, and finally, compare the efficiency of the multi-criteria ELECTRE TRI method and the parametric square root method in a part of the lands of the Moghan Plain.

Materials and Methods: The study area, with an area of 3930 ha, is a part of the Dasht-e-Moghan, which is located between 47°43′ to 47°50′ E longitude and 39°24′ to 39°28′ N latitude. The average annual temperature and rainfall of the region are 15.4 ℃ and 271.5 mm, respectively. The soil moisture regime was aridic bordering on xeric, and the soil temperature regime was thermic. For sampling, the study profiles were first gridded and surveyed at 500 m intervals. A total of 160 profiles were dug, and samples were taken from their different horizons. In total, 46 soil map units were separated at the regional level. To achieve the suitability of land units, eight key attributes, including soil depth, calcium carbonate, gypsum, pH, electrical conductivity, exchangeable sodium percentage, slope, and climate, were selected using Principal Component Analysis (PCA) and Euclidean distance. Criterion weights were determined via a pairwise comparison matrix, and the thresholds for the ELECTRE-TRI model were established based on the crop requirement table. Subsequently, the parametric square root method and the multi-criteria ELECTRE-TRI method were used for land suitability evaluation for alfalfa cultivation.

Results: The results of land suitability assessment showed that, based on the square root method, 11.61% of the land was classified in the S1 class, 63.5% in the S2 class, 24.36% in the S3 class, and 0.52% in the N1 class. On the other hand, the use of the ELECTRE TRI multi-criteria model for qualitative assessment of land suitability showed that 26.79% of the land was in the S1 class, 60.74% in the S2 class, 12.39% in the S3 class, and 0.08% in the N1 class. Slope, soil depth, electrical conductivity, and exchangeable sodium percentage are the most important characteristics limiting alfalfa growth in the region. The ELECTRE-TRI model results were more consistent with field

reality based on crop yield in units under alfalfa cultivation. Hotelling's Trace and Wilks' Lambda multivariate tests confirmed the accuracy of class discrimination in the ELECTRE-TRI method. Furthermore, the LSD test revealed significant differences among soil properties across the land suitability classes differentiated by this approach. Ultimately, the ELECTRE-TRI method exhibited higher accuracy than the parametric square root method for land suitability evaluation due to its appropriate determination of transition boundaries, application of realistic thresholds, and use of fuzzy logic principles.

Conclusion: From a practical perspective, the output maps provide planners of the study area with an efficient decision-making tool for implementing smart and spot-based management of inputs, including local amendment of saline-sodic soils and monitoring of phosphorus dynamics. Moreover, by separating inappropriate lands, this approach prevents the waste of investment in the development of sprinkler irrigation systems in sensitive lands. In this regard, operators and executive experts of the region are advised to prioritize corrective measures such as adding manure fertilizers to improve the physical condition of the soil, optimal use of phosphate fertilizers, and the use of biological fertilizers in units facing limitations. Finally, exploring the potential of other modern multi-criteria decision-making models, measuring the dynamics of suitability boundaries under climate change scenarios, and integrating this methodology with machine learning algorithms to predict production potential on a large scale are among the most important research needs for future studies.

Cite this article: Seyedmohammadi, J., Navidi, M.N., 2026. Land Suitability Evaluation in a Part of the Dasht-e-Moghan for Irrigated Alfalfa Cultivation Development: A Comparative Approach Between Parametric and ELECTRE-TRI Methods. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (3), pp 343-360.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.373348.826

Publisher: Soil Science Society of Iran

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

ارزیابی تناسب بخشی از اراضی دشت مغان برای توسعه کشت آبی یونجه: رویکردی مقایسه‌ای بین روش‌های پارامتریک و الکتره ترای

جواد سیدمحمدی[۱*] و میرناصر نویدی[۱]

[۱] مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۵

واژه‌های کلیدی

ارزیابی تناسب اراضی

دشت مغان

یونجه

روش پارامتریک

الکتره ترای

***ایمیل نویسنده مسئول**

j.mohammadi@areeo.ac.ir

چکیده

با توجه به محدودیت و تغییر کاربری اراضی زراعی در دهه‌های گذشته، تعیین تناسب اراضی گامی حیاتی در جهت کشاورزی پایدار و حفظ محیط زیست است. این تحقیق با هدف ارزیابی تناسب ۳۹۳۰ هکتار از اراضی دشت مغان برای کشت یونجه تحت آبیاری بارانی، به مقایسه روش پارامتریک ریشه دوم با روش چندمعیاره الکتره ترای پرداخته است. بدین منظور، داده‌های ۱۶۰ خاک‌رخ بررسی شد و ۸ ویژگی کلیدی شامل عمق خاک، آهک، گچ، pH، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی، شیب و اقلیم از طریق تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و سنجش چندبعدی گزینش شد. وزن معیارها با ماتریس مقایسه زوجی و آستانه‌های مدل الکتره ترای، بر اساس جدول نیازمندی‌های گیاهی تعیین شد. نتایج روش الکتره ترای بیشتر با واقعیت میدانی بر اساس عملکرد محصول، در واحدهای تحت کشت یونجه تطابق داشت. آزمون‌های چند متغیره هاتلینگ و ویلکس صحت تفکیک کلاس‌ها را در روش الکتره ترای تأیید کردند. همچنین آزمون LSD اختلاف معنی‌داری را میان ویژگی‌های خاک در کلاس‌های تناسب اراضی تفکیک شده با این روش نشان داد. در نهایت، روش الکتره ترای به دلیل تعیین مناسب حدود انتقالی، اعمال آستانه‌های واقع‌بینانه و بهره‌گیری از اصول منطق فازی، دقت بالاتری نسبت به روش پارامتریک ریشه دوم در ارزیابی تناسب اراضی نشان داد.

استناد: سیدمحمدی، ج.، نویدی، م.ن.، ۱۴۰۵. ارزیابی تناسب بخشی از اراضی دشت مغان برای توسعه کشت آبی یونجه: رویکردی مقایسه‌ای بین روش‌های پارامتریک و الکتره ترای. مقاله پژوهشی، *نشریه پژوهش‌های خاک*، (۳) ۴۰، ص ۳۴۳- ۳۶۰.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.373348.826

CC BY NC

مقدمه

استفاده بهینه و پایدار از منابع اراضی به‌منظور تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد، یکی از چالش‌های بنیادین در کشورهای در حال توسعه، از جمله ایران، به‌شمار می‌رود. ارزیابی تناسب اراضی به عنوان یک ابزار پیش‌بینی‌کننده، نقش کلیدی در تعیین کارایی خاک برای کاربری‌های مشخص کشاورزی ایفا کرده و پتانسیل‌ها و محدودیت‌های محیطی را برای تولید بهینه محصولات برآورد می‌کند (Seyedmohammadi et al., 2019; Seyedmohammadi and navidi, 2025). بهره‌برداری مفرط و مداوم از اراضی کشاورزی بدون در نظر گرفتن ظرفیت و تناسب آنها در دهه‌های گذشته، منجر به تخریب شدید منابع خاک و آب شده است؛ از این رو، ارزیابی سیستماتیک اراضی بر اساس خصوصیات اکولوژیکی و نیازمندی‌های گیاهی امری ضروری است (AbdelRahman et al., 2025; Bilal et al., 2025). یک برنامه‌ریزی اصولی در مدیریت اراضی باید به‌گونه‌ای تدوین شود که علاوه بر بیشینه‌سازی بازده اقتصادی در کوتاه‌مدت، پایداری محیط‌زیستی و حفظ منابع را برای نسل‌های آینده تضمین کند.

تقاضای روزافزون برای تولید غذا و محدودیت شدید منابع طبیعی، ضرورت به‌کارگیری رویکردهای نوین و هوشمند را در ارزیابی اراضی دوچندان کرده است تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند میان پایداری محیط‌زیستی و سودآوری اقتصادی تولیدکنندگان تعادل برقرار کنند. در همین راستا، متدولوژی‌های ارزیابی اراضی به سوی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره سوق یافته‌اند که قادرند مجموعه‌ای پیچیده از معیارهای متضاد را به‌طور هم‌زمان تحلیل کنند (Alemayehu et al., 2020; Bilal et al., 2025). از سوی دیگر، توانمندی سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزاری قدرتمند، دقیق و انعطاف‌پذیر در مدیریت، تحلیل و مدل‌سازی حجم وسیعی از داده‌های مکانی و توصیفی، سبب شده است که تلفیق GIS و تصمیم‌گیری چندمعیاره به سنگ‌بنای پژوهش‌های مدرن تناسب اراضی تبدیل شود. این ادغام، امکان مدل‌سازی تغییرات مکانی را در سطوح مختلف تجمیع فراهم می‌سازد (Zolekar and Bhagat, 2015; Sobhani, 2023). در میان این مدل‌ها، روش الکتره ترای[1] به دلیل قابلیت منحصربه‌فرد در دسته‌بندی گزینه‌ها (واحدهای اراضی) به کلاس‌های تناسب پیش‌تعریف‌شده، جایگاه ویژه‌ای دارد. این روش، برتری‌های تصمیم‌گیرندگان را از طریق اعمال آستانه‌های برتری[2]، بی‌تفاوتی[3] و عدم مقبولیت[4] و با لحاظ کردن وزن معیارها وارد مدل‌سازی می‌کند و به دلیل بهره‌گیری از مفاهیم منطق فازی، ابهام موجود در مرزهای انتقالی خاک را به حداقل می‌رساند (Mendas et al., 2021; Telles et al., 2024).

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با سیستم اطلاعات جغرافیایی کارایی بالایی در ارزیابی تناسب اراضی دارد. در این راستا، Mendas و Delali (2012) و Mendas و همکاران (2021) با به‌کارگیری روش الکتره ترای در محیط GIS برای کشت گندم دوروم و کشاورزی، برتری و دقت بالاتر این رویکرد را نسبت به روش‌های کلاسیک اثبات کردند. افزون بر این، پژوهش‌های متعددی بر شناسایی فاکتورهای محدودکننده اقلیمی و ادافیکی تمرکز داشته‌اند؛ برای نمونه، شیب، فرسایش، شوری، کربنات کلسیم و کمبود ماده آلی به عنوان اصلی‌ترین موانع تولید پایدار در مطالعات مختلف معرفی شده‌اند (Akinci et al., 2013; Kazemi et al., 2016). در سال‌های اخیر، کاربرد فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی[5] و روش‌های رتبه‌بندی اصلاح‌شده در محیط GIS توسعه چشمگیری یافته است (Zolekar and Bhagat, 2015; Nguyen et al., 2015; Alemayehu et al., 2020). این روند در مطالعات نوین نیز تداوم داشته است؛ به‌طوری که پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که انعطاف‌پذیری GIS در تلفیق با مدل‌های غیرخطی و فازی، خطاهای مرزی در تفکیک کلاس‌های تناسب را به حداقل رسانده و نقشه‌هایی با تطابق بسیار بالا با واقعیت زمینی تولید که پویایی و دقت این نقشه‌ها به دلیل انتخاب صحیح معیارهای بومی و هماهنگ با نیازهای فیزیولوژیک گیاه است (Seyedmohammadi and Navidi, 2022; Sobhani, 2023; Bilal et al., 2025; Ersado and Talluri, 2026; Akram et al., 2026).

در همین راستا، Alemayehu و همکاران (2020) در پژوهشی در اتیوپی، بر اساس پارامترهای خاک، اقلیم و توپوگرافی، استفاده از روش‌های چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی را در تفکیک اراضی مستعد و مدیریت پایدار کشت یونجه بسیار مؤثر گزارش کردند. سبحانی (2023) برای شناسایی نواحی مستعد کشت علوفه یونجه در استان اردبیل از روش‌های چندمعیاره بر اساس عوامل بارش، متوسط دما، کمینه دما، بیشینه دما، ارتفاع، شیب و خاک و در محیط GIS امکان سنجی کشت انجام داد و نقشه تناسب اراضی را تهیه کرد. همچنین Bilal و همکاران (2025) با ارزیابی عوامل کلیدی همچون بارندگی، دما، شیب، انواع خاک، ارتفاع، شوری آب زیرزمینی، فاصله از جاده‌ها و فاصله از تأسیسات فاضلاب در مناطقی از قطر، از تلفیق GIS و سنجش از دور برای پهنه‌بندی تناسب اراضی جهت کشت محصولات

[1] ELECTRE-TRI
[2] Preference
[3] Indifference
[4] Veto
[5] AHP

علوفه‌ای استفاده کردند و نقشه‌های حاصل را ابزاری کارآمد برای دستیابی به تولید پایدار دانستند. با وجود توسعه روزافزون این روش‌ها در سراسر جهان، ارزیابی تناسب اراضی با استفاده از مدل الکتره ترای به‌ویژه در قالب یک رویکرد مقایسه‌ای با روش‌های پارامتریک کلاسیک برای محصولات استراتژیک علوفه‌ای مانند یونجه، همچنان در مطالعات داخلی مغفول مانده و نیازمند بررسی دقیق است.

یونجه از مهم‌ترین محصولات علوفه‌ای در جهان است که نقش حیاتی در تأمین جیره غذایی دام و توسعه صنعت دامپروری ایفا می‌کند. محصول یونجه در استان اردبیل در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ دارای سطح زیرکشت آبی ۹۳۵۰ هکتار، تولید ۵۰ هزار تن و عملکرد ۵۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بوده است. با توجه به صنعت دامپروری در استان، یونجه دارای اهمیت خاصی در تأمین نیازهای علوفه‌ای دام‌های موجود است. این محصول به دلیل پتانسیل تولید بالا، ارزش غذایی ممتاز و نقش مثبت در بهبود ساختار خاک، جایگاه ویژه‌ای در تناوب زراعی دارد. با این حال، به‌منظور پایداری در افزایش عملکرد و جلوگیری از افت کیفی خاک، توجه به مدیریت بهینه اراضی الزامی است. با توجه به اهمیت راهبردی کشت یونجه، ضرورت مطالعات ارزیابی تناسب اراضی برای بهره‌برداری پایدار از منابع خاک و همچنین خلأ پژوهشی موجود در منطقه مورد مطالعه در زمینه به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته تصمیم‌گیری، این پژوهش با هدف تعیین تناسب واحدهای اراضی تحت آبیاری بارانی، شناسایی نواحی مستعد و محدودکننده و در نهایت، مقایسه کارایی روش چندمعیاره الکتره ترای و روش پارامتریک ریشه دوم در بخشی از اراضی دشت مغان پایه‌ریزی شده است.

مواد و روش‌ها

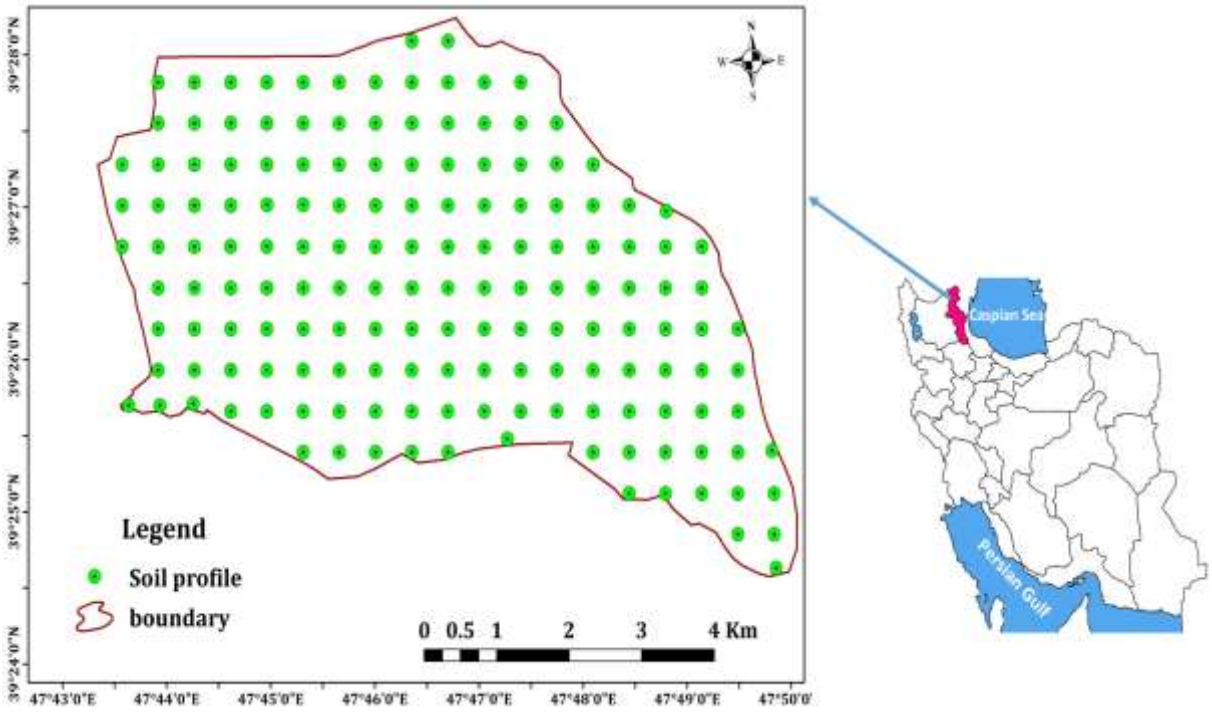
ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه با مساحت ۳۹۳۰ هکتار، بخشی از اراضی دشت مغان که در حد فاصل طول شرقی '۴۳°۴۷ تا '۵۰°۴۷ و عرض شمالی '۲۴°۳۹ تا '۲۸°۳۹ واقع شده است (شکل ۱). بر اساس داده‌های آماری ایستگاه هواشناسی سینوپتیک پارس‌آباد (دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳)، میانگین دمای سالانه منطقه ۱۵/۴ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی سالانه ۲۷۴/۵ میلی‌متر است. از نظر زمین‌شناسی، تشکیلات این محدوده شامل تراس‌های آبرفتی قدیمی با بافت رس-سیلتی، لایه‌های توف سفید، رس-سیلتی و ماسه توفی همراه با آهک، کنگلومرا و رس است (Ghorbani, 2013). رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک منطقه با استفاده از مدل نیوهال[6] به‌ترتیب اریدیک[7] در مرز زریک[8] و ترمیک[9] تعیین گردید.

عملیات صحرایی و رده‌بندی خاک

به‌منظور نمونه‌برداری، خاکرخ‌های مطالعاتی در فواصل ۵۰۰ متری از یکدیگر شبکه‌بندی و بررسی شدند و در مجموع ۱۶۰ خاکرخ حفر و بر اساس دستورالعمل تشریح و نمونه‌برداری خاک دپارتمان کشاورزی آمریکا (Soil Survey Staff, 2024) تشریح و از افق‌های مختلف آن‌ها نمونه‌برداری شد. آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری pH گل اشباع به‌وسیله الکترود شیشه، EC در عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت سنج در دمای آزمایشگاه و سپس تصحیح آن برای دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، آهک با روش تیتراسیون برگشتی با استفاده از اسید کلریدریک و سود نرمال، کربن‌آلی به روش سوزاندن تر با دی‌کرومات پتاسیم در مجاورت اسید سولفوریک غلیظ، فسفر قابل جذب به‌وسیله عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم ۰/۵ نرمال (روش اولسن)، پتاسیم قابل جذب گیاه از روش عصاره‌گیری با استات‌آمونیم در pH خنثی و تعیین غلظت پتاسیم با استفاده از فلیم‌فتومتر، ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از استات سدیم در pH=۸/۲ و استات‌آمونیم خنثی و برای نمونه‌های دارای گچ از اگسالات سدیم در pH=۸/۲ و اندازه‌گیری درصد گچ با استفاده از روش استن صورت گرفت. همچنین جداسازی اجزای مختلف شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری بایکوس و کلاس بافت خاک با استفاده از مثلث بافت خاک آمریکایی تعیین گردید (Soil Survey Staff, 2022a). پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج، خاک‌های منطقه بر اساس کلید رده‌بندی خاک آمریکایی (Soil Survey Staff, 2022b) در رده اریدیسول[10] قرار گرفتند.

[6]Newhall
[7]Aridic
[8]Xeric
[9]Thermic
[10]Aridisols



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و محل خاکرخ‌ها.
Figure 1. Location of the study area and soil profiles position.

انتخاب ویژگی‌های کلیدی ارزیابی

بر اساس اصول استاندارد ارزیابی تناسب اراضی (Sys et al., 1991)، به‌منظور بهینه‌سازی مدل‌سازی و انطباق با شرایط بومی منطقه، تعداد ۸ ویژگی کلیدی خاک و اقلیم برای ورود به فرآیند ارزیابی انتخاب شدند. جهت حذف هم‌خطی و گزینش مؤثرترین متغیرها، از دو رویکرد آماری چندمتغیره شامل سنجش چندبعدی[11] و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی[12] استفاده گردید. در تحلیل سنجش چندبعدی، به‌کارگیری سنجه فاصله اقلیدسی برای تفکیک و استخراج متغیرهای هم‌پوشان و مشابه توصیه شده است (Wang, 2012). در این روش، ویژگی‌هایی که از نظر هندسی کمترین فاصله اقلیدسی را دارند، در فضایی چندبعدی در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند که این امر تصمیم‌گیری برای حذف یا ابقای آن‌ها را تسهیل می‌کند (Dasheng et al., 2011). همچنین، در رویکرد تجزیه به مؤلفه اصلی، مؤلفه‌هایی با مقدار ویژه[13] بزرگتر از یک استخراج شدند. سپس با بررسی ماتریس ضرایب هماهنگی (بار عاملی)، ویژگی‌هایی که بیشترین وزن و اثرگذاری را در تبیین واریانس داده‌ها داشتند، به عنوان معیارهای نهایی ارزیابی تناسب اراضی برگزیده شدند.

روش‌های ارزیابی تناسب اراضی

روش پارامتریک ریشه دوم

به طورکلی، رویکرد پارامتریک شامل سه گام اساسی است: ۱- انتخاب خصوصیات یا کیفیات اراضی ۲- تعیین نیازمندی‌های محصول و ۳- انطباق این نیازمندی‌ها با ویژگی های اراضی. متغیرهای مورد استفاده در این روش شامل پارامترهای اقلیمی، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک هستند. شاخص اراضی در این رویکرد بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$LSI = R_{min} \times \sqrt{\frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times \dots}$$

رابطه(۱)

در رابطه ۱، LSI شاخص تناسب اراضی و...A, B, درجات اختصاص یافته برای مشخصه‌های مختلف و R_{min} درجه مربوط به محدودکننده‌ترین عامل یا درجه حداقل می‌باشند.

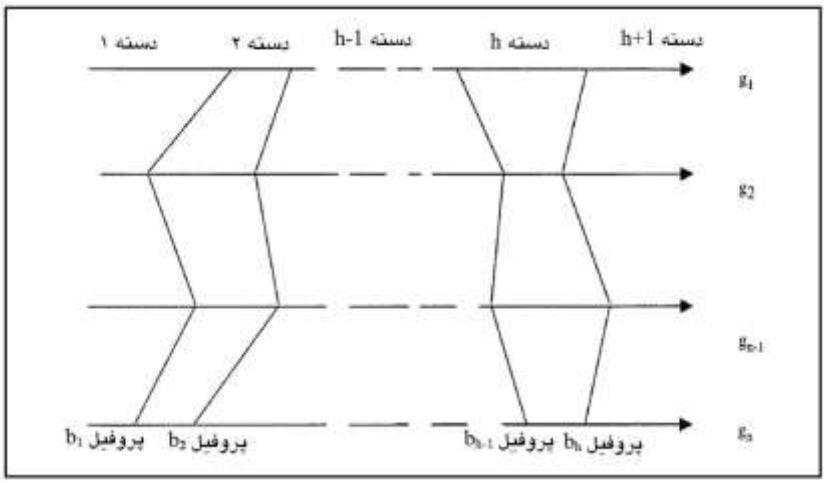
روش الکتره ترای

این روش یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره دسته بندی محور است که گزینه‌ها را در طبقاتی از پیش تعیین‌شده قرار می‌دهد. این فرایند از طریق مقایسه هر گزینه با پروفیل‌های

[11] Multi dimentional scaling
[12] Principal component analysis
[13] Eigenvalue

مرزی (b) که حد فاصل طبقات هستند، صورت می‌گیرد (Telles et al., 2024). ساختار شماتیک این روش در شکل ۲ ارائه شده است. چنانچه برای معیارهای $g_1, g_2, \ldots, g_n$ (مجموعه F)، پروفیل های مرزی $b_1, b_2, \ldots, b_h$ (مجموعه B) تعریف شوند، به طوری که b_h حد بالایی دسته C_h و حد پایینی دسته C_h+1 باشد $\{h=(1,2,\ldots,p)\}$، در مجموع P+1 دسته ایجاد خواهد شد. در این مدل رابطه برتری (S) بین گزینه‌ها و پروفیل‌ها برقرار می شود بدین معنا که رابطه aSb_h یا b_hSa نشان می‌دهد که گزینه a حداقل به اندازه پروفیل b_h مطلوب است یا بالعکس. اطلاعات ترجیحی هر معیار با آستانه‌های بی‌تفاوتی (q) و ارجحیت (p) مشخص می‌شود که نشان‌دهنده دقت ارزیابی گزینه‌ها هستند (Mousseau, 2003). آستانه بی‌تفاوتی $q_j(b_h)$ حداکثر اختلاف $g_j(a)$-$g_j(b_h)$ است که در آن تصمیم‌گیرنده بین گزینه a و پروفیل b_h تفاوت معنی‌داری قائل نمی‌شود. در مقابل، آستانه ارجحیت $p_j(b_h)$حداقل اختلافی است که برتری قطعی گزینه a و پروفیل b_h برای معیار g_j است. برای طبقه‌بندی گزینه‌ها، شاخص‌های موافقت[14] و مخالفت[15] براساس اصول منطق فازی محاسبه می شوند که این امر انعطاف‌پذیری مدل را در مواجهه با عدم قطعیت افزایش می‌دهد (Telles et al., 2024).

علاوه بر این، ضرایب وزن معیارها ($w_1, w_2, \ldots, w_n$) و آستانه عدم مقبولیت $v_j(b_h)$ در ساخت روابط برتری نقش دارند. به طوری که آستانه عدم مقبولیت نشان‌دهنده حداقل اختلاف $g_j(b_h)$-$g_j(a)$ است که فرضیه aSb_h کاملاً رد می‌کند. در این روش شاخص $\sigma(a, b_h) \in [0, 1]$ تبیین کننده درجه اعتبار رابطه aSb_h است. اگر $\sigma(a, b_h) \geq \lambda$ باشد رابطه برتری برقرار است. در اینجا λ سطح جدایی[16] است که مقدار بهینه آن بین ۰/۵ تا ۱ بوده و از طریق تحلیل حساسیت تعیین می‌شود (Telles et al., 2024). دسته‌بندی گزینه‌ها در این مدل به دو رویکرد بدبینانه[17] و خوش‌بینانه[18] انجام می‌شود. در رویکرد بدبینانه گزینه a به‌صورت متوالی از بالاترین پروفیل مقایسه شده و در اولین دسته‌ای قرار می‌گیرد که رابطه aSb_h برقرار باشد (C_{h+1}). در رویکرد خوش‌بینانه مقایسه از پایین‌ترین پروفیل آغاز شده و اولین مرزی که رابطه b_hSa را برقرار نماید، گزینه a را به دسته C_h می‌فرستد. در ارزیابی تناسب اراضی گزینه‌ها همان واحدهای اراضی یا واحدهای نقشه، دسته‌ها یا طبقات همان کلاس‌های تناسب اراضی و پروفیل‌ها نشان‌دهنده مرز و حدود انتقالی کلاس‌های تناسب اراضی هستند که از جدول نیازمندی‌ها با توجه به نوع محصول تعیین می‌شوند (Mendas et al., 2021).



شکل ۲- نحوه قرارگیری پروفیل‌ها و دسته‌ها (Mousseau, 2003).

Figure 2. How profiles and categories are placed (Mousseau, 2003).

نیازمندی‌های یونجه برای کشت با آبیاری تحت فشار بارانی با استفاده از منابع معتبر تدوین گردید (FAO, 1979; 2006; 2012a; 2012b; Sys et al., 1993) و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱).

[14]Concordance indices
[15]Discordance indices
[16]Cutting level
[17]Pessimistic
[18]Optimistic

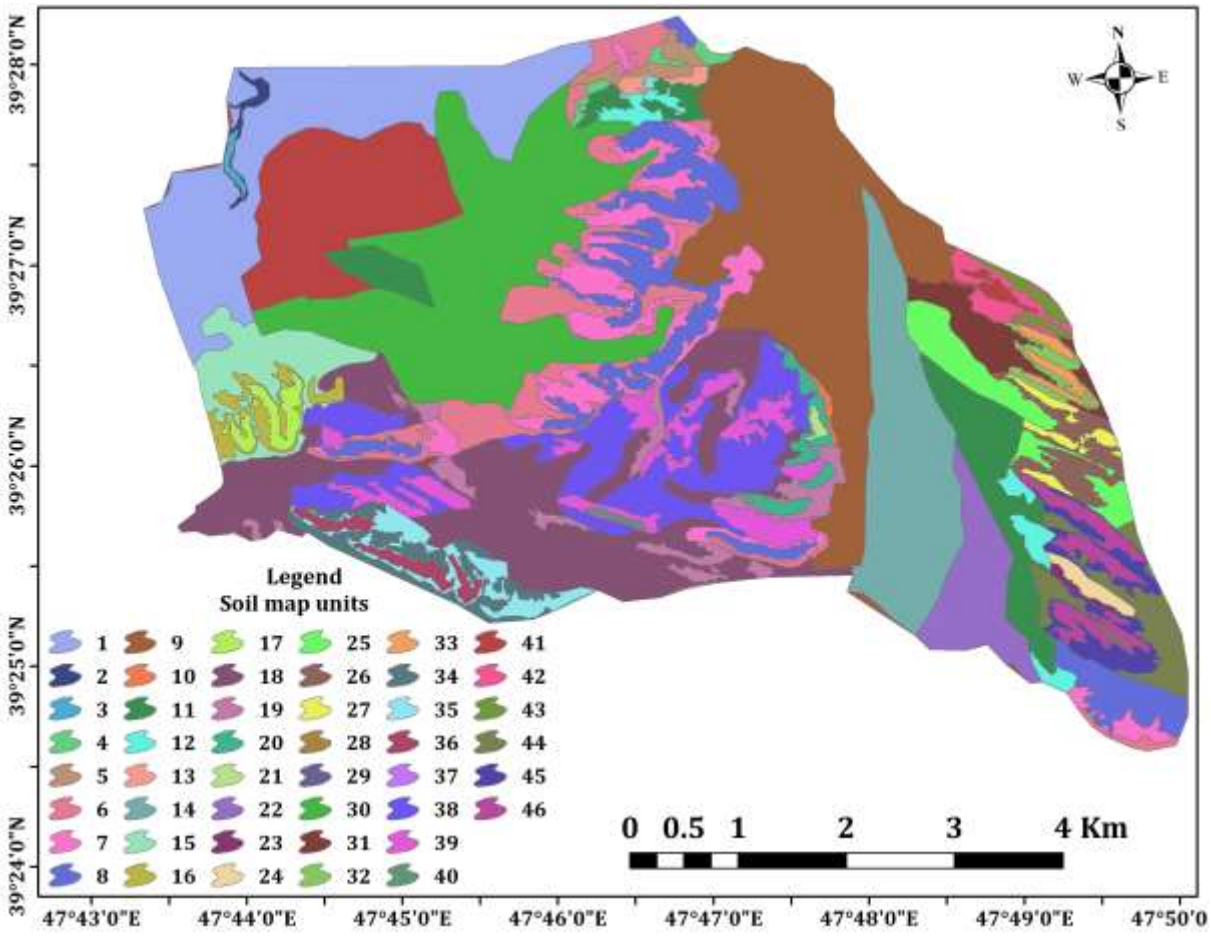
جدول ۱- نیازمندی‌های پستی و بلندی و خاک برای کشت آبیاری تحت فشار بارانی یونجه.

Table 1. Topography and soil requirements for sprinkler irrigation cultivation of alfalfa.

کلاس تناسب/Suitable class	S1		S2	S3	N1	N2
سطح محدودیت /Limitation level	0	1	2	3	4	
درجه‌بندی/Rating scale	100	95	85	60	40	25	0
توپوگرافی/Topography						
شیب (درصد٪)/Slope	2-0	5-2	8-5	16-8	25-16	>25
خیسی / Wet						
سیل‌گیری/ Flooding	F0			F1		F2
زهکشی/ Drainage	خوب	نسبتاً خوب	نسبتاً ضعیف	ضعیف همراه با تهویه	ضعیف ولی قابل زهکشی	غیرقابل زهکشی
خصوصیات فیزیکی خاک Physical soi characteristics/						
بافت؛ساختمان/ Texture;Structure	CL, SiCL, SCL, C<60s	L, Si, SiL, SC, SiC, C>60s,	SL, C>60v	LS, Cm, SiCm	fS, LcS	cS
ذرات درشت‌تر از شن (درصد حجمی)/ Coarse fragment(V%)	3-0	15-3	35-15	55-35	75-55	>75
عمق خاک (سانتی‌متر)/Soil depth(cm)	>100	75-100	50-75	20-50		<20
آهک (درصد٪)/ $CaCO_3$	6-1.2 0-1.2	15-6	22-15	30-22	>55-30	>55
گچ (درصد ٪)/Gypsum	2-0	4-2	10-4	15-10	25-15	>25
AWC(cm per 1.2m of Soil depth)	>15	13-15	11-13	7.5-11	<7.5	
خصوصیات حاصلخیزی خاک/ Soil fertility characteristics						
$pH_{(H_2O)}$	7-7.4 7.8-7.4	6-7 8-7.8	5.5-6 8.2-8	5.2-5.5 8.5-8.2	<5.2 >8.5	
کربن آلی (درصد ٪) /Organic carbon(%)	>0.8	0.4-0.8	<0.4			
فسفر قابل دسترس/ Available phosphrus ($mgkg^{-1}$)	>23	20.5-23	14.5-20.5	9.5-14.5	<9.5	
پتاسیم قابل دسترس/ Available Potassium ($mgkg^{-1}$)	>225	200-225	140-200	90-140	<90	
ACEC($cmol^{(+)}$/kg clay)	>24	16-24	<16(-)	<16(+)		
شوری و قلیائیت/ Salinity and Alkalinity						
EC(dSm^{-1})	2-0	4-2	8-4	12-8	>12	
ESP(%)	7-0	14-7	28-14	42-28	>42	

نتایج و بحث

پس از مشخص شدن مقادیر ویژگی‌های خاک در آزمایشگاه، با لحاظ اطلاعات به دست آمده از مطالعات صحرایی و در نظر گرفتن لایه شیب، ۴۶ واحد نقشه خاک در سطح منطقه تفکیک گردید (شکل ۳). نتایج تجزیه خاک برخی واحدهای خاک در (جدول ۲) ارائه شده است.



شکل ۳- موقعیت واحدهای نقشه خاک.

Figure 3. Location of the soil map units.

جدول ۲- نتایج خصوصیات خاک برخی واحدهای خاک.

Table 2. The soil characteristics results in some of soil map units.

Soil map unit واحد نقشه خاک	Texture بافت	Depth عمق	TNV آهک	Gypsum گچ	EC(%) هدایت الکتریکی	ESP(%) درصد سدیم تبادلی	pH واکنش	Slope(%) شیب	Ava. P فسفر قابل دسترس	Ava. K پتاسیم قابل دسترس	%OC کربن آلی	ACEC ظرفیت تبادل کاتیونی	AWC ظرفیت آب قابل دسترس	Square Root ریشه دوم	ELE. Tri الکتره ترای
1	SiC	150	14.23	3.85	4.36	9.94	7.28	1.46	3.3	307	1.98	50	16.9657	S2	S2
5	C	82	16.9	2.85	8.44	21.19	8.22	10.15	5.88	332	0.65	45.3	13.308	N1	S3
6	SiC	150	12.79	8.15	3.6	5.34	7.84	2.88	4.5	223	1.29	100	12.9288	S3	S2
7	C	150	12.25	6.42	2.99	4.43	7.74	6.32	4.5	223	1.29	100	12.9288	S2	S2
8	SiC	150	15.08	9.11	4.75	7.04	7.77	11.01	4.5	223	1.29	100	12.9288	S3	S3
11	CL	150	16.72	4.78	2.66	3.53	7.81	2.93	16.3	155	1.16	50	13.6398	S2	S2
12	SCL	150	12.5	3.44	3.89	5.16	8.11	6.83	16.3	155	1.16	50	13.6398	S3	S2
13	CL	150	16.72	4.78	2.66	3.53	7.81	10.18	16.3	155	1.16	50	13.6398	S3	S3
14	C	150	6.95	3.77	2.79	10.92	7.81	1.11	2.4	285	1.14	67.35	13.1866	S2	S1
15	C	150	10.95	3.35	4.51	12.3	8.12	3.19	3.1	263	0.84	80.95	14.017	S3	S2
18	SiC	150	10.16	4.12	3.47	9.82	7.87	3.11	5.6	333	1.25	59.57	15.125	S2	S2
19	SiC	150	13.46	3.53	2.33	6.59	7.63	6.09	5.6	333	1.25	59.57	15.125	S2	S2
21	SiC	80	14.8	5.2	4.7	13.6	7.85	19.9	5.6	333	1.25	59.57	15.125	N1	N1
22	CL	150	4.8	3.29	3.5	7.05	7.76	1.4	5.8	223	1.03	66.67	13.2541	S2	S1
25	SiCL	85	12.14	3.75	1.9	2.77	7.36	3.23	4	328	1.64	51.02	12.9295	S2	S1
26	C	70	14.18	1.4	1.49	2.87	7.79	6.3	4	328	1.64	51.02	12.9295	S2	S2
27	SiCL	85	12.14	3.75	1.9	2.77	7.36	9.82	4	328	1.64	51.02	12.9295	S3	S3
31	SiCL	150	12.76	5.94	4.35	10.16	7.58	2.98	2.7	405	0.96	53.49	16.335	S2	S2
38	CL	76	9.73	2.92	2.67	1.61	7.54	3.35	5.52	280	1.25	69.77	12.622	S2	S1
41	SiCL	150	12.82	7.29	1.92	1.44	7.64	2.64	10.7	332	1.68	69.56	19.8588	S2	S2
42	C	150	13.94	5.86	3.02	2.27	7.62	6.2	10.7	332	1.68	69.56	19.8588	S2	S2
46	SiC	60	15.75	1.31	3.07	4.85	7.83	10.94	4.8	320	0.8	70	12.3305	S3	S3

مقادیر خصوصیات خاک در جدول با اعمال ضرایب وزنی در عمق‌های مساوی خاکرخ محاسبه شده است.

The soil characteristics values in the table were calculated by applying weighting factors across equal depth intervals of the soil profile.

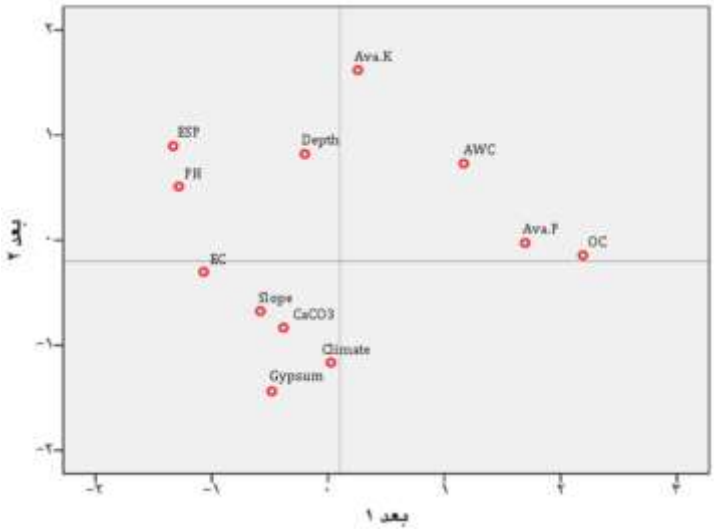
خصوصیات اقلیم بر اساس درجه اقلیم محاسبه و با درجات سایر خصوصیات شامل خاک و توپوگرافی در استخراج شاخص اراضی تلفیق شده است.

Climatic characteristics were calculated based on climate ratings and integrated with ratings of other attributes, including soil and topography, to derive the land index.

مقدار شیب، از لایه توپوگرافی به دست آمده و متوسط شیب در واحد نقشه می‌باشد.

The slope value is derived from the topographic layer and represents the average slope within the map unit.

متغیرهای عمق خاک، کربنات کلسیم، گچ، ظرفیت آب قابل استفاده، واکنش خاک، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی، شیب و اقلیم به عنوان فاکتورهای دارای محدودیت شناسایی شدند. گزینش‌ها از طریق روش‌های سنجش چندبعدی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صورت گرفت. در تحلیل سنجش چندبعدی مبتنی بر فاصله اقلیدسی، ویژگی‌های ظرفیت آب قابل استفاده، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل دسترس به دلیل همپوشانی و تشابه بالا (کمترین فاصله اقلیدسی نسبت به یکدیگر) و تمایز آشکار از سایر متغیرها، از چرخه مدل‌سازی نهایی کنار گذاشته شدند (شکل ۴). از سوی دیگر، نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (جدول ۳) نشان داد که ضرایب بار عاملی برای کربن آلی، فسفر و پتاسیم کمترین مقدار را دارا هستند؛ در حالی که ظرفیت آب قابل استفاده مقدار قابل‌ملاحظه‌ای را نشان داد. با این حال، بررسی‌های تکمیلی و میدانی مشخص کرد که ظرفیت آب قابل استفاده تنها در دو واحد نقشه خاک دارای محدودیت است که این واحدها (واحدهای ۲۳ و ۲۴) هم‌زمان با کمبود شدید ماده آلی نیز مواجه هستند. بنابراین با توجه به وسعت محدود این واحدها، می‌توان با افزودن کودهای دامی و آلی به خاک، محدودیت‌های مربوط به ظرفیت آب قابل استفاده و کمبود کربن آلی را تا حد زیادی برطرف نمود. در خصوص عناصر فسفر و پتاسیم نیز به‌کارگیری کودهای بیولوژیک و حیوانی در واحدهای مواجه با کمبود، راهکار مؤثری برای حل این چالش خواهد بود (شایان ذکر است که کمبود پتاسیم تنها در چند واحد نقشه خاک مشاهده گردید). در نهایت، بر اساس فرآیند غربال‌گری آماری و الزامات محیطی منطقه، هشت فاکتور کلیدی شامل عمق خاک، کربنات کلسیم، گچ، واکنش خاک، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی، شیب و اقلیم برای انجام محاسبات ارزیابی تناسب اراضی انتخاب شدند.



شکل ۴- فاصله اقلیدسی ویژگی‌های مورد مطالعه نسبت به هم.

Figure 4. Euclidean distance of the studied features relative to each other.

جدول ۳- نتایج تجزیه به مؤلفهٔ‌های اصلی برای ویژگی‌های خاک و اراضی.

Table 3. Results of principal component analysis for soil and land characteristics.

Comulaitive واریانس مجموع variance/	Component variance/واریانس مؤلفه	Egen value/مقدار ویژه	Components/مؤلفه‌ها
23.21	23.21	2.76	PC1
36.81	13.60	1.66	PC2
50.07	13.26	1.57	PC3
61.38	11.31	1.38	PC4
70.77	9.39	1.16	PC5

The values of the highest coefficient of each feature for the first to fifth components/مقادیر بیشترین ضریب هر ویژگی برای مؤلفه‌های اول تا پنجم

Ava. K	OC	Ava. P	climate	slope	TNV	depth	pH	gypsum	EC	ESP	AWC
0.356	0.405	0.416	0.458	0.521	0.532	0.646	0.658	0.679	0.795	0.806	0.834

وزن‌دهی معیارها و اجرای مدل‌های ارزیابی

هر یک از ویژگی‌های اراضی اثرات منحصربه‌فردی بر عملکرد و تولید محصول یونجه دارند که این اثرات را می‌توان در قالب فاکتورهای وزنی اعمال کرد. در روش مقایسه زوجی، وزن معیارها به صورت قطعی (کریسپی) محاسبه می‌شود؛ بدین ترتیب که ویژگی‌های واردشده در ارزیابی، از نظر درجه اهمیت نسبی به صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی را تشکیل می‌دهند. این قضاوت‌های کیفی بر اساس مقیاس عددی ۱ تا ۹ کمّی‌سازی می‌شوند (Saaty, 2008). وزن‌دهی ویژگی‌های منتخب برای محصول یونجه با استفاده از روش مقایسه زوجی انجام گرفت (Saaty and Vargas, 2001) که نتایج آن در (جدول ۴) ارائه شده است. اوزان نهایی بر مبنای میزان تأثیر هر ویژگی بر تولید یونجه در منطقه، تجمیع نظرات متخصصین از طریق پرسش‌نامه و با شرط قبول نرخ سازگاری[19] کمتر از ۰/۱ محاسبه شدند. مقادیر اندازه‌گیری‌شده ویژگی‌های خاک در آزمایشگاه برای واحدهای مختلف اراضی، با استفاده از جدول ۱ به امتیاز (درجه) تبدیل شده و با استفاده از روش‌های ارزیابی تناسب اراضی، کلاس‌های تناسب برای تمامی واحدهای نقشه تعیین شد (شکل‌های ۵ و ۶).

جدول ۴– پارامترهای استفاده شده در روش الکتره ترای برای یونجه.

Table 4. Parameters used in the Electra method for alfalfa.

Climate اقلیم	Slope شیب	pH واکنش	ESP درصد سدیم تبادلی	EC هدایت الکتریکی	Gypsum گچ	TNV آهک	Soil depth عمق خاک	ویژگی‌ها / پارامترهای روش
0.021	0.291	0.075	0.061	0.120	0.146	0.035	0.251	*اوزان/Weights
20	5	8	14	4	4	15	75	**پروفیل ۱/Profile1
0.5	0.5	0.005	0.07	0.005	0.015	0.01	7	آستانه بی‌تفاوتی Indifference threshold/
1	1	0.01	0.13	0.01	0.03	0.02	16	آستانه ارجحیت Preference threshold/
-	-	-	0.21	-	-	-	-	آستانه عدم مقبولیت Veto threshold/
15	8	8.2	28	8	10	22	50	پروفیل ۲/Profile2
0.4	0.97	0.01	3.4	0.22	0.11	0.68	6	آستانه بی‌تفاوتی Indifference threshold/
0.8	1.94	0.02	6.81	0.44	0.22	1.36	14	آستانه ارجحیت Preference threshold/
-	-	-	10.2	-	-	-	-	آستانه عدم مقبولیت Veto threshold/
10	16	8.5	42	12	15	30	20	پروفیل ۳/Profile3
0.3	1.7	0.14	10.4	1.78	1.84	4.68	5	آستانه بی‌تفاوتی Indifference threshold/
0.6	3.4	0.28	20.81	3.56	3.67	9.36	12	آستانه ارجحیت Preference threshold/
-	-	-	31.2	-	-	-	-	آستانه عدم مقبولیت Veto threshold/
7	25	8.7	45	16	20	35	15	پروفیل ۴/Profile4
0.25	2.7	0.24	11.9	3.78	4.34	7.18	4	آستانه بی‌تفاوتی Indifference threshold/
0.5	5.5	0.48	23.81	7.56	8.67	14.36	10	آستانه ارجحیت Preference threshold/

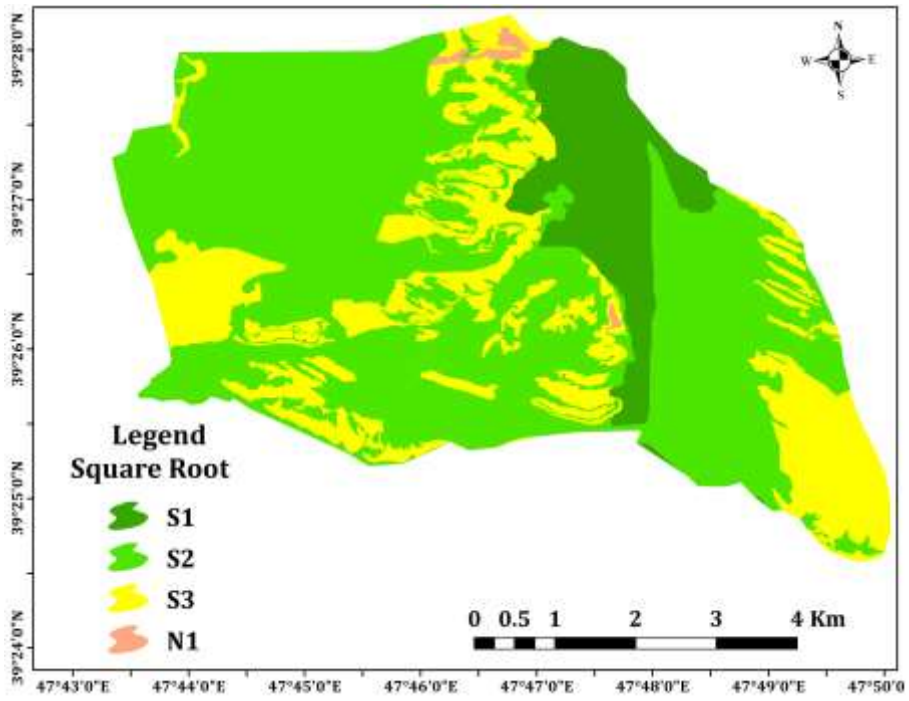
*نرخ سازگاری در محاسبه اوزان ۰/۰۱۷ به دست آمد. **پروفیل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مرز بین کلاس‌های تناسب S1، S2، S3، N1 و N2 هستند. لاندا: ۰/۹۱۷

*The compatibility rate obtained in calculating the weights was 0.017. **Profiles 1, 2, 3 and 4 are the boundaries between the S1, S2, S3, N1 and N2 suitability classes, respectively. Landa: 0.917

نتایج حاصل از ارزیابی تناسب اراضی نشان داد که بر اساس روش ریشه دوم، ۱۱/۶۱ درصد از اراضی در کلاس تناسب خوب (S1)، ۶۳/۴۹ درصد از اراضی در کلاس تناسب متوسط (S2)، ۲۴/۳۶ درصد در کلاس تناسب بحرانی(S3) ، ۰/۵۳ درصد نامناسب حال حاضر (N1) دسته‌بندی شدند. از سوی دیگر، به‌کارگیری مدل چندمعیاره الکتره ترای برای ارزیابی کیفی تناسب اراضی نشان داد که ۲۶/۷۹ درصد از اراضی دارای تناسب خوب (S1)، ۶۰/۷۴ درصد دارای تناسب متوسط(S2) ، ۱۲/۳۸ درصد

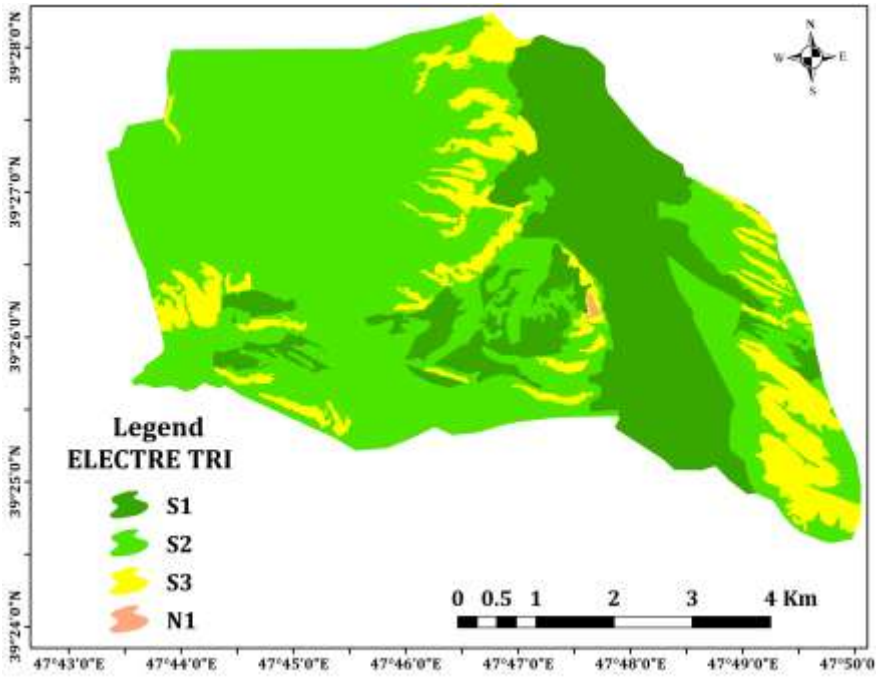
[19]Consistency rate

دارای تناسب بحرانی (S3) و ۰/۰۸ درصد نامناسب حال حاضر (N1)هستند. پایبندی به اصول تناسب اراضی، گامی استوار در جهت دستیابی به عملکرد بالا، حفظ منابع خاک برای نسل‌های آینده و ارتقای توان اکولوژیک خاک به‌شمار می‌رود. در این میان، نقشه‌های تناسب اراضی به عنوان ابزاری کلیدی، امکان پهنه‌بندی دقیق نواحی مستعد و غیرمستعد را برای کشت محصولات استراتژیک در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌سازند. آنچه مسلم است، نتایج حاصل از هر دو روش تفاوت‌های آشکاری را با یکدیگر نشان می‌دهند؛ از این رو، ارزیابی صحت و تعیین دقیق‌ترین رویکرد امری ضروری است. مقایسه نتایج دو روش با واقعیت میدانی در واحدهای تحت کشت یونجه به ویژه بر اساس عملکرد، نشان‌دهنده کارایی بهتر روش الکتره ترای بود.



شکل ۵- نقشه تناسب واحدهای اراضی با روش ریشه دوم برای کشت یونجه.

Figure 5. Land suitability map using the square root method for alfalfa cultivation.



شکل ۶- نقشه تناسب واحدهای اراضی با روش الکتره ترای برای کشت یونجه.
Figure 6. Land suitability map using the ELECTRE TRI method for alfalfa cultivation.

اعتبارسنجی چندمتغیره و تحلیل فاکتورهای محدودکننده

با توجه به اینکه نتایج روش الکتره ترای بیشتر با واقعیت میدانی در واحدهای تحت کشت یونجه به ویژه بر اساس عملکرد تطابق داشت، بنابراین به‌منظور ارزیابی دقت تفکیک کلاس‌های تناسب اراضی در این روش، آزمون تحلیل واریانس چندمتغیره بر روی ویژگی‌های خاک و اراضی اجرا شد. این رویکرد آماری پیش از این نیز جهت ارزیابی خطای تفکیک کلاس‌های حاصلخیزی خاک (Davatgar et al., 2012)، سنجش صحت واحدهای نقشه خاک (Esfandiarpoor Borujeni et al., 2010) و کلاس‌های تناسب اراضی تفکیک شده برای محصولات (Seyedmohammadi et al., 2019; Seyedmohammadi and Navidi, 2025) با موفقیت به‌کار گرفته شده است. نتایج آزمون‌های چندمتغیره هاتلینگ و لامبدای ویلکس به ترتیب با آماره آزمون ۲/۷۹۸ و ۰/۲۱ و درجه آزادی خطای ۱۰۴ و ۱۰۳/۹ نشان داد (جدول ۵) که به دلیل معنی‌داری آزمون‌ها در سطح خطای ۵ درصد ($P<0.05$)، تفکیک کلاس‌های تناسب با دقت و صحت بالایی انجام گرفته است که این امر مؤید وجود اختلاف معنی‌دار میان کلاس‌های تناسب از نظر ویژگی‌های خاک و اراضی است. هر چه مقدار آماره این آزمون‌ها به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده دقت زیاد در تفکیک گروه‌های مورد بررسی است.

مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک و اراضی در میان کلاس‌های تفکیک‌شده به روش الکتره ترای در (جدول ۵) ارائه شده است؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود، متغیر «شیب» کلیدی‌ترین فاکتور متمایزکننده در تمامی کلاس‌ها به‌شمار می‌رود. عدم وجود اختلاف معنی‌دار در مقدار گچ بین کلاس‌های مختلف، به معنای ناچیز بودن این فاکتور در منطقه نیست، بلکه نشان‌دهنده گچی بودن عمده خاک‌های محدوده مطالعاتی است. در این خاک‌ها، افق‌های گچی (با بیش از ۲۵ درصد گچ و ضخامت بیش از ۳۰ سانتی‌متر) حضور دارند که در محاسبات، لایه‌های فوقانی آنها لحاظ شده و بطور مستقیم سبب کاهش عمق مفید خاک شده‌اند. علاوه بر این، خاک‌های گچی منطقه مورد مطالعه عمدتاً با شوری بالا و درصد سدیم تبادلی شدید همراه‌اند؛ به طوری که میانگین فاکتورهای دارای اثر منفی، از کلاس تناسب S1 به سمت N1 به طور معنی‌داری افزایش یافته است (جدول ۶).

شیب، عمق خاک، شوری و درصد سدیم تبادلی، مهم‌ترین ویژگی‌های محدودکننده رشد یونجه در سطح منطقه هستند. بررسی‌ها نشان داد که توپوگرافی و شیب زمین (که در برخی واحدها به حدود ۱۹ درصد می‌رسد)، اصلی‌ترین عامل محدودیت اراضی است. در واحد ۲۱ با وجود عمق مناسب خاک، کلاس تناسب اراضی N1 شده است، عامل اصلی محدودیت مقدار شیب بوده است. ویژگی‌های شیب، عمق محدود، سدیم تبادلی و شوری بالا سبب تقلیل درجه تناسب برای کشت یونجه

در اکثر واحدهای اراضی شده‌اند؛ به‌ویژه در واحدهای ۴ و ۵، مقادیر بحرانی EC و ESP عامل اصلی افت کلاس تناسب بوده‌اند. در واحدهای ۳۰ و ۳۷ تا ۴۰ نیز تجمع مفرط گچ منجر به کاهش عمق مؤثر ریشه‌دوانی و ایجاد محدودیت فیزیکی شده است. اگرچه مقدار کربنات کلسیم در تمامی واحدها قابل‌توجه بود، اما محدودیت شدیدی برای محصول ایجاد نکرد. از نظر وضعیت تغذیه‌ای، کمبود پتاسیم تنها در چند واحد محدود گزارش شد، اما اکثر واحدهای اراضی (به استثنای واحدهای ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۴۱ تا ۴۳) با کمبود شدید فسفر قابل دسترس مواجه هستند که مدیریت بهینه پویایی فسفر و مصرف کودهای فسفاته را الزامی می‌سازد.

در نهایت، تطبیق مقادیر اندازه‌گیری‌شده فاکتورها در واحدهای نقشه خاک با جدول نیازمندی‌های گیاهی (جدول ۱) و بررسی‌های میدانی با توجه به عملکرد یونجه در واحدهای خاک تحت کشت مشخص کرد که مدل الکتره ترای به دلیل ارتقای منطقی کلاس تناسب در برخی واحدها به کلاس با تناسب خوب (S1)، انطباق بسیار بالاتری با واقعیت‌های زمینی نسبت به روش ریشه دوم دارد؛ چرا که این واحدها در واقعیت نیز فاقد محدودیت‌های بازدارنده برای رشد یونجه هستند.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس چندمتغیره بین کلاس‌های تناسب در روش الکتره ترای (α=۰/۰۵).

Table 5. Results of multivariate analysis of variance between suitability classes in the ELECTRE TRI method (α=0.05).

Sig.	df_E	df_H	F	ارزش آماره /Value	آزمون/Test
<0.0001	104	21	7.431	2.798	Hottling Trace
<0.0001	103.923	21	5.489	0.209	Wilks Lambda

جدول ۶- مقایسه میانگین معیارها در کلاس‌های تناسب اراضی روش الکتره ترای با آزمون LSD.

Table 6. Mean comparison of criteria in land suitability classes of the ELECTRE TRI method with the LSD test.

TNV(%)	Gypsum(%)	EC(dS m^{-1})	ESP (%)	pH	depth(cm)	Slope(%)	Class
8.51^{c}	3.41^{b}	2.51^{d}	6.21^{c}	7.51^{b}	129.3^{a}	2.39^{d}	S1
13.05^{b}	4.05^{b}	3.16^{c}	6.89^{c}	7.76^{a}	117.8^{b}	5.68^{c}	S2
13.81^{b}	4.59^{a}	3.41^{b}	8.41^{b}	7.79^{a}	102.4^{c}	10.32^{b}	S3
14.88^{a}	5.15^{a}	4.62^{a}	13.61^{a}	7.85^{a}	80.56^{d}	19.98^{a}	N1

حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است.

Different letters indicate significant differences at the 0.05 level.

نتایج حاصل از تلفیق مدل الکتره ترای و روش مقایسه زوجی برای تعیین وزن معیارها نشان می‌دهد که این رویکرد به دلیل بهره‌گیری از مفاهیم تفکیک فازی و توانایی تجمیع هم‌زمان چندین معیار متضاد، سطح اطمینان و روایی دسته‌بندی ویژگی‌های اراضی را به طور یکپارچه ارتقا می‌دهد. از آنجا که برآورد دقیق پتانسیل و رتبه‌بندی اراضی، پیش‌شرط اصلی تدوین برنامه‌های مدیریتی و پایش اصولی خاک است، افزایش ضریب اطمینان نقشه نهایی، گامی حیاتی در فرآیند ارزیابی به‌شمار می‌رود. علاوه بر این، یکی از مزایای بارز این متدولوژی، کمک به ایجاد اجماع در تصمیم‌گیری و کاهش تعارضات میان دیدگاه‌های بخش کشاورزی و ملاحظات زیست‌محیطی در مرحله امکان‌سنجی طرح‌ها است. ساختار مدل چندمعیاره الکتره ترای پویایی و همخوانی بالایی با فرآیند ارزیابی تناسب اراضی دارد. مقایسه اجمالی خروجی‌های این مدل با روش‌های پارامتریک سنتی مشخص ساخت که در صورت تنظیم دقیق آستانه‌های ارجحیت، بی‌تفاوتی و وتو بر اساس اصول منطق فازی، نقشه‌های نهایی انطباق بسیار بیشتری با واقعیت‌های میدانی منطقه خواهند داشت. انعطاف‌پذیری بالا در اعمال ترجیحات و وزن‌های پیشنهادی از سوی ذی‌نفعان و تصمیم‌گیرندگان مختلف، از دیگر مزایای این روش است که تحقق اهداف ارزیابی را با سرعت و

دقت مناسب ممکن می‌سازد. با این حال، تعدد پارامترهای ورودی و حساسیت مدل به تعیین دقیق آستانه‌ها، اصلی‌ترین چالش کاربرد این روش است که نیازمند دقت بالایی در فاز واسنجی است. یافته‌های این تحقیق با نتایج Mendas and Delali (2012) که برای نخستین بار کارایی این مدل را در ارزیابی تناسب اراضی اثبات کردند، همخوانی کامل دارد. Fontana and Cavalcante (2013)، Mendas و همکاران (2021) و Telles و همکاران (2024) عواملی چون تعیین بهینه حدود انتقالی (پروفیل‌های مرزی)، اعمال آستانه‌های واقع‌بینانه، استفاده از منطق فازی در فرآیندهای محاسباتی و تلفیق خروجی‌ها در محیط GIS را دلایل اصلی برتری و دقت بالاتر مدل الکتره ترای نسبت به روش‌های کلاسیک دانسته‌اند. با توجه به توانایی اثبات‌شده روش الکتره ترای در رتبه‌بندی دقیق کلاس‌های تناسب اراضی، پیشنهاد می‌شود این رویکرد به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره استاندارد در پروژه‌های ارزیابی اراضی کشور مورد استفاده قرار گیرد تا نقاط قوت و ضعف آن در کاربری‌های مختلف به مرور آشکار شود. همچنین با هدف به‌روزرسانی سیستم‌های بومی ارزیابی اراضی، توصیه می‌گردد پتانسیل سنجی سایر مدل‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره و امکان‌سنجی کاربرد آن‌ها متناسب با شرایط خاک‌اقلیمی ایران، توسط متخصصان و مراجع ذی‌ربط به طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر نشان داد که مدل چندمعیاره الکتره ترای به‌دلیل بهره‌گیری از اصول منطق فازی و تبیین مناسب حدود انتقالی، دقت و کارایی به‌مراتب بالاتری نسبت به روش پارامتریک ریشه دوم در ارزیابی تناسب اراضی دشت مغان برای کشت یونجه دارد و نقشه‌های خروجی آن انطباق بیشتری با واقعیت میدانی و عملکرد محصول نشان می‌دهند. بر اساس نتایج، متغیرهای شیب، عمق محدود خاک (ناشی از افق‌های گچی)، شوری و درصد سدیم تبادلی اصلی‌ترین فاکتورهای محدودکننده رشد گیاه در منطقه هستند. از منظر کاربردی، دستاوردهای این پهنه‌بندی ابزار تصمیم‌گیری کارآمدی را در اختیار برنامه‌ریزان منطقه مورد مطالعه جهت اعمال مدیریت هوشمند و لکه‌ای نهاده‌ها از جمله اصلاح موضعی خاک‌های شور–سدیمی و پایش پویایی فسفر قرار می‌دهد و با تفکیک اراضی نامناسب، مانع از هدررفت سرمایه‌گذاری در توسعه سامانه‌های آبیاری بارانی در اراضی حساس می‌شود. در همین راستا، به بهره‌برداران و کارشناسان اجرایی منطقه پیشنهاد می‌شود که در واحدهای مواجه با محدودیت، اقدامات اصلاحی نظیر افزودن کودهای دامی و آلی برای بهبود فیزیکی خاک، مصرف بهینه کودهای فسفاته و استفاده از کودهای بیولوژیک را در اولویت قرار دهند. در نهایت، با توجه به ضریب اطمینان بالای مدل الکتره ترای، به‌کارگیری این رویکرد در پروژه‌های ارزیابی اراضی کشور پیشنهاد می‌شود؛ همگام با آن، واکاوی پتانسیل سایر مدل‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره، سنجش پویایی مرزهای تناسب تحت سناریوهای تغییر اقلیم و تلفیق این متدولوژی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی پتانسیل تولید در مقیاس‌های کلان، از مهم‌ترین ضرورت‌های پژوهشی برای مطالعات آتی به‌شمار می‌روند.

تشکر و قدردانی

مقاله از داده‌های پروژه "تعیین تناسب اراضی برای گروه‌های محصولات زراعی و باغی در دشت‌های آبی کشور به منظور تدوین الگوی کشت ملی" با کد مصوب ۰۲۰۹۹۳–۰۱۰۵۵–۰۴۱–۳۰۳۰–۱۰–۰۱۳۴ اجرا شده در مؤسسه تحقیقات خاک و آب استخراج شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می گردد.

References

1. AbdelRahman, M.A.E., Yossif, T.M.H. and Metwaly, M.M., 2025. Enhancing land suitability assessment through integration of AHP and GIS-based for efficient agricultural planning in arid regions. *Scientific Reports, 15*, 31370. https://doi.org/10.1038/s41598-025-14051-7.
2. Akinci, H., Ozalp, A.Y. and Turgut, B., 2013. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture, 97*, pp.71-82. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.07.006
3. Akram, M., Batool, I. and Kahraman, C., 2026. An explainable hybrid fuzzy-machine learning framework for multi-crop suitability classification using agro-environmental data. *Knowledge-Based Systems, 333*, 115008. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.115008
4. Alemayehu, S., Ayana, E.K., Dile, Y.T., Demissie, T., Yimam, Y., Girvetz, E., Aynekulu, E., Solomon, D. and Worqlul, A.W., 2020. Evaluating Land Suitability and Potential Climate Change Impacts on Alfalfa (Medicago sativa) Production in Ethiopia. *Atmosphere, 11(10)*, 1124. https://doi.org/10.3390/atmos11101124
5. Bilal, H., Lahlou, F.Z. and Al-Ansari, T., 2025. Land suitability assessment and self-sufficiency evaluation for fodder crop production in a hyper arid environment coupling GIS-based multi-criteria decision making and optimization. *Ecological Modelling, 501*, 111021. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111021.
6. Dasheng, W., Xue, F. and QingQing, W., 2011. The research of evaluation for growth suitability of Carya Cathayensis Sarg. based on PCA and AHP. *Procedia Engineering, 15*, pp.1879-1883. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.350
7. Davatgar, N., Neishabouri, M.R. and Sepaskhah, A.R., 2012. Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. *Geoderma, 173-174*, pp.111-118. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.005
8. Ersado, A.E. and Talluri, V.K., 2026. GIS-based land suitability evaluation and multi-criteria decision analysis for sustainable enset (Ensete ventricosum (Welw.) Cheesman) cultivation in Hadiya Zone, Central Ethiopia. *PLoS One, 21(3)*, e0344127. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0344127.
9. Esfandiarpoor Borujeni, I., Mohammadi, J., Salehi, M.H., Toomanian, N. and Poch, R.M., 2010. Assessing geopedological soil mapping approach by statistical and geostatistical methods: A case study in the Borujen region, Central Iran. *Catena, 82*, pp.1-14. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.03.006
10. FAO., 1979. Soil Survey Investigations for Irrigation. FAO Soils Bulletin No. 42. FAO, Rome. 188p.
11. FAO., 2006. Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements), FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, 333p.
12. FAO., 2012a. Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, 519p.
13. FAO., 2012b. Global Agroecological Zones, Version 3, IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 196p.
14. Fontana, M.E. and Cavalcante, C.A.V., 2013. ELECTRE TRI method used to storage location assignment into categories. *Pesquisa Operacional, 33(2)*, pp.283-303. https://doi.org/10.1590/S0101-74382013000200009
15. Ghorbani, M. (2013). *The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources*. Springer Science and Business Media. 572p. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5625-0
16. Kazemi, H., Sadeghi, S. and Akinci, H., 2016. Developing a land evaluation model for faba bean cultivation using geographic information system and multi-criteria analysis (A case study: Gonbad-Kavous region, Iran). *Ecological Indicators, 63*, pp.37-47. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.021
17. Mendas, A. and Delali, A., 2012. Integration of multicriteria decision analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. *Computers and Electronics in Agriculture, 83*, pp.117-126. https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.003

18. Mendas, A., Mebrek, A. and Mekranfar, Z., 2021. Comparison between two multicriteria methods for assessing land suitability for agriculture: application in the area of Mleta in western part of Algeria. *Environment Development Sustainability, 23,* pp.9076-9089. https://doi.org/10.1007/s10668-020-01012-5
19. Mousseau, V., 2003. *Implementation of ELECTRE Methods: ELECTRE Software*, Course of DESS Decision Computer, LAMSADE, University of Paris Dauphine. 28pp.
20. Nguyen, T.T., Verdoodt, A., Tran, V.Y., Delbecque, N., Tran, T.C. and Van Ranst, E., 2015. Design of a GIS and multi-criteria based land evaluation procedure for sustainable land-use planning at the regional level. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 200,* pp.1-11. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.015
21. Saaty, T.H. and Vargas, L.G., 2001. *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Kluwer Academic, 160p.
22. Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. International *Journal of Services Sciences, 1,* 83-98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590
23. Seyedmohammadi, J. and Navidi, M.N., 2022. Applying fuzzy inference system and analytic network process based on GIS to determine land suitability potential for agricultural. *Environmental Monitoring and Assessment, 194,* 712. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10327-x
24. Seyedmohammadi, J. and Navidi, M.N., 2025. Identifying Land Limitations Based on Assessing Their Suitability for Oilseed Plants Cultivation in the Country's Irrigated Plains. *Journal of Soil Research, 39(1),* pp.19-51. (In Persian with English abstract)
25. Seyedmohammadi, J., Sarmadian, F., Jafarzadeh, A.A. and McDowell, R.W., 2019. Development of a model using matter element, AHP and GIS techniques to assess the suitability of land for agriculture. *Geoderma, 352,* pp.80-95. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.046.
26. Sobhani, B., 2023. Feasibility of Suitable Areas for Alfalfa Cultivation with AHP, FAHP, ANP and WLC Methods in GIS Environment (Case study: Ardabil Province). *Water and Soil Science, 33(4),* pp.71-84. (In Persian with English abstract)
27. Soil Survey Staff., 2022a. *Kellogg Soil Survey Laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 6. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
28. Soil Survey Staff., 2022b. *Keys to Soil Taxonomy*. 13th edition, United States Department of Agriculture, National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service.
29. Soil Survey Staff., 2024. *Field book for describing and sampling soils*. version 4.0. USDA, Natural Resources Conservation Service. U.S. Government Printing Office.
30. Sys, C., Van Ranst, E. and Debaveye, J., 1991. *Land Evaluation. Part I: Principles in land evaluation and crop production calculations*. Agricultural Publications, No 7. General Administration for Development Cooperation, Brussels, Belgium.
31. Sys, C., Van Ranst, E. and Debaveye, J., 1993. *Land evaluation. Part 3: Crop requirements*. Agricultural publications 7,3. General Administration of Development Cooperation of Belgium, Brussels. 199p.
32. Telles, L.B., Macedo, L.M. and Bittencourt, J.V.M., 2024. ELECTRE-TRI Multicriteria Approach for Measuring Performance of Rural Co-Operatives in Southwest Paraná, Brazil. *Economies, 12,* 233. https://doi.org/10.3390/economies12090233
33. Wang, J., 2012. *Geometric Structure of High-Dimensional Data and Dimensionality Reduction*. Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
34. Zolekar, R.B. and Bhagat, V.S., 2015. Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote sensing and GIS approach. Computers and Electronics in Agriculture, 118, pp.300-321. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.016