



Identification of Nutritional Disorders of Olive (*Olea europaea* L.) in Super High-Density Systems Using Multivariate Statistical Methods

Mahrokh Sharifmand^{✉1} | Mehdi Taheri² | Ebrahim Sepehr³

1. Corresponding Author; Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail:

m.sharifmand@urmia.ac.ir

2. Research Department, Zanjan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zanjan, Iran. E-mail: taheritekab@yahoo.com

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: e.sepehr@urmia.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 15, 2026

Revised: June. 9, 2026

Accepted: June. 14, 2026

Published online: July. 2026

Keywords:

*Cluster Analysis,
Nutrition Management,
Olive,
Principal Component Analysis,
Super High-Density Systems.*

ABSTRACT

Considering the climatic and soil characteristics of the Tarem region, sustainable olive production in its super-high-density systems requires precise nutrient management and the identification of nutritional disorders in trees. The utilization of multivariate statistical methods to determine the nutritional status of olive trees and identify factors causing disorders enables the analysis of nutritional patterns, optimization of fertilizer use, and enhancement of production sustainability. In this study, 50 leaf samples were collected from super-high-density olive orchards in the Tarem region of Qazvin province in July 2025. The concentrations of nutrients (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, and B) were measured, and the data were processed using statistical algorithms. Principal Component Analysis (PCA) was first used to reduce data dimensionality and identify variables contributing most to total variance. Subsequently, nutrients were clustered based on nutritional similarities using cluster analysis. The results indicated that four principal components of PCA explained 66.26% of the total data variance, and cluster analysis (K-mean) divided the samples into five distinct clusters. The overlap between cluster analysis and PCA results revealed that nutritional disorders and yield reduction in the Tarem region are primarily caused by deficiencies of nutrients, including phosphorus and micronutrients, resulting from salinity, soil calcareous conditions, alkaline pH, and low organic matter. Employing a combined analytical approach significantly increases the accuracy of identifying nutritional disorders in super-high-density olive systems. Identifying the nutritional clusters enables a transition from uniform management to variable and optimized fertilization strategies in super-high-density systems. This strategy in the Tarem region not only leads to increased yield and production sustainability but also prevents environmental damage by optimizing fertilizer usage patterns.

Cite this article: Sharifmand, M., Taheri, M., Sepehr, E., (2026) Identification of Nutritional Disorders of Olive (*Olea europaea* L.) in Super High-Density Systems Using Multivariate Statistical Methods, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (5), 1021-1037. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414485.670140>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414485.670140>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Tarom region, endowed with unique climatic and soil characteristics, holds significant potential for olive cultivation. However, the advent of modern agricultural systems, particularly Super-High-Density (SHD) planting, has introduced novel challenges in achieving sustainable crop management, especially for olives. In SHD systems, the high density of trees and intense competition for resources—namely water, light, and nutrients—necessitate a highly precise approach to nutrient management. Insufficient attention to the nutritional requirements of trees and the delayed identification of nutritional disorders can lead to reduced yields, impaired product quality, and ultimately, compromised production sustainability in these potentially high-yielding systems. This research endeavors to employ advanced statistical methodologies to identify the primary factors responsible for nutritional disturbances and to ascertain the precise nutritional status of olive trees, thereby paving the way for optimized fertilizer use and enhanced production sustainability. The overarching goal of this study was to identify the key factors contributing to nutritional disorders in olive trees cultivated under SHD systems in the Tarom region of Qazvin Province, and to determine their nutritional status using a multivariate statistical approach.

Methods

This field-based research was conducted in the Tarom region of Qazvin Province, a prominent olive-producing area in Iran. Sampling was performed in olive orchards managed under SHD systems. Leaf samples were collected from olive trees across 50 selected orchards. Collected samples were transported to the laboratory, where the concentrations of nutrients (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, and B) were measured using standard chemical analysis methods. Additionally, data pertaining to crop yield were gathered for each orchard. The data obtained from leaf analysis and yield information were subjected to multivariate statistical analyses. Initially, Principal Component Analysis (PCA) was employed. PCA facilitates the identification of variables contributing most to overall data variability and reveals hidden interrelationships among them. Following dimensionality reduction and the identification of principal components, Cluster Analysis was utilized. The objective of this analysis was to identify distinct groups of orchards exhibiting similar nutritional profiles, thereby aiding in a better understanding of the variability in nutritional status across the region and pinpointing orchards facing specific nutritional challenges.

Results

The results from the Principal Component Analysis (PCA) revealed that four principal components were sufficient to explain 66.26% of the total variance observed in the nutrient concentration data. The first principal component, which exhibited the highest factor loading, demonstrated a strong association between the concentrations of Nitrogen (N) and Manganese (Mn). This correlation may reflect simultaneous uptake or a degree of metabolic interdependence between these two nutrients. The substantial loading of this component in certain observations highlights the prominent role of N and Mn in determining the overall nutritional status. The second principal component revealed a significant correlation between crop yield and the concentration of Phosphorus (P). Iron (Fe) and zinc (Zn) primarily influence the third and fourth components, respectively, showing positive factor loadings that align directly with yield. These findings suggest a direct relationship between leaf P and micronutrients levels and olive yield in these SHD systems, indicating that P and Zn deficiencies could be key factors limiting productivity. Cluster analysis divided the studied orchards into five distinct clusters, each characterized by a unique nutritional profile and yield status:

Cluster 1: This cluster comprised orchards exhibiting low yields and poor nutritional status. The primary contributing factor identified was high concentrations of Sodium (Na) and high soil salinity, which likely impaired the uptake of other essential nutrients and potentially induced phytotoxicity.

Clusters 2 and 3: These clusters presented moderate yields but displayed differing nutrient-element patterns, suggesting that nutrient dynamics are complex and influenced by various factors even at intermediate yield levels.

Cluster 4: Orchards in this cluster showed signs of deficiency in critical elements such as Phosphorus (P), Potassium (K), Zinc (Zn), and Copper (Cu). These deficiencies could potentially lead to reduced yield and quality in the future if unaddressed.

Cluster 5: This cluster consisted of orchards demonstrating optimal yields and more balanced nutrient concentrations in their leaf tissues, representing well-managed and nutritionally sound plots.

Conclusion

A comparative analysis of the PCA and Cluster Analysis results revealed a notable overlap. A key finding of this study is the critical role of phosphorus and micronutrients, alongside effective management of soil

salinity and pH, in achieving optimal olive yields in the Tarom region. The deficiencies identified, rooted in the region's specific edaphic conditions, have a direct and significant impact on yield and production sustainability. In conclusion, this study highlights the imperative of integrating scientific knowledge (such as multivariate statistics) with practical regional understanding (soil and plant needs) to achieve precise and sustainable agriculture. Accurate identification and remediation of nutritional disorders through targeted management strategies represent a fundamental step towards elevating the Tarom region's standing as a key center for high-quality, sustainable olive production.

Funding

The study was funded by Iran National Science Foundation (INSF) under project No 4044109.

Author Contributions

"Conceptualization, M.S. and M.T.; methodology, E.S. and M.T.; software, E.S.; validation, M.T., and E.S.; investigation, M.S.; resources, E.S.; data curation, M.T.; writing—original draft preparation, M.S.; writing—review and editing, M.S.; supervision, E.S.; project administration, M.T. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

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

There is no use of any type of artificial intelligence-based technology in this paper.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors thank the Agricultural Research, Education, and Extension Organization, and Tat Sabz Qazvin Company for their participation in the present research.

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

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

شناسایی اختلالات تغذیه‌ای زیتون (*Olea europaea* L.) در سیستم‌های فوق‌متراکم با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره

ماهرخ شریف‌مند^۱ | مهدی طاهری^۲ | ابراهیم سپهر^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.sharifmand@urmia.ac.ir

۲. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران. رایانامه: taheritekab@yahoo.com

۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: e.sepehr@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و خاک‌شناختی منطقه طارم، تولید پایدار زیتون در سیستم‌های فوق‌متراکم این منطقه، مستلزم مدیریت دقیق عناصر غذایی و شناسایی اختلالات تغذیه‌ای درختان است. استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره جهت تعیین وضعیت تغذیه‌ای درختان زیتون و شناسایی عوامل اختلال، امکان تحلیل الگوهای تغذیه‌ای، بهینه‌سازی مصرف کود و ارتقاء پایداری تولید را فراهم می‌سازد. در این مطالعه، ۵۰ نمونه برگ از باغ‌های زیتون فوق‌متراکم در منطقه طارم استان قزوین، در تیرماه ۱۴۰۴ جمع‌آوری گردید. غلظت عناصر غذایی (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, B) اندازه‌گیری و داده‌های حاصل وارد الگوریتم‌های آماری شدند. ابتدا از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) جهت کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی متغیرهایی که بیشترین سهم را در واریانس کل دارند، استفاده شد. سپس، با استفاده از تحلیل خوشه‌ای عناصر غذایی بر اساس شباهت‌های تغذیه‌ای خوشه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که چهار مؤلفه اصلی PCA، ۶۶/۲۶ درصد از کل واریانس داده‌ها را تبیین کردند و بر اساس تحلیل خوشه‌ای (K-mean)، نمونه‌ها به ۵ خوشه مجزا تقسیم شدند. همپوشانی تحلیل خوشه‌ای با نتایج PCA نشان داد که اختلالات تغذیه‌ای و کاهش عملکرد در منطقه طارم ناشی از کمبود عناصر غذایی از جمله فسفر و عناصر ریزمغذی در اثر شوری، شرایط آهکی، pH قلیایی و ماده آلی پایین خاک است. استفاده از رویکرد ترکیبی، دقت شناسایی اختلالات تغذیه‌ای را در سیستم‌های فوق‌متراکم به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. شناسایی خوشه‌های تغذیه‌ای، امکان گذار از مدیریت یکسان به استراتژی‌های کوددهی متغیر و بهینه را در سیستم‌های فوق‌متراکم فراهم می‌آورد. این استراتژی در منطقه طارم، نه تنها منجر به افزایش عملکرد و پایداری تولید می‌گردد، بلکه با اصلاح الگوهای مصرف کود، از آسیب‌های زیست‌محیطی پیشگیری می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۲۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۱۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲۴	
تاریخ انتشار: مرداد ۱۴۰۵	
واژه‌های کلیدی:	
تحلیل مؤلفه‌های اصلی،	
تحلیل خوشه‌ای،	
زیتون،	
سیستم‌های فوق‌متراکم،	
مدیریت تغذیه‌ای	

استناد: شریف‌مند؛ ماهرخ؛ طاهری؛ مهدی؛ سپهر؛ ابراهیم، (۱۴۰۵) شناسایی اختلالات تغذیه‌ای زیتون (*Olea europaea* L.) در سیستم‌های فوق‌متراکم با استفاده

از روش‌های آماری چندمتغیره، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۵)، ۱۰۳۷-۱۰۲۱ <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414485.670140>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414485.670140>

مقدمه

زیتون (*Olea europaea* L.) از مهم‌ترین محصولات کشاورزی در سطح جهان به شمار می‌آید و از نظر کشاورزی و اقتصادی، به‌ویژه در مناطق با اقلیم مدیترانه‌ای نقش دارد (Proietti et al. 2014). علاوه بر اهمیت اقتصادی، باغ‌های زیتون به دلیل ویژگی‌های اکولوژیک و زراعی خود، در پویایی‌های اقلیمی جهانی نقش حیاتی دارند. زیتون‌ها به‌عنوان گیاهان چندساله با سامانه‌های ریشه‌ای گسترده، در تثبیت و ذخیره‌سازی کربن خاک نقش دارند و کربن را به‌طور مؤثر هم در زیست‌توده و هم در خاک، طی دوره‌های طولانی ذخیره می‌کنند. این فرایند طبیعی به کاهش تغییرات اقلیمی کمک می‌کند؛ زیرا با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، نقش کاهنده‌ای در آن دارد (Pardo et al. 2017). بنابراین، به‌کارگیری راهبردهای مدیریتی نوآورانه در کشت زیتون، رویکردی امیدوارکننده برای افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و همچنین ترویج شیوه‌های کشاورزی پایدار است.

کشاورزی دقیق (یک راهبرد مدیریتی است که داده‌ها را پردازش و تحلیل می‌کند و آنها را با سایر اطلاعات ترکیب می‌نماید تا بر اساس برآورد میزان تغییرپذیری، تصمیم‌های مدیریتی را برای بهبود کارایی مصرف منابع، افزایش بهره‌وری، ارتقای کیفیت، سودآوری و پایداری تولیدات کشاورزی پشتیبانی کند (انجمن بین‌المللی کشاورزی دقیق، ۲۰۲۳). کشاورزی دقیق در چارچوب استفاده از فناوری‌های در حال توسعه برای کل فرایند تولید کشاورزی، مجموعه‌ای از شیوه‌های کشاورزی است که با هدف مصرف ورودی‌ها با هزینه پایین، در سطح متغیر و حداکثر درآمد اجرا می‌شود، در حالی که اصول حفاظت از محیط‌زیست نیز مدنظر قرار می‌گیرد. تکنیک‌های کشاورزی دقیق را می‌توان تقریباً در همه مراحل تولید محصول، از خاک‌ورزی تا برداشت، به کار گرفت. در عمل، این تکنیک‌ها برای تحلیل خاک، کاشت‌ورزی و آماده‌سازی خاک، بذرکاری، کوددهی، سم‌پاشی، پایش شرایط محصول و همچنین برداشت مؤثرتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Vatandas et al. 2005).

پیشینه پژوهش

در پژوهش‌های کشاورزی، ابزارهای ریاضی برای طراحی آزمایش‌ها، پیش‌بینی عملکرد، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها، مدل‌سازی گسترش بیماری‌ها، تحلیل ناهمگنی مکانی و پیش‌بینی اثرات بلندمدت در سناریوهای تغییر اقلیم ضروری هستند (Thornley and Johnson 1990). افزایش دسترسی به داده‌ها و توان محاسباتی این امکان را فراهم کرده تا این تکنیک‌های ریاضی را با اثربخشی بیشتری به کار گیرند (Parwaliya et al. 2025). از این رو بسیاری از محققان از روش آماری برای تفسیر نتایج برگ استفاده کردند (شریف‌مند و همکاران، ۱۳۹۹؛ طاهری و همکاران، ۱۳۹۹). در مطالعه دیگری، عبوده و همکاران (۱۴۰۴) گزارش کردند که می‌توان با استفاده از آنالیز همبستگی جهت اصلاح ژنوتیپ‌های کلزا بهره برد. همچنین گروه‌بندی مقادیر پتاسیم خاک به روش تجزیه واریانس دو گروه و سه گروه کیت-نلسون می‌تواند معیار دقیقی برای تفسیر نتایج اندازه‌گیری و مصرف کود پتاسیم در خاک‌های آهکی تحت کشت ذرت باشد (براتی زانیانی و همکاران، ۱۴۰۴). بنابراین روش‌های آماری می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی مزرعه و بهینه‌سازی کشاورزی استفاده شوند.

برگ‌ها مهم‌ترین اندام فتوسنتزی گیاه (Taiz et al. 2015) و عناصر غذایی موجود در برگ‌ها شاخص مهمی از وضعیت تغذیه‌ای گیاه و سلامت خاک هستند (Marschner, 2012). در تغذیه گیاهی تحلیل خوشه‌ای^۲ برای بررسی الگوهای تغذیه‌ای برگ بسیار مفید است (Facelli et al. 2010). تحلیل خوشه‌ای این امکان را فراهم می‌کند که گیاهان بر اساس الگوی تجمع عناصر غذایی برگ در گروه‌های همگن قرار گیرند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نیز یک روش آماری جهت کاهش بعد داده‌ها و تبدیل داده به چند مؤلفه کم‌بعد ولی با اطلاعات بیشتر است که از آن برای درک ساختار تغذیه‌ای (گروه‌ها، تغییرات اصلی، روندها) و فهم متغیرها، اینکه کدام ویژگی‌ها بیشترین اثر را روی تغییرات دارند، استفاده می‌شود (Ding et al. 2017).

امروزه افزایش تولید جهانی زیتون از طریق ایجاد باغ‌های فوق‌متراکم (SHD) زیتون امکان‌پذیر است. این باغ‌ها ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، بازده محصول را بهبود می‌بخشند. کشت‌های فوق‌متراکم زیتون به دلیل چگالی بالای درختان و تداخل ریشه‌ها، مدیریت

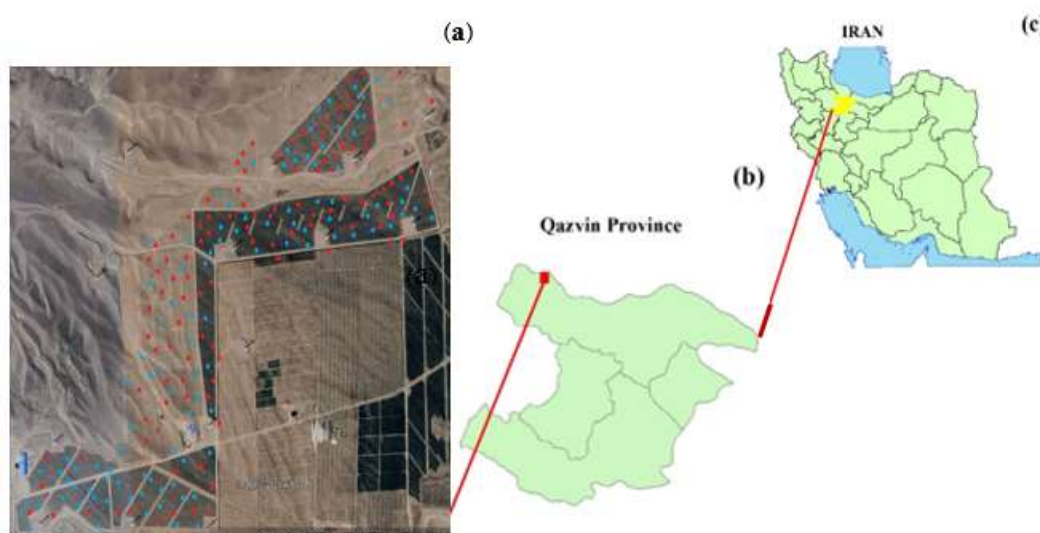
تغذیه را به یکی از چالش‌های حیاتی در کشاورزی پایدار تبدیل کرده‌اند (واحدی و همکاران، ۱۴۰۱). در این نوع کشت، هرگونه عدم تعادل در تأمین عناصر غذایی می‌تواند به سرعت منجر به کاهش عملکرد و تضعیف سلامت درختان شود. Galván et al. (2021) در جنوب غربی اسپانیا، تولید انجیر خشک را در دو نوع سیستم کشت سنتی و فوق‌متراکم مقایسه و گزارش کردند که میزان تولید و کیفیت میوه در سیستم‌های فوق‌متراکم بیشتر از سیستم سنتی بود. Kumar et al. (2025) بر نقش این سیستم‌ها به عنوان یک محرک کلیدی برای افزایش بهره‌وری، کیفیت و سودآوری در کشت میوه و کشاورزی پایدار تأکید می‌کنند. منطقه طارم به دلیل ویژگی‌های خاص اقلیمی و خاک‌شناختی، پتانسیل بالایی برای تولید زیتون دارد، اما مدیریت این منطقه دارای چالش تغذیه‌ای است. اگرچه روش‌های تک‌متغیره به بررسی عناصر می‌پردازند، اما قادر به درک روابط متقابل و پیچیده میان عناصر غذایی و شناسایی الگوهای پنهان نیستند؛ بنابراین، استفاده از ابزارهای آماری چندمتغیره برای درک وضعیت تغذیه‌ای ضرورت دارد.

هدف از این پژوهش، خوشه‌بندی و تعیین الگوی بهینه تغذیه‌ای زیتون در سیستم SHD منطقه طارم با استفاده از تحلیل چندمتغیره جهت ارتقاء پایداری تولید است. در این راستا، این تحقیق با تلفیق روش‌های آماری، PCA و تحلیل خوشه‌ای، به شناسایی دقیق عناصر محدودکننده عملکرد و اختلالات تغذیه‌ای، تعیین روابط همبستگی میان عناصر غذایی و استخراج مؤلفه‌های اصلی اثرگذار بر عملکرد می‌پردازد؛ در نهایت، راهکارهای مصرف بهینه کود را در راستای کشاورزی پایدار ارائه می‌دهد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

باغ‌های SHD زیتون مورد بررسی در این مطالعه در منطقه طارم استان قزوین در شمال غربی ایران واقع شده‌اند که در نزدیکی ۳۶ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی واقع شده‌اند (شکل ۱). این باغ شامل چندین بلوک کاشت جداگانه است که درختان زیتون به فاصله $4/0 \times 1/8$ متر از هم قرار دارند. آب و هوای منطقه منعکس‌کننده ویژگی‌های یک رژیم مدیترانه‌ای با میانگین دمای سالانه حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد و تقریباً ۴۵۰ میلی‌متر بارندگی است که بیشتر آن در ماه‌های سرد سال رخ می‌دهد (رضانی اعتدالی و کوهی، ۱۴۰۴). شیوه‌های مدیریتی در باغ شامل هرس، خاک‌ورزی سطحی و استفاده از آبیاری قطره‌ای تنظیم شده که شاخه‌های هرس شده برای افزایش ورودی مواد آلی و حفظ کیفیت خاک خرد می‌شوند.



شکل ۱. موقعیت منطقه طارم (a)، استان قزوین (b)، و ایران (c)

نمونه‌برداری از خاک، برگ و آنالیز آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از باغات زیتون SHD منطقه طارم برای تعیین خواص فیزیکوشیمیایی به آزمایشگاه منتقل شدند. تجزیه و تحلیل خاک شامل اندازه‌گیری ماده آلی خاک (OM)، pH، هدایت الکتریکی (EC)، بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن)، نسبت جذب

سدیم (SAR)، کربنات کلسیم (CCE) و گچ (CaSO_4) با استفاده از روش‌های استاندارد انجام شد.

نمونه‌برداری از برگ نیز در تیرماه سال ۱۴۰۴ برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغ‌های زیتون (*Olea europaea* L.) در سیستم SHD انجام شد. برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته و سالم از بخش میانی شاخه‌های فصل جاری جمع‌آوری شد که به طور گسترده‌ای قابل اطمینان‌ترین بافت برای ارزیابی وضعیت تغذیه درختان زیتون محسوب می‌شوند. برای هر درخت، یک نمونه مرکب شامل ۲۰ برگ جمع‌آوری شد تا وضعیت تغذیه آن درخت به طور دقیق نشان داده شود. سپس نمونه‌های برگ به آزمایشگاه منتقل شدند، پس از شست‌وشو با آب دیونیزه و خشک کردن در آون (دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت)، آنالیز شیمیایی عناصر غذایی شامل نیتروژن (N) با روش کجلدال، فسفر (P) با دستگاه اسپکتروفتومتر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم (K, Ca, Mg, Na) با دستگاه فلیم‌فتومتر و ریزمغذی‌ها (Fe, Zn, Mn, Cu) از طریق دستگاه جذب اتمی (AAS) انجام گرفت (امامی، ۱۳۷۵).

تحلیل مؤلفه‌های اصلی

برای ارزیابی تأثیر عناصر غذایی مختلف بر عملکرد از روش PCA استفاده شد. بدین منظور، مناسب بودن مجموعه داده برای تجزیه و تحلیل چندمتغیره با استفاده از اندازه‌گیری Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) و آزمون کرویت بارتلت ارزیابی شد. آمار KMO برای تعیین درجه همبستگی بین متغیرها محاسبه شد و طبق نظر Kaiser (۱۹۷۴)، PCA زمانی مناسب در نظر گرفته می‌شود که مقدار KMO از ۰٫۶ بیشتر شود. از آزمون کرویت بارتلت برای بررسی همبستگی بین متغیرها استفاده شد. رد فرضیه صفر نشان می‌دهد که بین متغیرها همبستگی معناداری وجود دارد. واریانس تبیین شده PCA و معنی‌دار بودن مؤلفه‌ها همچنین بر اساس معیار $\text{Eigenvalue} > 1$ انتخاب شد.

تحلیل خوشه‌ای

در روش تحلیل خوشه‌ای ابتدا داده‌ها استاندارد شده، سپس با روش Ward، K-means یا Hierarchical Clustering خوشه‌بندی شدند. تعداد خوشه‌ها با معیارهایی مثل Silhouette انتخاب و در نهایت هر خوشه با مشخصات (میانگین عملکرد و عناصر) تفسیر گردید.

سایر آنالیزهای آماری

آمار توصیفی و Box plot با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT در Excel و Correlation یا همبستگی بین ویژگی‌های خاک با عناصر غذایی برگ و عملکرد با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و نرم‌افزار R4.2.2 (corrplot) انجام شد.

یافته‌های پژوهشی و بحث

ویژگی‌های خاک‌شناسی منطقه مورد مطالعه از جمله pH تقریباً قلیایی منجر به کاهش جذب عناصر ریزمغذی می‌شود؛ لذا باید کودهای اسیدی مثل سولفات آمونیوم، اسید فسفریک و کودهای آلی اسیدی استفاده گردد. همچنین میزان شوری ($\text{EC} = 2.25 \text{ dS/m}$) نشان‌دهنده شرایط نیمه شور و نسبت جذب سدیم (SAR) نسبتاً بالا احتمال سدیمی شدن خاک را نشان می‌دهد. از این رو مصرف اسید سولفوریک رقیق توصیه می‌گردد. آهک بالای خاک نیز منجر به تثبیت عناصر ریزمغذی می‌شود که محلول‌پاشی عناصر آهن، روی و مس به رفع کمبود این عناصر کمک می‌کند. بافت شنی لومی و مواد آلی کم بیانگر قدرت پایین نگهداری آب و عناصر غذایی است که افزودن کمپوست دامی پوسیده یا هیومیک اسید می‌تواند مفید باشد.

جدول ۱. میانگین $\pm$ انحراف معیار ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه

Variable	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation
pH	۷/۴	۸/۱	۷/۷	۰/۱۸
EC (ds/m)	۱/۱۲	۳/۳۶	۲/۲۵	۰/۶۴
SAR	۵/۴	۱۲/۶	۹/۵۸	۲/۰۷
CaSO_4 (%)	۰/۳۲	۱/۷	۰/۶۸	۰/۳۵
CaCO_3 (%)	۷/۰	۱۴/۰	۱۰/۴۲	۱/۷۶
OM (%)	۰/۱۱	۰/۶۱	۰/۳۱	۰/۱۱
Sand (%)	۵۵	۸۸	۷۵	۹/۰۴
Silt (%)	۶	۳۱	۱۷	۶/۱۷
Clay (%)	۲	۱۸	۸	۴/۰۲



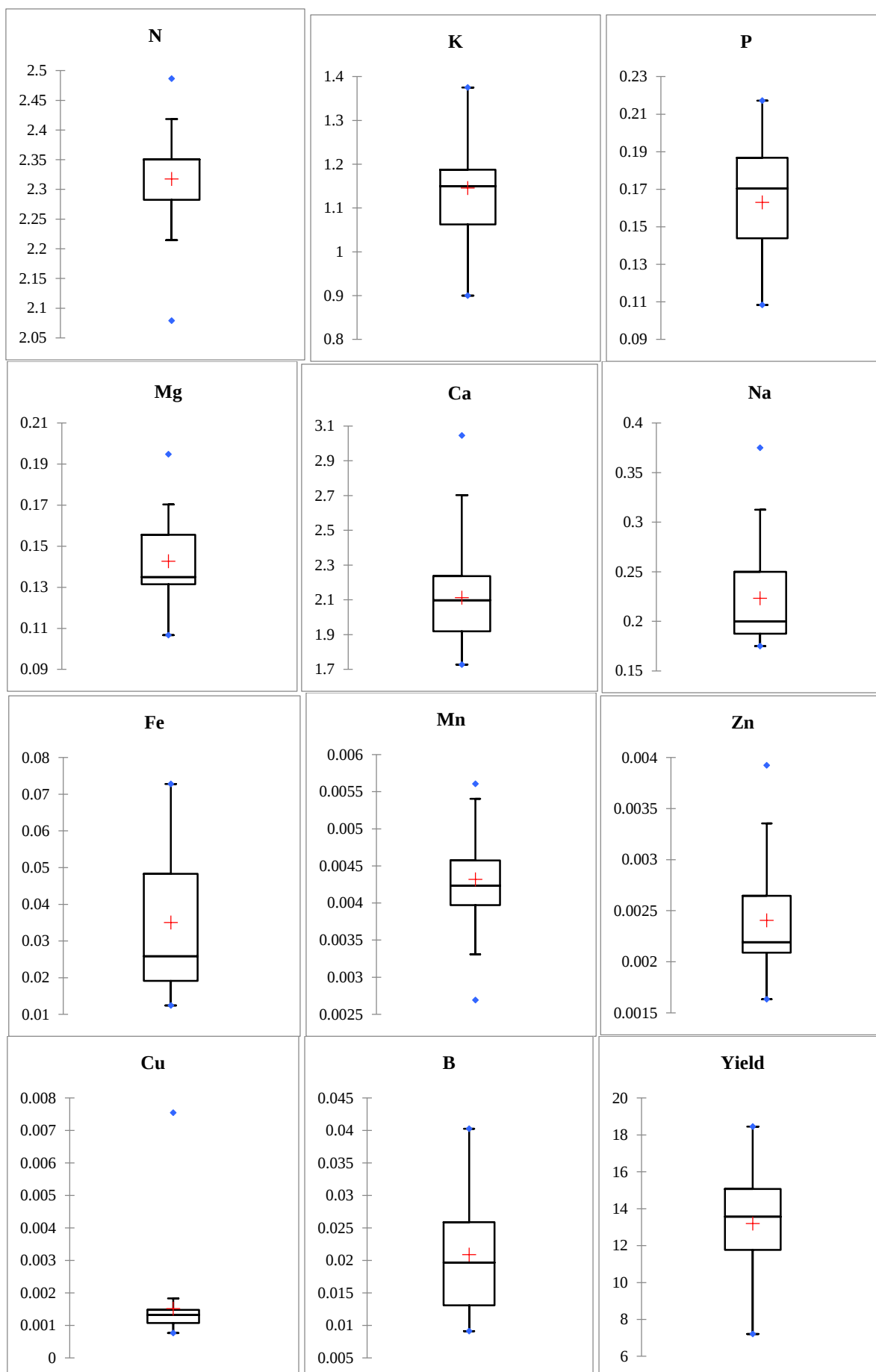
همبستگی بین ویژگی‌های خاک با عناصر غذایی و عملکرد در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، در میان ویژگی‌های خاک، درصد مواد آلی خاک با عملکرد زیتون همبستگی مثبت و قوی ($r = 0.499$) نشان داد، به طوری که همبستگی بین آنها معنی‌دار ($p < 0.01$) بود. در حالی که همبستگی عملکرد با EC و SAR منفی بدست آمد. همه عناصر غذایی برگ با یکی از اجزای بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس) همبستگی مثبت داشتند (جدول ۲). عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی و بور با pH خاک همبستگی مثبت داشتند. فسفر برگ نیز همانند عملکرد با ماده آلی خاک رابطه مثبت داشت، ولی همبستگی آنها معنی‌دار نبود. اکثر عناصر غذایی برگ به جز عنصر روی و بور با SAR همبستگی مثبت داشتند. کلسیم و همه عناصر میکرو بجز مس با EC خاک همبستگی مثبت داشتند.

جدول ۲. ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک با عناصر غذایی و عملکرد

	Yield	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	Cu	B	pH	EC	SAR	CaSO ₄	CaCO ₃	OM	Sand	Silt	Clay
Yield	1																				
N	-0.21	1																			
P	0.50	0.10	1																		
K	-0.24	0.54	0.35	1																	
Ca	0.07	-0.53	-0.34	-0.14	1																
Mg	-0.40	0.53	-0.50	0.14	0.00	1															
Na	-0.25	0.00	-0.54	-0.03	0.24	0.36	1														
Fe	-0.07	0.18	0.00	0.07	-0.19	-0.05	0.05	1													
Mn	-0.26	0.19	-0.04	0.17	-0.14	0.19	0.04	0.6**	1												
Zn	0.14	0.07	0.26	0.25	-0.03	-0.20	0.03	0.16	-0.00	1											
Cu	0.17	0.17	0.16	0.31	-0.14	0.07	-0.11	0.35	0.40	0.04	1										
B	-0.20	-0.07	-0.12	0.03	0.16	0.18	0.13	-0.05	-0.05	-0.00	-0.14	1									
pH	0.10	0.00	0.09	0.00	-0.25	-0.14	0.09	0.06	-0.13	0.19	-0.13	0.06	1								
EC	-0.06	-0.00	-0.04	-0.03	0.08	-0.01	0.05	0.17	0.04	0.02	-0.09	0.20	0.04	1							
SAR	-0.09	0.15	0.02	0.13	0.03	0.15	-0.27	0.07	0.29	-0.34	0.19	-0.10	-0.30	0.13	1						
CaSO ₄	0.08	-0.37	0.14	-0.23	0.14	-0.02	-0.05	-0.06	-0.01	-0.16	-0.13	0.04	-0.00	-0.19	0.09	1					
CaCO ₃	0.08	-0.02	-0.02	0.09	0.23	0.15	0.31	0.01	-0.20	-0.06	-0.08	0.15	0.19	0.38	-0.00	0.20	1				
OM	0.49	-0.06	0.32	-0.11	0.00	-0.14	0.12	-0.03	-0.09	-0.02	-0.11	-0.06	-0.22	0.04	0.02	0.34	0.19	1			
Sand	-0.12	0.18	-0.19	-0.04	0.24	0.24	-0.05	-0.21	0.01	-0.04	0.07	0.10	0.10	0.01	0.02	-0.33	0.59**	-0.27	1		
Silt	0.16	-0.24	0.19	0.00	0.27	-0.33	0.07	0.21	0.03	0.14	-0.03	-0.02	-0.19	-0.08	-0.09	0.22	0.43*	0.29	-0.92**	1	
Clay	0.01	-0.03	0.13	0.09	0.11	-0.02	0.01	0.15	-0.08	-0.12	-0.11	-0.19	0.06	0.11	0.10	0.39	0.67**	0.26	-0.80**	0.52**	1

میانگین و انحراف معیار عملکرد باغات منطقه مورد مطالعه 13.2 ± 2.94 ، میانگین و انحراف معیار عناصر ماکرو شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم به ترتیب $2/3 \pm 0.09$ ، 0.16 ± 0.02 ، 1.14 ± 0.12 ، 2.11 ± 0.26 و 0.14 ± 0.01 و برای عنصر سدیم 0.22 ± 0.04 است. در حالی که میانگین و انحراف معیار عناصر میکرو شامل آهن، منگنز، روی، مس و بر به ترتیب 0.035 ± 0.02 ، 0.004 ± 0.00 ، 0.002 ± 0.00 ، 0.002 ± 0.00 و 0.021 ± 0.01 است.

بر اساس نتایج بدست آمده نیتروژن در محدوده بهینه قرار دارد که نشان‌دهنده کافی بودن ورودی‌های نیتروژن در منطقه مورد مطالعه است. در حالی که مقدار فسفر نشان‌دهنده کمبود این عنصر در منطقه طارم است. کمبود فسفر را می‌توان به شرایط آهکی خاک و pH بالای خاک نسبت داد (جدول ۱)، که در آن فسفر از طریق تشکیل کانی‌های کلسیم با حلالیت کم بی‌حرکت می‌گردد. با توجه به اینکه فسفر در شروع گل‌دهی، رشد میوه و بیوسنتز روغن نقش دارد، عدم دسترس بودن آن منجر به محدودیت عملکرد در بسیاری از باغات می‌شود (Kalcsits et al. 2020; Erel et al. 2016). پتاسیم همچنین عدم تعادل متوسطی را نشان داد که منعکس‌کننده فعل و انفعالات رقابتی با کلسیم و منیزیم فراوان در این خاک‌ها بود. در بین عناصر ماکرو، منیزیم و کلسیم دارای مقادیر بیشینه بودند که هم در دسترس بودن بالای آن در خاک‌های آهکی و هم سرکوب رقابتی جذب پتاسیم را منعکس می‌کند (Xie et al. 2021).



شکل ۲. باکس پلات (Box plot) عناصر غذایی و عملکرد



در بین عناصر ریز مغذی، عنصر روی به عنوان مهم ترین عنصر محدود کننده در منطقه مورد مطالعه است. با توجه به نقش روی در فعال سازی آنزیم، تنظیم هورمون و رشد مریستمی، کمبود آن در سیستم SHD دیده می شود. بور نیز در اغلب باغات کمبود داشت که ممکن است گرده، لقاح و تشکیل میوه را مختل کند (Álvarez-Herrera et al. 2025). کمبود مس در چندین باغ مشهود بود که احتمالاً باعث محدود شدن lignification و مقاومت در برابر بیماری می شود (Wood et al. 2004).

در جدول ۳ نرمال بودن توزیع عناصر غذایی و عملکرد باغات در سیستم SHD بررسی شده است. در آزمون های Shapiro-Wilk، Lilliefors، Anderson-Darling، مقدار p -value کمتر از سطح معنی داری (معمولاً ۰/۰۵) نشان می دهد که داده ها نرمال نیستند. آزمون Jarque-Bera نیز نرمال بودن توزیع داده ها را با بررسی چولگی^۱ و کشیدگی^۲ توزیع می سنجد. مشابه آزمون های قبلی، اگر p -value آن کمتر از ۰/۰۵ باشد، فرض نرمال بودن رد می شود.

بر اساس تمام آزمون ها، P -value متغیر Yield (عملکرد) و فسفر، بزرگتر از ۰/۰۵ است؛ بنابراین، متغیر عملکرد و فسفر از توزیع نرمال پیروی می کنند. در حالی که تمام آزمون ها نرمال بودن متغیر سدیم و مس را رد می کنند؛ بنابراین می توان گفت توزیع عناصر سدیم و مس نرمال نیست. نرمال بودن عنصر منگنز، به جز آزمون Anderson-Darling توسط بقیه آزمون ها تأیید می گردد. نرمال بودن عناصر نیتروژن و کلسیم نیز به ترتیب تنها فقط توسط آزمون های Jarque-Bera و Lilliefors رد نمی شود و سه آزمون دیگر نرمال بودن این عناصر را رد می کنند. عناصر پتاسیم، منیزیم، آهن، روی و بور نیز توسط اکثر آزمون ها رد می گردد، از این رو توزیع این متغیرها نرمال در نظر گرفته نمی شود که بیانگر عدم تعادل عناصر غذایی در سیستم فوق متراکم است.

جدول ۳. آزمون توزیع نرمال داده های تجزیه برگ

Variable	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
Yield	۰/۱۰۶	۰/۰۸۶	۰/۱۶۵	۰/۵۶۱
N%	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<	۰/۲۵۱
P%	۰/۲۱۳	۰/۱۵۲	۰/۰۸۲	۰/۵۱۵
K%	۰/۱۲۸	۰/۰۵۶	۰/۰۰۸	۰/۸۲۳
Ca%	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵	۰/۰۵۷	۰/۰۰۰۱<
Mg%	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۱۷۹
Na%	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<
Fe%	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۲	۰/۱۳۰
Mn%	۰/۱۰۷	۰/۰۴۵	۰/۱۵۲	۰/۸۶۸
Zn%	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۰۴۱
Cu%	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<	۰/۰۰۰۱<
B%	۰/۰۰۷	۰/۰۱۸	۰/۲۵۸	۰/۱۴۲

همبستگی پیرسون ارتباط مثبت و منفی عملکرد را با عناصر غذایی نشان داد (جدول ۴). در میان عناصر غذایی، عنصر فسفر همبستگی معنی داری (در سطح احتمال یک درصد) با عملکرد داشت. به طوری که قوی ترین ضرایب مثبت با عملکرد برای عنصر فسفر $r = 0.51$ و روی $r = 0.13$ ثبت شد، در حالی که کوچک ترین ضریب مثبت مربوط به عنصر کلسیم $r = 0.07$ بود. همبستگی منفی متوسط برای منیزیم درصد $r = -0.42$ و منگنز $r = -0.26$ مشاهده شد، همبستگی بقیه عناصر غذایی با عملکرد ضعیف بود. در میان همبستگی های بین عنصری، بالاترین مقدار بین آهن و منگنز $r = 0.67$ ، سپس بین نیتروژن و پتاسیم $r = 0.54$ و نیتروژن و منیزیم $r = 0.53$ رخ داد. ارتباط مثبتی نیز بین مس با منگنز $r = 0.40$ ، پتاسیم با مس $r = 0.32$ ، و فسفر با روی $r = 0.24$ ثبت شد، در حالی که چندین جفت روابط نزدیک به صفر یا ناچیزی نشان دادند.

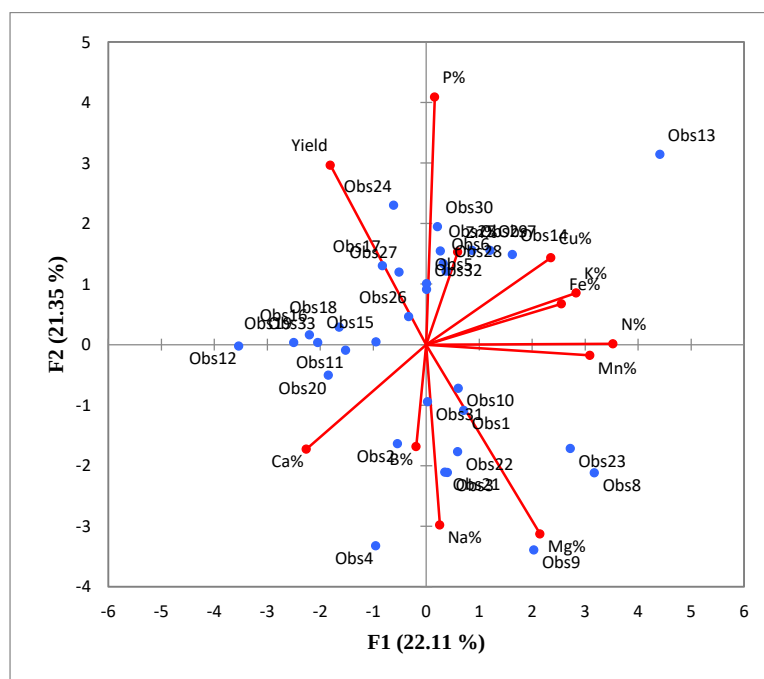
بر اساس تحلیل مؤلفه های اصلی (معیار $1 > \text{Eigenvalue}$) چهار مؤلفه اول معنی دار شدند و واریانس تبیین شده PCA ۶۶/۲۶ درصد بدست آمد. ولی بر اساس معیار KMO $PC1 = 22.11\%$ و $PC2 = 21.35\%$ بدست آمد که نشان می دهد دو مؤلفه اول ۴۳/۴۶ درصد از

تغییرات داده را پوشش می‌دهند (شکل ۳). PC1 عمدتاً از عناصر نیتروژن، پتاسیم، منگنز و آهن شکل گرفته است که نشان می‌دهد این عناصر با تغییرات هم جهت در تمایز داده‌ها تعیین‌کننده هستند، در حالی که PC2 بیشتر تحت تأثیر عملکرد، فسفر، منیزیم و سدیم قرار دارد؛ بنابراین PC2 بعد مستقل‌تر دیگری از تغییرات را در بر می‌گیرد. در این مؤلفه منیزیم و سدیم با بار عاملی منفی با عملکرد رابطه عکس دارند. مؤلفه سوم (PC3=12.78%) و چهارم (PC4=10.01%) نیز به ترتیب تحت تأثیر عناصر آهن و روی قرار گرفته‌اند و رابطه هر دو عنصر با عملکرد مثبت بود.

جدول ۴. ماتریس همبستگی پیرسون در بین غلظت عناصر غذایی برگ در درختان زیتون

Variables	Yield	N%	P%	K%	Ca%	Mg%	Na%	Fe%	Zn%	Cu%	B%
Yield	۱										
N%	-۰/۲۲	۱									
P%	-۰/۵۱۴	-۰/۰۹۲	۱								
K%	-۰/۲۴	-۰/۵۴۲	-۰/۳۳۳	۱							
Ca%	-۰/۰۷۶	-۰/۰۵۳	-۰/۳۴	-۰/۱۵	۱						
Mg%	-۰/۴۲	-۰/۵۳۵	-۰/۵۲	-۰/۱۵۴	-۰/۰۰۸	۱					
Na%	-۰/۲۴	-۰/۰۰	-۰/۵۱۱	-۰/۰۳۹	-۰/۲۴۵	-۰/۳۴۴	۱				
Fe%	-۰/۰۶	-۰/۱۷۶	-۰/۰۲۸	-۰/۰۶۹	-۰/۱۸۹	-۰/۰۷۰	-۰/۰۶۶	۱			
Mn%	-۰/۲۶	-۰/۲۰۰	-۰/۰۵۷	-۰/۱۷۳	-۰/۱۴۴	-۰/۲۰۴	-۰/۰۳۹	-۰/۶۷۰	۱		
Zn%	-۰/۱۳۹	-۰/۰۸۰	-۰/۲۴۳	-۰/۲۶۱	-۰/۰۴۰	-۰/۱۹۱	-۰/۰۲۴	-۰/۱۵۶	-۰/۰۴۸	۱	
Cu%	-۰/۱۷۴	-۰/۱۷۴	-۰/۱۴۹	-۰/۳۲۰	-۰/۱۴۷	-۰/۰۷۶	-۰/۱۱۸	-۰/۳۴۷	-۰/۰۴۸	-۰/۱۴۱	۱
B%	-۰/۲۱	-۰/۰۷۴	-۰/۱۳۱	-۰/۰۴۳	-۰/۱۶۰	-۰/۱۹۸	-۰/۱۲۵	-۰/۰۵۸	-۰/۰۰۲	-۰/۱۴۱	-۰/۱۴۱

(اعداد پررنگ نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد است)



شکل ۳. نمودار تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA- Biplot) بر اساس معیار KMO

بر اساس نتایج بارگذاری‌ها نیز عناصر نیتروژن، منگنز، پتاسیم و آهن بیشترین سهم را در بارگذاری‌های PC1 دارند و تغییرات آن‌ها هم جهت هستند. همان‌طور که در شکل ۳ نیز نشان داده شد نمودارهای عناصر فوق به دلیل همبستگی بالا نزدیک به هم هستند و به دلیل مقادیر مثبت در سمت راست شکل قرار دارند. در حالی که عملکرد و عنصر فسفر به دلیل طول بردار زیاد در بارگذاری‌های PC2 نسبت



به عناصر منیزیم و سدیم سهم بیشتری دارند و عملکرد و فسفر با منیزیم و سدیم در خلاف هم تغییر می‌کنند از این رو فسفر و عملکرد در بالای محور و عناصر سدیم، منیزیم و کلسیم در پایین محور قرار دارند.

بطور کلی در نمودار بارگذاری (شکل ۳)، فسفر بالاترین جابجایی را در امتداد PC2 نشان داد، در حالی که نیتروژن و منگنز به سمت مثبت PC1 قرار گرفتند. مس، پتاسیم و آهن نیز به طور مثبت روی PC1 بارگذاری شدند، در حالی که کلسیم و بر و عملکرد در جهت منفی این محور قرار داشتند. منیزیم در مؤلفه دوم سمت راست ظاهر شدند و عنصر روی موقعیتی نزدیک به مرکز بین دو جزء را اشغال کردند. آرایش بردارها در شکل ۳ الگوی توزیع متغیرهای عناصر غذایی و عملکرد را در PC1 و PC2 خلاصه می‌کند.

در این مطالعه خوشه‌بندی با استفاده از روش‌های Ward، تحلیل سلسله‌مراتبی و K-mean انجام گرفت تا تعداد خوشه متناسب انتخاب گردد. تحلیل خوشه‌ای Ward با استفاده از فاصله اقلیدسی، باغ‌های زیتون مورد مطالعه را بر اساس ویژگی‌های عملکردی و عناصر شیمیایی به ۳ گروه همگن دسته‌بندی کرد (شکل ۴).



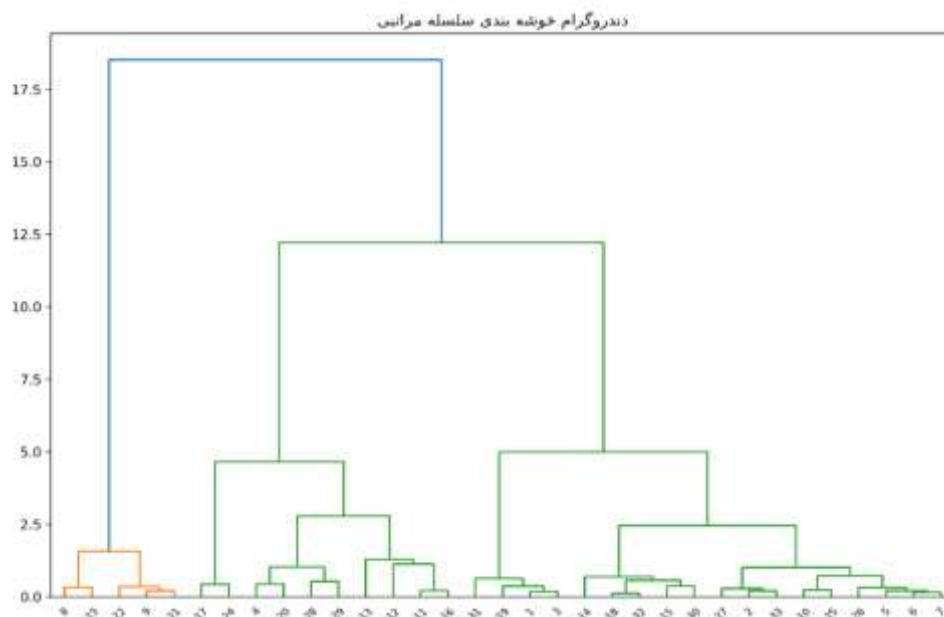
شکل ۴. نقشه حرارتی میانگین خوشه‌ها بر اساس روش Ward

خوشه ۱ با ۱۴ عضو و بیشترین عملکرد ($>15 \text{ t/ha}$)، دارای همبستگی مثبت و قوی بین عناصر غذایی و عملکرد هستند که نشان‌دهنده باغ‌هایی با فعالیت متابولیکی یا پتانسیل رشدی بالا و دسترسی ریشه به مواد مغذی هستند.

خوشه ۲ با ۲۳ عضو دارای عدم تعادل عناصر غذایی و عملکرد متوسط ($10-15 \text{ t/ha}$) هستند. توازن بین عناصر (نسبت K به Ca یا Mg) به هم‌خورده که مانع از جذب بهینه می‌شود.

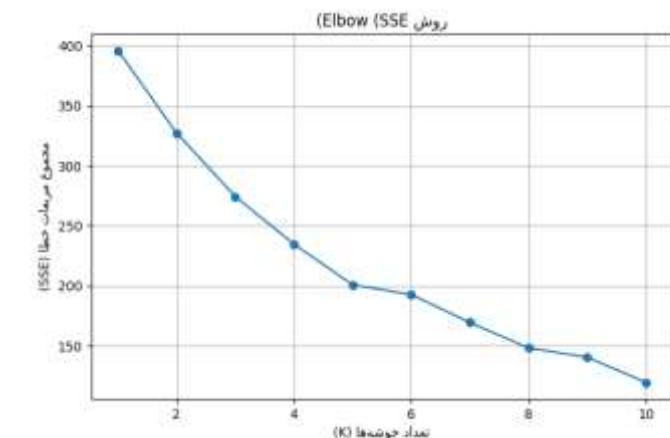
خوشه ۳ با ۱۳ عضو، دارای کمبود عناصر غذایی و عملکرد پایین ($<10 \text{ t/ha}$) هستند. عناصر ریزمغذی به‌ویژه عنصر روی و بور از عوامل محدودکننده عملکرد هستند.

در روش تحلیل سلسله‌مراتبی از دندروگرام یا نمودار درختی برای خوشه‌بندی استفاده می‌شود. نمودار درختی نحوه ادغام یا جداسازی خوشه‌ها در هر مرحله از الگوریتم را نمایش می‌دهد. دندروگرام خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (شکل ۵) نشان می‌دهد که نمونه‌ها بر اساس شباهت چگونه گروه‌بندی شده‌اند. محور عمودی این نمودار نشان‌دهنده میزان شباهت یا عدم شباهت بین خوشه‌ها است. هرچه ارتفاع ادغام بالاتر باشد، دو خوشه یا داده‌ای که با هم ادغام می‌شوند، تفاوت بیشتری با هم دارند. محور افقی این محور نیز نشان‌دهنده داده‌ها یا خوشه‌های منفرد است.

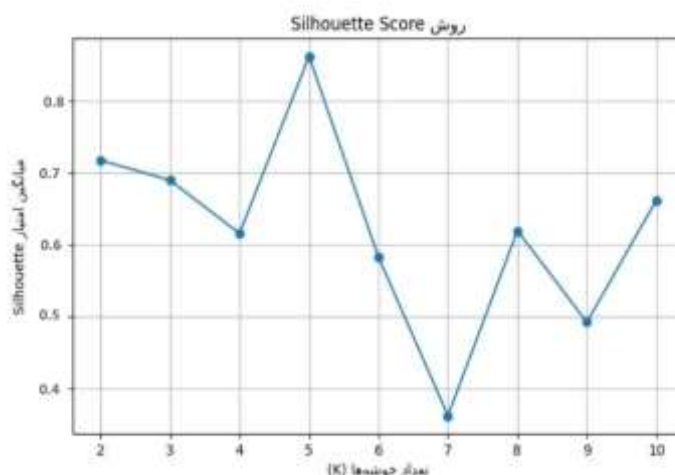


شکل ۵. دندروگرام تحلیل خوشه‌ای (Hierarchical Clustering Dendrogram)

بر اساس تحلیل سلسله‌مراتبی، بهترین تعداد خوشه‌ها ۳ خوشه بود و شاخص سیلوئت برای $K=3$ حدود ۰٫۱۷ گزارش شد که نشان‌دهنده خوشه‌بندی متوسط است. در این روش، نحوه خوشه‌بندی، اعضا و تحلیل خوشه‌ها با روش Ward مطابقت دارد. در روش K-means با استفاده از معیارهای (a) Elbow و (b) Silhouette، بهترین تعداد خوشه‌ها انتخاب و تحلیل خوشه‌بندی انجام گردید (شکل ۶).



a



b

شکل ۶- نمودار K-means تحلیل خوشه‌ای (a) Elbow plot و (b) Silhouette plot

در نمودار آرنجی (Elbow) محور افقی تعداد خوشه‌ها و محور عمودی میانگین مربعات خطا (SSE) نقاط هر خوشه تا مرکز خوشه‌اش را نشان می‌دهد. با افزایش K، خوشه‌ها ریزتر می‌شوند و SSE کاهش می‌یابد، این کاهش ابتدا سریع است، سپس در نقطه‌ای از نمودار کاهش SSE کند می‌شود. آن نقطه تغییر شیب Elbow نام دارد و معمولاً به عنوان بهترین انتخاب K در نظر گرفته می‌شود. شکل ۶ (a)، امتیاز سیلوئت را برای تعداد خوشه‌های مختلف نشان می‌دهد. امتیاز سیلوئت معیاری برای ارزیابی کیفیت خوشه‌بندی است. در این نمودار محور افقی نشان‌دهنده تعداد خوشه‌هایی است که برای الگوریتم خوشه‌بندی در نظر گرفته شده است و معمولاً از ۲ تا ۱۰ است و محور عمودی نشان‌دهنده میانگین امتیاز سیلوئت برای هر تعداد خوشه (K) است. امتیاز سیلوئت بین ۱- تا ۱ متغیر است. امتیاز نزدیک به ۱ نشان‌دهنده خوشه‌بندی خوب است، جایی که داده‌ها به خوبی در خوشه خود قرار گرفته‌اند و از خوشه‌های دیگر فاصله دارند. امتیاز نزدیک به صفر نشان‌دهنده همپوشانی بین خوشه‌هاست و امتیاز نزدیک به ۱- نشان‌دهنده این است که ممکن است داده‌ها در خوشه اشتباهی قرار گرفته باشند.

با توجه به شکل ۶ (b) بیشترین امتیاز سیلوئت در K=5 و حدود 0.851 به دست آمد که بهترین امتیاز در محدوده مورد بررسی است. بر اساس این نمودار، تعداد ۵ خوشه (K=5) بهترین امتیاز سیلوئت را دارد و با این تعداد، داده‌ها به بهترین شکل ممکن از هم تفکیک شده‌اند و خوشه‌بندی کیفیت بهتری دارد. در حالی که در تحلیل‌های سلسله‌مراتبی و روش Ward، تعداد خوشه ۳ و امتیاز سیلوئت برای K=3 حدود ۰.۱۷ به دست آمد؛ بنابراین در این مطالعه K بهینه بر اساس روش K-means و ۵ در نظر گرفته شد: خوشه صفر شامل قطعات ۸، ۹، ۲۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۴۱، ۴۲، ۴۳ و دارای عملکرد پایین‌تر (به طور متوسط ۸/۱۱) و درصد سدیم بالاتر (حدود ۰/۲۸۷) است.

-خوشه یک شامل قطعات ۵، ۶، ۷، ۱۴، ۱۷، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۲، ۳۸، ۴۸ که دارای بیشترین تعداد قطعه با عملکرد متوسط حدود ۱۴/۴۵ و الگوی متوسطی از عناصر غذایی هستند؛ ولی با غلظت کم ریز مغذی‌هاست.

-خوشه دو شامل قطعات ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۳۳، ۳۹، ۴۰، ۴۴، ۴۵، ۴۶ دارای عملکرد متوسط و حدود ۱۴/۵۶ و با غلظت فسفر پایین است.

-خوشه سه شامل قطعات ۱، ۲، ۳، ۴، ۱۰، ۱۵، ۲۱، ۲۲، ۳۱، ۴۷ نیز دارای عملکرد پایین و غلظت فسفر و روی پایین هستند.

-خوشه چهار با اعضای کمتر شامل قطعات ۱۳، ۳۷، ۴۹، ۵۰، دارای عملکرد مطلوب و غلظت بهینه عناصر غذایی است.

میانگین عملکرد و غلظت عناصر غذایی در خوشه‌های مختلف در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۵. میانگین عملکرد و غلظت عناصر غذایی در خوشه‌های مختلف

Cluster	Yield	N%	P%	K%	Ca%	Mg%	Na%	Fe%	Mn%	Zn%	Cu%	B%
۰	۷/۹۶	۲/۴۲	۰/۱۳	۱/۲۸	۲/۲۱	۰/۱۶	۰/۳۳	۰/۰۵۸۰	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۰	۰/۰۲۸۴
۱	۱۴/۵	۲/۳۵	۰/۱۸	۱/۱۵	۱/۹۶	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۰۴۲۶	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۳	۰/۰۱۷۲
۲	۱۴/۶	۲/۱۸	۰/۱۶	۱/۰۸	۲/۳۶	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۰۲۲۲	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۲۴۸
۳	۱۱/۶	۲/۳۵	۰/۱۴	۱/۱۴	۲/۱۵	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۰۲۱۲	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۳	۰/۰۲۰۴
۴	۱۷/۰	۲/۴۲	۰/۲۰	۱/۳۶	۱/۸۳	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۰۶۵۷	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۱۳

تحلیل خوشه‌ای با ساده‌سازی داده‌های پیچیده می‌تواند به شناسایی الگوهای تغذیه‌ای مشابه و مدیریت تغذیه‌ای کمک کند (Facelli et al. 2010). بر اساس نتایج (جدول ۵)، خوشه پنجم دارای بیشترین عملکرد و تعادل عناصر غذایی و خوشه اول دارای کمترین عملکرد و تعادل عناصر غذایی است. بنابراین می‌توان گفت کاهش عملکرد در سیستم SHD به دلیل مشکلات تغذیه‌ای است. خوشه دوم و سوم دارای عملکرد متوسطی هستند اما الگوی عناصر غذایی در آنها متفاوت است. به طوری که کمبود عناصر میکرو به ویژه عنصر بر در خوشه دوم بیشتر مشهود است در حالی که در خوشه سوم علاوه بر عناصر ریز مغذی، کمبود عناصر ماکرو از جمله فسفر بیشتر است. عملکرد پایین خوشه چهارم بدلیل کمبود عناصری مانند فسفر، پتاسیم، آهن، روی و مس است. در خوشه پنجم ترکیب عناصر غذایی تقریباً متعادل و عملکرد مطلوب می‌باشد. قطعاتی که به علت وضعیت تغذیه‌ای مشابه در یک خوشه قرار گرفته‌اند، احتمالاً تحت شرایط مدیریتی یا محیطی نزدیک به هم هستند.

به طور کلی در سیستم SHD منطقه طارم، همه قطعات به جز قطعاتی که در خوشه پنجم قرار دارند با کمبود فسفر مواجه هستند که محدودیت جذب این عنصر را نشان می‌دهد. عدم کمبود نیتروژن در اغلب خوشه‌ها به کوددهی مناسب این عنصر اشاره می‌کند. همچنین کمبود کلسیم و منیزیم نیز مشاهده نشد. اما در اکثر خوشه‌ها کمبود عناصر ریزمغذی از جمله روی، آهن و مس رویت گردید که نشان‌دهنده pH بالا، مواد آلی پایین و شرایط آهکی خاک منطقه است.

نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این پژوهش، چهار مؤلفه اول PCA حدود ۶۶/۲۶ درصد از تغییرات داده را پوشش می‌دهند و فسفر محدودکننده‌ترین عامل برای عملکرد در منطقه طارم شناسایی شد. نتایج تحلیل خوشه‌ای نیز نشان داد که کمبود عنصر فسفر و روی منجر به خوشه‌بندی باغ‌ها در گروه با عملکرد پایین شدند؛ بنابراین برنامه‌ریزی دقیق تغذیه‌ای درختان زیتون از طریق رفع کمبود عناصر ریزمغذی به‌ویژه روی، مس و عنصر فسفر، کنترل شوری و افزایش ماده آلی خاک منجر به بهبود عملکرد سیستم‌های SHD و کاهش اثرات زیست‌محیطی در منطقه طارم می‌گردد. استفاده از رویکرد ترکیبی PCA و تحلیل خوشه‌ای درک جامع‌تری از روابط پیچیده میان عناصر را ارائه می‌دهد. از این رو، ابزاری کارآمدی برای مدیریت هوشمند کوددهی و ارزیابی پایداری تغذیه‌ای در سیستم‌های SHD زیتون محسوب می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران انجام شد.

حمایت مالی از این پژوهش از طرف بنیاد ملی علم ایران در قالب طرح پسادکتری نویسنده اول، با راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: ماهرخ شریف‌مند، مهدی طاهری؛ تهیه گزارش پژوهش: ماهرخ شریف‌مند؛ تحلیل داده‌ها: ابراهیم سپهر، مهدی طاهری نویسنده اول؛ پژوهشگر: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای اول؛ طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور؛ مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

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

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

بیانیه دسترسی به داده‌ها

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

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۴۴۱۰۹» انجام شده است. همچنین از همکاری شرکت تات سبز استان قزوین در انجام این پژوهش قدردانی می‌گردد.

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای سازنده و پیشنهادات ارزنده در اصلاح و بهبود مقاله سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع



بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- امامی، عاکفه (۱۳۷۵). روش‌های تجزیه گیاه (جلد اول). نشریه فنی شماره ۹۸۲، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران.
- براتی زانیانی، مرضیه؛ حسین‌پور، علیرضا؛ صالحی، محمدحسن و جعفری، اعظم (۱۴۰۴). تفسیر نتایج داده‌های آزمون خاک پتاسیم در تعدادی از خاک‌های آهکی. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۷)، ۱۸۷۹-۱۸۹۴.
- رمضانی اعتدالی، هادی و کوهی، سکینه (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تنش گرمایی وارد بر محصولات راهبردی کشاورزی در استان قزوین. *مجله پژوهش‌های خشکسالی و تغییر اقلیم*. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9739.1157>
- شریف‌مند، ماهرخ؛ سپهر، ابراهیم و بایوردی، احمد (۱۳۹۹). ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای کدو با روش انحراف از درصد بهینه (DOP) در منطقه خوی. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۸ (۲)، ۱۵-۲۱.
- طاهری، مهدی؛ واحدی، سمیرا و عباسی، محمد (۱۳۹۹). مقایسه وضعیت عناصر غذایی در ارقام مختلف زیتون با استفاده از شاخص‌های تغذیه‌ای. *پژوهش‌های میوه کاری*، ۵ (۱)، ۴۴-۵۹.
- عبوده، هانا؛ بخشنده، عبدالمهدی؛ مرادی تلاوت، محمدرضا؛ سیادت، سید عطاءاله؛ موسوی، سید امیر و عالمی سعید، خلیل (۱۴۰۴). تجزیه علیت (Path Analysis) روابط میان عملکرد دانه و صفات وابسته به آن در ژنوتیپ‌های بهاره کلزا. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۵ (۴)، ۱۹۵-۲۰۷.
- واحدی، سمیرا؛ بشارت، سینا؛ دواتگر، ناصر و طاهری، مهدی (۱۴۰۱). بررسی نقش وضعیت تغذیه‌ای برگ بر شاخص‌های فتوسنتزی درخت زیتون. *علوم باغبانی ایران*، ۵۳ (۲)، ۳۰۹-۳۲۰.

REFERENCES

- Aboodeh, H., bakhshandeh, A., Moradi Telavat, M. R., siadat, S. A., Moosavi, S., & amisaeid, K. (2026). Path Analysis of Relationships between Grain Yield and Related Traits in Spring Rapeseed Genotypes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 35(4), 195-207. <https://doi.org/10.22034/saps.2024.62453.3248> (In Persian).
- Álvarez-Herrera, J.G., Jaime-Guerrero, M., & Fischer, G. (2025). The effect of boron on fruit quality: a review. *Horticulturae* 11(8), 992.
- Barati Zanyani, M., Hossienpur, A. R., Salehi, M, H., & Jafari, A. (2025). Calibration of potassium soil test results in some calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (7), 1879-1894. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.390607.669884> (In Persian).
- Ding, W., Zhang, Z., & Li, H. (2017). Application of principal component analysis to soil and plant analysis: a review. *Journal of Soil and Sediments*, 17(10), 2478-2489. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1747-5>.
- Emami, A. (1996). Methods of plant analysis. Soil and Water Research Institute, technical publication No. 982, Tehran, Iran, 128p. (In Persian)
- Erel, R., Yermiyahu, U., Yasuor, H., Cohen Chamus, D., Schwartz, A., Ben-Gal, A., & Dag, A. (2016). Phosphorous nutritional level, carbohydrate reserves and flower quality in olives. *PloS one* 11 (12) (e0167591).
- Facelli, E., Baldi, G., Ferrari, G., & Ruggiero, C. (2010). Cluster analysis for nutrient data interpretation in plant nutrition studies. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41, 191-201. <https://doi.org/10.1080/00103620903427688>.
- Galván, A.I., Serradilla, M.J., Córdoba, M.G., & Domínguez, G. (2021). Implementation of super high-density systems and suspended harvesting meshes for dried fig production: Effects on agronomic behaviour and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 281(6), 109918. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109918>.
- Kalcsits, L., Lotze, E., Tagliavini, M., Hannam, K.D., Mimmo, T., Neilsen, D., & Valverdi, N.A. (2020). Recent achievements and new research opportunities for optimizing macronutrient availability, acquisition, and distribution for perennial fruit crops. *Agronomy*, 10 (11), (1738).
- Kumar, A., Vairagar, V.G., Garg, C., & Verma, S. (2025). A Review on Advances in High-Density Planting Systems for Fruit Crops. *Journal of Scientific Research and Reports*, 31(10), 201-217. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2025/v31i103563>.
- Marschner, P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.). Academic Press.
- Pardo, G., del Prado, A., Martínez-Mena, M., Bustamante, M. A., Martín, J. A. R., Álvaro-Fuentes, J., & Moral, R. (2017). Orchard and horticulture systems in Spanish Mediterranean coastal areas: Is there a

- real possibility to contribute to C sequestration? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 238, 153–167, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.034>, 2017.
- Parwaliya, A., Kumar, L., Kumar, M., Chaudhary, V., & Babu Gautam, R. (2025). Solving agricultural challenges through mathematical optimization and simulation. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 10 (6), 214-219 .
- Proietti, S., Sdringola, P., Desideri, U., Zepparelli, F., Brunori, A., Ilarioni, L., Nasini, L., Regni, L., & Proietti, P. (2014). Carbon footprint of an olive tree grove. *Applied Energy*, 127, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.019>, 2014.
- Ramezani Etedali, H., & Koohi, S. (2025). Assessing the impact of climate change on heat stress on strategic agricultural products in Qazvin province. *Journal of Drought and Climate change Research*, <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9739.1157> (In Persian).
- Sharifmand M., Sepehr E., & Bybordi A. (2020). Evaluation of Nutritional Status of Squash by Deviation from Optimum Percentage (DOP) Method in Khoys Region. *Applied Soil Research*, 8 (2), 15-21 (In Persian).
- Taheri M., Vahedi S., & Abasi M. (2020). Comparison of Nutrient Status in Different Olive Varieties with Nutrition Indicators. *Pomology Research Scientific Journal*, 5(1), 44-59. Magiran.com/p2259235 (In Persian).
- Thornley, J. H. M., & Johnson, I. R. (1990). *Plant and Crop Modelling: A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology*. Oxford: Clarendon Press.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Vahedi S., Beshsrat S., Davatgar N., & Taheri M. (2022). Effects of leaf nutrient contents on photosynthetic indices in Olives tree. *Iranian Journal of Horticultural Sciences*, 53(2), 309-320. <https://doi.org/10.22059/ijhs.2020.300543.1787> (In Persian).
- Vatandas, M., Güner, M., & Türker, U. (2005) Precision farming technologies. TMMOB chamber of agricultural engineers. In: 6th. Technical Congress Proceedings Book, Ankara, pp 347–365.
- Wood, B., Reilly, C., & Nyczepir, A. (2004). Nickel Deficiency is Occuring in Orchard Trees. *HortScience*, 39 (4), 858B-858.
- Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F., & Guo, S. (2021). Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal*, 9 (2), 249-256.