

آب و خاک

نشریه

(علوم و صنایع کشاورزی)



جلد ۳۹ شماره ۴

سال ۱۴۰۴

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

شماره پیاپی ۱۰۲

عنوان مقالات

- ۳۳۱ نگرشی بر وضعیت منابع و مصارف حوزه آبریز تجن
ملیحه اکبری - مجتبی فرهادزاده - پریسا ملکی
- ۳۵۱ بهینه‌سازی مصرف کود در مزارع چغندرقد با روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND): نتایج یک مطالعه دو ساله
جلال قادری - شاهرخ فاتحی - مجید فروهر - کمال خلخال
- ۳۶۳ روابط مکانی کیفیت خاک و رویشگاه در جنگل‌های زاگرس: تحلیل آماری تا پیش‌بینی فضایی
نرگس پردل - جعفر حسین زاده - مهدی حیدری - رضا امیدپور
- تأثیر کاربرد کودآبیاری آمینوکلات‌های آهن و سولفات آهن بر توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد
خاک و غلظت آهن در آفتابگردان
مینا عالی پور بابادی - مجتبی نوروزی مصیر - عبدالامیر معزی - افراسیاب راهنما قهفرخی - مهدی تقوی زاهد کلانی
- ۴۰۵ بررسی اثر کاربرد کودهای شیمیایی و آلی بر کیفیت خاک
رسول میرخانی - فرهاد مشیری - سید علی غفاری نژاد - حامد رضایی
- ۴۱۹ تأثیر کشت یونجه و تناوب ذرت - گندم بر کیفیت خاک در اگرواکوسیستم نیمه‌خشک
امید اقبالی - حجت امامی - رضا خراسانی

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه ۲۱/۲۰۱۵ مورخه ۱۳۶۸/۴/۱۱ و درجه علمی-پژوهشی شماره ۲۶۵۲۴ تاریخ ۱۳۷۳/۱۰/۱۹ از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد ۳۹ شماره ۴ مهر-آبان سال ۱۴۰۴

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

سرمدیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد- تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه تبریز)

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمائی، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدی، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد- دانشکده کشاورزی - ص. پ. ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳ - دبیرخانه نشریات علمی- نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

مقاله‌های این شماره در سایت <https://jsw.um.ac.ir> به صورت کامل نمایه شده است.

این نشریه به صورت دو ماهانه (شش شماره در سال) منتشر می‌شود.



مندرجات

- 331 نگرشی بر وضعیت منابع و مصارف حوضه آبریز تجن
ملیحه اکبری - مجتبی فرهادزاده - پریسا ملکی
- 351 بهینه سازی مصرف کود در مزارع چغندر قند با روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND): نتایج یک مطالعه دو ساله
جلال قادری - شاهرخ فاتحی - مجید فروهر - کمال خلخال
- 363 روابط مکانی کیفیت خاک و رویشگاه در جنگل های زاگرس: تحلیل آماری تا پیش بینی فضایی
نرگس پردل - جعفر حسین زاده - مهدی حیدری - رضا امیدپور
- 383 تأثیر کاربرد کودآیاری آمینو کلات های آهن و سولفات آهن بر توزیع شکل های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک و غلظت آهن در آفتابگردان
مینا عالی پور بابادی - مجتبی نوروزی مصیر - عبدالامیر معزی - افراسیاب راهنما قهفرخی - مهدی تقوی زاهد کلانی
- 405 بررسی اثر کاربرد کودهای شیمیایی و آلی بر کیفیت خاک
رسول میرخانی - فرهاد مشیری - سید علی غفاری نژاد - حامد رضایی
- 419 تأثیر کشت یونجه و تناوب ذرت - گندم بر کیفیت خاک در اگرو اکوسیستم نیمه خشک
امید اقبالی - حجت امامی - رضا خراسانی

Research Article

Vol. 39, No. 4, Sep.-Oct. 2025, p. 329-347

An Attitude to the Status of Resources and Uses of Tajan River Basin

M. Akbari¹, M. Farhadzadeh¹, P. Maleki^{1*} 

1- Mazandaran Regional Water Company, Water Resources Management Company, Ministry of Energy, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: Maleki@mzrw.ir)

Received: 16 July 2025

Revised: 17 September 2025

Accepted: 21 October 2025

Available Online: 21 October 2025

How to cite this article:

Akbari, M., Farhadzadeh, M., & Maleki, P. (2025). An attitude to the status of resources and uses of Tajan River basin. *Journal of Water and Soil*, 39(4), 329-347. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.94387.1490>

Introduction

Water is a primary and fundamental need for survival, industrial development, and economic prosperity. In other words, the key to development depends on the expansion of water resources and their optimal use. To achieve this, the correct allocation of water resources to different uses based on priorities is of great importance (Loucks and Van Beek, 2017). Any management planning to control water consumption in the agricultural sector requires a correct understanding of the mutual influence of variables controlling water resources and consumption on each other in order to ensure optimal provision of agricultural water needs and also to ensure the improvement of the economic situation of farmers (Veysel, 2024). The purpose of this study is to examine and compare available water resources and uses, including agricultural, drinking, industrial, and environmental needs, for the Tajan River basin, including the two parts of the Tajan Plain and the river basin up to the entrance to the plain during the exploitation season, in order to determine the possible shortage of water supply in different months. It is worth mentioning that the results presented in the report on the study of water resources and needs of the Tajan River Basin (Pandam Company, 1402) were used to prepare this article.

Materials and Methods

The Tajan River is one of the important rivers of Mazandaran Province, which originates from the Hezar Jarib Mountains and flows into the Caspian Sea after passing through the city of Sari in Farahabad. The enJuley catchment area of this river up to the entrance to the plain with an area of about 4050 square kilometers and the Tajan Plain with an area of about 800 square kilometers, has been considered as the study area to investigate water resources and uses. In this study, long-term statistical data from hydrometric stations of the Zaremroud (Garm Rud Station), Lajim (Vastan Station), Chahardangeh (Varand Station), and Tajan (Kordkheil Station) rivers, as well as the inflow and outflow statistics of Shahid Rajaee Dam (during the ten-year operation period of 1390-1400) as the main source of water supply for the Tajan basin, have been used. For groundwater resources (wells), information obtained from the Mazandaran Regional Water Company in 1400 and basic water resource studies have been used. Regarding water ponds, the results of the interpretation of new satellite images in the form of a land use map have been used.

Results

The results of the surveys show that in the entire study area, including the Tajan River basin to the entrance to the plain and the lands of the Tajan Plain, there are about 119,800 hectares of pure agricultural land in the form of irrigated and dry-land cultivation, of which 74,500 hectares are irrigated and the rest are dry-land cultivation. There



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.94387.1490>

are fish farming ponds with a total area of 550 hectares in the Tajan Plain, which are generally related to warm-water fish. Also, some of the ponds located in the area are used for aquaculture. The total water requirement of the Tajan Plain area (agriculture and aquaculture) is 492 million cubic meters, and in the upstream lands (the Tajan basin to the entrance to the plain), this requirement is estimated to be 106 million cubic meters. The total drinking, industrial and tourism drinking needs of the region (Sari, Miandoroud and Kiasar counties) are 7.68 million cubic meters per year. The estimated environmental demand of the Tajan River is also equivalent to 100 million cubic meters per year. Available water resources for various uses include the regulated water flow of the Shahid Rajaee Dam, the seasonal flow of the rivers in the middle basin, dam water storage, and groundwater resources. To compare uses with available water resources, three comparison levels including normal, dry, and very dry water years have been used. The volume of water that can be extracted from the Shahid Rajaee Dam in the first six months of the year for normal, dry, and very dry water years is 231, 194, and 122 million cubic meters, respectively. The volume of water that can be extracted from ponds and wells located in the area are estimated to be 12.8 and 176 million cubic meters per year, respectively.

Discussion and Conclusion

A comparison of water needs and available resources indicates that the total water shortage in the Tajan Basin is 166, 231, and 324 million cubic meters in normal, dry, and very dry years, respectively. Similarly, in the Tajan Plain area, the shortages are estimated at 147, 212, and 305 million cubic meters for the same conditions. In other words, in a normal or normal water year, there is a water shortage of about 150 million cubic meters in the irrigation network and the Tajan Plain area. The reduction in available water resources, including decreased outflow from the Shahid Rajaee Dam, leads to resource constraints and consequently causes water shortages in the lands of the Tajan Plain. In the dry water year, the water shortage was mainly due to the decrease in discharge from the Shahid Rajaee reservoir dam and the rivers of the middle basin. Therefore, in addition to the necessity of managing water distribution and scheduling, as well as improving the Tajan irrigation network, which will partially reduce the amount of damage caused by water shortage, the construction of the planned dams on the Zaremroud and Chahardangeh rivers is very important in regulating the monthly discharge.

Keywords: Basin, Shahid Rajaee Dam, Tajan River, Water resources, Water uses

نگرشی بر وضعیت منابع و مصارف حوضه آبریز تجن

ملیحه اکبری^۱ - مجتبی فرهادزاده^۱ - پریسا ملک^۱ 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

چکیده

ناهماهنگی وضعیت منابع و مصارف آب یکی از چالش‌های اصلی در توسعه پایدار به شمار می‌رود. در این مطالعه با مقایسه منابع و مصارف مختلف در حوضه آبریز تجن تلاش شده است تا تعادل بین آنها بررسی و میزان کمبودها مشخص شود. در این راستا از اطلاعات آماربرداری ایستگاه‌های آب سنجی رودخانه‌ها، آمار ورودی و خروجی سد شهید رجائی طی دوره ده ساله ۱۳۹۰-۱۴۰۰ و اطلاعات منابع آب زیرزمینی منطقه استفاده شده است. نیاز سالانه کشاورزی و آبی‌پروری، شرب و محیط‌زیستی حوضه آبریز تجن به ترتیب معادل ۵۹۸، ۶۸/۷ و ۱۰۰ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است. منابع آب در دسترس شامل آب تنظیمی سد شهید رجائی، جریان به‌هنگام رودخانه‌های حوضه میانی، ذخیره آب‌بندان‌ها و منابع آب زیرزمینی است. برای مقایسه مصارف با منابع آب قابل دسترس از سه سطح مقایسه شامل سال آبی نرمال، خشک و خیلی خشک استفاده شده است. حجم آب قابل استحصال از سد شهید رجائی در شش ماهه اول سال برای سال آبی نرمال، خشک و خیلی خشک به ترتیب معادل ۲۳۱، ۱۹۴ و ۱۲۲ میلیون متر مکعب است. حجم آب قابل استحصال از آب‌بندان‌ها و چاه‌های واقع در محدوده نیز به ترتیب ۱۲/۸ و ۱۷۶ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است. نتایج حاصل از مقایسه نیازها و منابع آب موجود نشان می‌دهد که میزان کمبود آب در کل حوضه آبریز تجن در سال‌های آبی نرمال، خشک و خیلی خشک به ترتیب ۱۶۶، ۲۳۱ و ۳۲۴ میلیون متر مکعب است.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبریز، رودخانه تجن، سد شهید رجایی، مصارف آبی، منابع آب

مقدمه

و مصارف آب و همچنین رعایت اولویت‌های تخصیص به نیازهای آبی مختلف، استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب بسیار مفید است (Nicklow et al., 2010; Li & Zhang, 2015; Zhou et al., 2017; Degefu et al., 2015). مدل‌ها این فرصت را فراهم می‌کنند که فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط با منابع آب و روابط موجود بین نقاط عرضه و تقاضا، شبیه‌سازی شوند. دانش یزدی و ملائکه (Danesh Yazdi & Malaek, 2023). وضعیت منابع و مصارف کشاورزی را در حوضه آبریز مهاباد واقع در بخش جنوبی دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار دادند. آنها با توسعه دو مدل هیدرولوژیکی و اقتصادی، تأثیرات تغییرات اقلیم را بر منابع آب و اقتصاد کشاورزی محدوده مطالعاتی مهاباد برآورد کردند و راهکارهای سیاستی متناسب با تغییرات الگوی کشت ارائه دادند. یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2023) با استفاده از مدل

آب نیاز اولیه و اساسی برای حفظ بقا، توسعه صنایع و رونق اقتصادی می‌باشد. به عبارتی دیگر کلید توسعه در گرو گسترش منابع آب و استفاده بهینه از آن است. برای رسیدن به این مهم، تخصیص صحیح منابع آب به مصارف مختلف بر اساس اولویت‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است (Loucks & Van Beek, 2017). انجام هرگونه برنامه‌ریزی مدیریتی برای کنترل مصارف آب در بخش کشاورزی نیازمند درک صحیح از تأثیرپذیری متغیرهای کنترل‌کننده منابع و مصارف آب از یکدیگر به منظور حصول اطمینان از تأمین نیازهای آبی کشاورزی به صورت بهینه و همچنین تضمین بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزان است (Veysel, 2024, Valizadegan, 2018 Yazdanpanah, & Yazdanpanah, 2018). با توجه به پیچیدگی‌های مدیریت منابع

^۱ - شرکت آب منطقه‌ای مازندران، شرکت مدیریت منابع آب، وزارت نیرو، ایران

(*) - نویسنده مسئول: (Email: Maleki@mzrw.ir)

می شود که از کوه‌های هزار جریب و چشمه سارهای متعدد دهستان پشتکوه سرچشمه گرفته و پس از عبور از شهر ساری در فرح آباد به دریای خزر می‌ریزد. کل حوضه آبریز این رودخانه تا ورودی به دشت با مساحت حدود ۴۰۵۰ کیلومتر مربع و محدوده دشت تجن با مساحت حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع، به عنوان محدوده مورد مطالعه برای بررسی منابع و مصارف آب در نظر گرفته شده است. بالاترین تراز محدوده ۳۷۰۰ متر و کمترین آن در محدوده دشت حدود ۲۰- متر می‌باشد. متوسط بارندگی محدوده ۶۰۳ میلی‌متر است که از نظر آب و هوایی جزو اقلیم معتدل طبقه‌بندی می‌گردد. مسیر رودخانه از سرچشمه تا ۸ کیلومتری ساری کوهستانی و پس از عبور از این محل جلگه‌ای می‌گردد. به رودخانه تجن سه رودخانه اصلی (رودخانه‌های حوضه میانی) شامل زارم رود، چهار دانگه و لاجیم رود تخلیه می‌گردد. سد مخزنی شهید رجائی که در دهه ۷۰ شمسی به بهره‌برداری رسید به عنوان منبع اصلی ذخیره آب شبکه آبیاری پائین دست و تأمین کننده نیاز شرب و صنعت منطقه محسوب می‌گردد. در شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

روش مطالعه

در این مطالعه از اطلاعات آماربرداری دراز مدت ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه‌های زارم رود (ایستگاه گرم رود)، لاجیم (ایستگاه واستان)، چهاردانگه (ایستگاه ورنه)، تجن (ایستگاه کردخیل) و همچنین از آمار ورودی و خروجی سد شهید رجائی (طی دوره بهره برداری ده ساله ۱۳۹۰-۱۴۰۰) به عنوان منبع اصلی تأمین آب حوضه تجن استفاده شده است. درخصوص منابع آب زیرزمینی (چاه‌ها) از اطلاعات اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای مازندران در سال ۱۴۰۰ و همچنین مطالعات پایه منابع آب بهره گرفته شده است. برای آبندها نیز از نتایج حاصل از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای جدید در قالب نقشه کاربری اراضی استفاده شده است.

نتایج و بحث

کاربری اراضی

کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه (حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت و دشت تجن) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (تصاویر لندست و بینگ سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲) مشخص شده است (جدول ۱). بر اساس این جدول مساحت حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت حدود ۴۰۵۰ کیلومتر مربع است که بیش از ۸۰ درصد این بخش تحت پوشش اراضی جنگلی با تراکم متراکم و تنک و مرتع در ارتفاعات می‌باشد. در اراضی کشاورزی دشت تجن، کشت برنج به عنوان کشت غالب و اصلی به شمار می‌رود.

WEAP-MABIA به ارزیابی عرصه و تقاضای منابع آب حوضه آبریز گذارچای نقده پرداختند. ایشان چهار سناریوی مدیریتی را برای ارزیابی اثرات آنها بر روی منابع آب مورد آزمون قرار دادند. نتایج نشان داد که مداخلات مثبت در سیاست‌های آبی منطقه تأثیر بسزایی در بهبود وضعیت منابع آب حوضه خواهد داشت. میرزایی ارجنکی و همکاران (Mirzaei Arjenaki et al., 2021) منابع آب زیرزمینی و مصارف آبی محصولات کشاورزی دشت میان آب شوشتر را با استفاده از مدل سازی آب زیرزمینی در قالب ۳ سناریو مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در سناریوی سوم با کاهش ۳۵ درصدی پمپاژ و انتقال آب از شبکه به اراضی جنوب دشت، مقدار زیادی از آب مازاد بر نیاز مصرفی مدیریت گردید. تولائی نژاد و همکاران (Tolaei Nejad et al., 2009) با بررسی وضعیت منابع و مصارف آب در استان خوزستان، بیلان منابع آبی سطحی و زیرزمینی حوضه‌های آبریز موجود در استان را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. فدایی زاده و شوریان (Fadaeizadeh & Shourian, 2019) هم مدیریت منابع و مصارف آب را از طریق کمی سازی نیازهای کشاورزی با ترکیب مدل شبیه سازی و الگوریتم بهینه سازی تحت شرایط مطلوب برای برآوردن معیارهای قابلیت اطمینان بررسی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که مصارف کشاورزی در حوضه می‌بایست بیش از ۵۰ درصد کاهش یابد تا بتوان به سطوح اطمینان مطلوب برای تأمین آب دست یافت. لقب دوست آرانی و همکاران (Laghbodoust Arani et al., 2023) به بررسی اثر سد ملاصدرا روی منابع و مصارف دشت کامفیروز و سد درودزن در شمال استان فارس پرداختند و در نهایت پیشنهاد کردند که به دلیل تعطیل شدن تعداد زیادی از ایستگاه‌های هیدرومتری به خصوص در ورودی سد درودزن و دشت کامفیروز، از نتایج مطالعه آنها برای بررسی وضعیت منابع آب منطقه در سال‌های آتی استفاده شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی و مقایسه منابع آب در دسترس و مصارف شامل نیازهای کشاورزی، شرب و صنعت و محیط زیستی برای حوضه آبریز تجن شامل دو بخش دشت تجن و حوضه آبریز رودخانه تا ورودی به دشت در فصل بهره‌برداری است. با مقایسه منابع آب در دسترس و نیازها این امکان فراهم گردید تا کمبود احتمالی تأمین آب در ماه‌های مختلف مشخص شده و توصیه‌هایی جهت مدیریت بهره‌برداری و توزیع آب با توجه به میزان تخصیص آب و الگوی کشت ارائه شود (Pendarm Consulting Engineers, 2023).

مواد و روش‌ها

موقعیت محدوده

رودخانه تجن یکی از رودخانه‌های مهم استان مازندران محسوب



Figure 1- Location map of the study area

جدول ۱- کاربری اراضی محدوده حوزه آبریز رودخانه تجن (مساحت به هکتار)

Table 1- Land use in the Tajan river basin area (Area in hectares)

نوع کاربری Land use type	حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت Up to the entry point of the plain	اراضی دشت تجن Lands of the Tajan plain	محدوده کلی طرح Overall project area
شالیزار Paddy field	7585	27150	34735
باغات Orchards	9185	27815	37000
سایر کشت‌ها (آبی و دیم) Other croplands (Irrigated and rainfed)	49588	5112	54700
آب‌بندان Traditional water reservoir	161	4976	5137
استخر پرورش ماهی Fish farming pond	11	555	566
مسکونی و تأسیسات Residential areas and facilities	5600	6693	12293
مناطق شهری Urban areas	730	2927	3657
معادن Mines	117	36	153
سایر اراضی (جنگل، مرتع، بایر و بستر رودخانه) Other lands (Forest, rangeland, barren land, and riverbed)	332668	1062	333730
جمع Total	405645	76326	481971

الگوی کشت منطقه

حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت

در محدوده حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت به دلیل

محدودیت توپوگرافی و اینکه بخش عمده از اراضی این محدوده را اراضی جنگلی و مرتع تشکیل می‌دهد، کشاورزی به صورت محدود و عموماً به صورت کشت دیم (گندم و جو) صورت می‌گیرد. البته در

در اراضی دشت تجن حدود ۵۰۰۰ هکتار تحت عنوان سایر کشت وجود دارد که محصولات متنوعی نظیر گندم و جو (عمدتاً گندم)، دانه‌های روغنی (سویا و کلزا)، محصولات جالیزی و سبزیجات، شیدر و ذرت علوفه‌ای در آن کشت می‌گردد. آبیاری بخشی از این اراضی از طریق سامانه‌های آبیاری تحت فشار (بارانی) انجام می‌گیرد و در سایر موارد آبیاری داخل مزارع به صورت سنتی و غرقابی است.

باغات واقع در محدوده دشت تجن عموماً از نوع مرکبات و برخی از نوع سیاه ریشه (درختان هلو) هستند. آبیاری باغات عمدتاً از طریق برداشت آب از چاه‌ها می‌باشد. حدود ۷۰ درصد مساحت باغات در منطقه از چاه استفاده می‌کنند و ۳۰ درصد باقی از طریق شبکه تجن و رودخانه‌ها برداشت آب انجام می‌دهند. آب مورد نیاز باغات در بخش کوهستانی عموماً از طریق بارندگی و یا آب چشمه‌ها تأمین می‌شود و لذا در محاسبات بیلان آبی و نیاز آبی فقط ۱۰ درصد از باغات بخش کوهستانی به صورت آبی (تأمین آب از طریق رودخانه‌ها، چاه‌ها و یا سیستم تجن) در نظر گرفته شده است. براساس جدول ۳ در کل محدوده شامل حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت و اراضی دشت تجن جمعاً ۱۱۹۸۰۰ هکتار اراضی کشاورزی (زراعی و باغی) خالص به صورت کشت آبی و دیم وجود داشته که از این مقدار ۷۴۵۰۰ هکتار (معادل ۶۲ درصد) به صورت کشت آبی و مابقی (معادل ۳۸ درصد) به صورت کشت دیم وجود دارد.

اراضی حاشیه‌ای (تراس) رودخانه‌ها منتهی به رودخانه تجن اراضی شالیزاری به صورت پراکنده وجود داشته که با برداشت آب از رودخانه (توسط انهار سنتی منشعب) و یا در برخی مواقع از طریق پمپاژ از چاه‌ها آبیاری می‌شوند. طبق جدول ۲ در محدوده حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت ۷۵۸۵ هکتار شالیزاری است که سهم هر یک از زیر حوضه‌ها در این جدول مشخص شده است.

اراضی دشت تجن

اراضی دشت تجن با مساحت حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع به عنوان قطب کشاورزی در منطقه شامل کشت برنج (کشت اصلی و غالب)، باغات و سایر کشت‌ها است. کشت برنج در اراضی دشت تجن به عنوان کشت اصلی صورت می‌گیرد که بخش عمده از سهم آب زراعی از شبکه آبیاری تجن و سایر منابع آب قابل دسترس نظیر آب‌بندان‌ها و چاه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. در اراضی دشت تجن عمدتاً عملیات تهیه خزانه و عملیات آب‌تخت و نشاء در فروردین و اردیبهشت و برداشت محصول از مرداد ماه تا اواخر شهریور ماه انجام می‌شود. کشت دوم برنج نیز در منطقه رایج بوده و به صورت نشاء مجدد و یا از طریق پرورش ساقه (روتون) از رونق نسبتاً بالایی برخوردار است.

جدول ۲- مساحت شالیزاری زیر حوضه‌های رودخانه تجن (اراضی بالادست)

Table 2- Area of rice fields in the sub-basins of the Tajan river (Upstream lands)

محدوده	زارم رود	لاجیم	چهار دانگه	دودانگه	حدفاصل کوهستان و دشت	جمع
Area	Zaremrud	Lajim	Chahardangeh	Dodangeh	Between mountains and plain	Total
مساحت Area (hectare)	1347	500	1510	2327	1901	7585

جدول ۳- وضعیت کشت آبی و دیم در کل محدوده طرح

Table 3- Status of irrigated and rainfed cultivation in the EnJulye study area

وضعیت کشت	نوع کشت	مساحت خالص
Cultivation status	Type of cultivation	Neta (Hectares)
آبی Irrigated	شالیزار	33000
	Rice fields	
	باغات	27300
	Gardens	
جمع آبی Total Irrigated	سایر کشت‌ها	14200
	Other crops	
	-	74500
دیم Rainfed	باغات	7800
	Gardens	
	سایر کشت‌ها	37500
جمع دیم Total Rainfed	Other crops	
	-	45300

نیازها و مصارف آبی

مصارف کشاورزی

مصارف کشاورزی شامل نیاز خالص و ناخالص است.

– نیاز خالص:

برای برآورد نیاز آبی محصولات زراعی و باغی کل محدوده از اطلاعات حاصله از سامانه تعیین نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی که در شهریور ماه ۱۴۰۱ توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب رونمایی گردید، استفاده شده است. در قالب سامانه مذکور با بهره‌گیری از اطلاعات هواشناسی درازمدت ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم‌شناسی و داده‌های فنولوژی گیاهی و اطلاعات فیزیکی و هیدرولیک خاک، نیاز آبی محصولات زراعی و باغی برای مناطق مختلف کشور محاسبه شده است. در جدول ۴ نیاز خالص محصولات مختلف کل محدوده

راندمان آبیاری

شبکه آبیاری تجن: شبکه آبیاری و زهکشی تجن (واقع در محدوده دشت تجن) با قدمت حدود بیست سال از جمله شبکه‌های آبیاری و زهکشی است که اگر چه عمر طولانی از ساخت و بهره برداری آن سپری نشده است، ولی به لحاظ مشکلات ناشی از نگهداری امکانات و همچنین توزیع مناسب آب با محدودیت‌هایی مواجه است. راندمان انتقال و توزیع و بهره‌برداری برای این شبکه ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- نیاز خالص آب آبیاری محصولات مختلف زراعی و باغی کل محدوده حوضه تجن (متر مکعب در هکتار)

Table 4- Net irrigation water requirement of different agricultural and horticultural crops in the EnJulye Tajan basin (m³/ha)

محصول Product	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	جمع گرد شده Rounded total
برنج (طارم محلی) Rice (Local Tarom)	690	900	1300	1430	910	-	-	-	-	-	-	-	5230
برنج (پر محصول) Rice (High yield)	690	900	1300	1430	1360	450	-	-	-	-	-	-	6130
باغات (مرکبات) Gardens (Citrus)	120	300	790	780	580	300	20	0	0	0	0	0	2890
گندم Wheat	480	845	397	-	-	-	-	0	0	0	0	0	1720
جو Barley	397	773	423	-	-	-	-	-	-	0	0	0	1590
ذرت علوفه‌ای (تابستانه) Forage corn (Summer)	-	-	-	444	627	684	254	-	-	-	-	-	2009
سویا (تابستانه) Soybean (Summer)	-	-	-	297	1175	867	77	-	-	-	-	-	2415
کلزا Rapeseed	458	836	200	-	-	-	0	0	0	0	0	0	1495
شیدر بهاره Spring Clover	110	315	1230	1390	1400	200	-	-	-	-	-	-	4645
سیاه ریشه (هلو) Stone fruits (Peach)	70	170	610	690	570	400	60	0	0	0	0	0	2570
محصولات جالبیزی Vegetable crops	-	280	915	1330	1000	-	-	-	-	-	-	-	3525
سبزیجات Vegetables	-	190	1115	995	-	-	-	-	-	-	-	-	2300
کشت دوم برنج (نشاء مجدد) Second rice crop (Transplanting)	-	-	-	150	2000	700	200	-	-	-	-	-	3050
کشت دوم برنج (پرورش ساقه) Second rice crop (Stalk cultivation)	-	-	-	-	1000	700	200	-	-	-	-	-	1800

می‌پذیرد. آب استخرهای پرورش ماهی واقع در محدوده دشت تجن عمدتاً از جریان‌های سطحی منشعب از شبکه تجن و برخی هم از چاه تأمین می‌شود. همچنین برخی از آب‌بندان‌های واقع در محدوده نیز دارای کاربرد دو منظوره می‌باشند که در محاسبات نیاز آبی پروری در نظر گرفته شده‌اند. این آب‌بندان‌ها دارای مساحت حدود ۳۰۰۰ هکتار و نیاز آبی ۴۷/۷ میلیون متر مکعب می‌باشند. حجم آبیگری یک هکتار استخر معادل ۱۲۰۰۰ متر مکعب در هکتار و برای آب‌بندان‌ها با متوسط عمق ۲ متر معادل ۱۶۰۰۰ متر مکعب در هکتار برآورد شده است. مجموع نیاز آبی آبی پروری در محدوده دشت تجن حدود ۵۴/۳ میلیون متر مکعب است.

بر اساس جدول ۸، نیاز کل آبی محدوده دشت تجن (کشاورزی و آبی‌پروری) معادل ۴۹۲ میلیون متر مکعب و در بخش اراضی بالادست (حوضه آبریز تجن تا ورودی به دشت) حدود ۱۰۶ میلیون متر مکعب برآورد شده است. نیاز کشاورزی و آبی‌پروری محدوده دشت تجن حدود ۸۲ درصد نیاز کل محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

نیاز شرب و صنعت

نیاز شرب و صنعت محدوده مورد مطالعه از مطالعات طرح جامع آب شرب و صنعت استان مازندران (Engineers, 2015) برای شهرستان‌های ساری و میاندرد و شهر کیا سر برای سال ۱۴۲۵ استخراج گردیده است (جدول ۹). بر اساس این جدول نیاز کل شرب و صنعت و شرب گردشگری شهرستان‌های محدوده ۶۸/۷ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است. این در حالی است که طبق مجوز تخصیص آب سد شهید رجائی (Water allocation permit for Shahid Rajaei) این میزان معادل ۴۲ میلیون متر مکعب (۳۰ میلیون متر مکعب شرب و ۱۲ میلیون متر مکعب صنعت) می‌باشد. لذا بخشی از این کمبود می‌بایست از طریق تخصیص آب سدهای در دست مطالعه و اجرا نظیر سد زارم رود و سد چهاردانگه (برای شهر کیا سر و روستاهای مسیر) پیش‌بینی و تأمین گردد.

نیاز محیط‌زیست

طبق اعلام شرکت آب منطقه‌ای مازندران، نیاز محیط‌زیستی برآورد شده رودخانه تجن بابت پایدارسازی جریان و همچنین حفظ شرایط تخم‌ریزی ماهی‌ها در محل ورودی به دریا و هم تأمین نیاز آبی مرکز تحقیقات شیلات سالانه معادل ۱۰۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. از آنجایی که میزان آب قابل‌دسترس از طریق بیان آبی در محل خروجی سد شهید رجائی و ایستگاه کردخیل (در پائین دست و در محدوده مصب) محاسبه شده است و همواره مقداری جریان با

با توجه به اینکه شیوه آبیاری در اراضی شالیزاری به گونه‌ای است که آب به صورت کرت به کرت هدایت می‌شود و از طرفی نفوذ عمقی به دلیل ایجاد شرایط اشباع خاک جزو تلفات آب محسوب نمی‌گردد، لذا با در نظر گرفتن استفاده مجدد از آب برگشتی راندمان مزرعه معادل ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است. در محدوده دشت تجن عموماً باغات از طریق برداشت آب از چاه‌ها تأمین می‌گردند، لذا راندمان انتقال و توزیع در این خصوص دخالتی نداشته و راندمان کاربرد آب در مزرعه با استفاده از سامانه تحت فشار معادل راندمان کلی آبیاری بوده و به میزان ۷۰ درصد پیش‌بینی می‌شود. درخصوص باغاتی که از طریق برداشت از شبکه تجن آبیاری می‌گردند، با احتساب راندمان انتقال و توزیع میزان راندمان کل در این باغات معادل ۵۷ درصد در نظر گرفته شده است.

شبکه سنتی آبیاری: شبکه انهار سنتی مربوط به محدوده حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت بوده و عموماً اراضی شالیزاری زیرحوضه‌های رودخانه تجن و سایر کشت‌ها را در بر می‌گیرد. با بررسی صورت گرفته عموماً در انهار اصلی به دلیل عدم به کارگیری سازه‌های کنترل جریان و سازه‌های آبیگر مجهز به دریچه‌های هیدرومکانیکال میزان تلفات بهره‌برداری غالب می‌باشد، لذا راندمان آبیاری آنها ۴۰ تا ۴۵ درصد در نظر گرفته شده است.

- نیاز ناخالص:

با توجه به راندمان آبیاری برای اراضی واقع در محدوده دشت تجن که تحت پوشش شبکه آبیاری تجن بوده و همچنین اراضی بالادست شامل اراضی کشاورزی واقع در محدوده حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت (شبکه سنتی) نیاز ناخالص هر یک از محصولات زراعی و باغی به شرح جدول ۵ محاسبه شده است. ۷۰ درصد از باغات محدوده دشت تجن تحت پوشش چاه‌ها و ۳۰ درصد مابقی تحت پوشش شبکه تجن و رودخانه در نظر گرفته شده است.

نیاز کلی آبیاری محصولات کشاورزی و آبی‌پروری

نیاز آبیاری اراضی کشاورزی محدوده دشت تجن و اراضی حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. سطح ارائه شده در جدول‌های کاربری اراضی به صورت ناخالص بوده که با اعمال ضریب ۰/۹۵ به سطوح مذکور (بابت جاده دسترسی بین مزارع و سایر مستحذات داخل مزارع) سطح خالص استخراج و مبنای محاسبه نیاز کلی آبیاری قرار گرفته است. در محدوده دشت تجن استخرهای پرورش ماهی با مساحت کل ۵۵۰ هکتار وجود دارند که نیاز آبی آنها حدود ۶/۶ میلیون متر مکعب تخمین زده شده است. دوره پرورش ماهیان مذکور ۶ تا ۹ ماه با عملکرد ۴ تن در هکتار بوده و آبیگری استخرهای مذکور طی ماه‌های دی، بهمن و اسفند انجام

همچنین بر اساس مطالعات انجام شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست و مصوبات کمیته تخصصی استانی احیای تالاب میانکاله، حداقل نیاز آبی محیط زیستی تالاب میانکاله از منابع آب شیرین نیز ۳۸۰ میلیون متر مکعب اعلام شده است که با توجه به وضعیت نامناسب منابع آبی رودخانه های منتهی به تالاب می بایست از حوضه های مجاور از جمله تجن تأمین گردد.

هدف تأمین موارد اشاره شده در فوق از محل ایستگاه کردخیل به پائین دست رهاسازی جریان صورت می گیرد، لذا در سال آبی متوسط یا نرمال کمبود جریان بابت محیط زیست وجود ندارد. ولی در سال های خشک و خیلی خشک با متوسط آبدهی سالانه حدود ۵۵ میلیون متر مکعب، کمبود سالانه حدود ۴۵ میلیون متر مکعب جهت تأمین نیاز محیط زیستی رودخانه تجن در پائین دست وجود دارد.

جدول ۵- توزیع ماهانه نیاز ناخالص محصولات (متر مکعب در هکتار)
Table 5- Monthly distribution of gross water requirement of crops (m³/ha)

محدوده Area	نام محصول Product name	فروردین Arvil	اردیبهشت May	مرداد June	مهر July	آبان August	آذر September	دی October	بهمن November	اسفند December	فروردین January	اردیبهشت February	مهر March	جمع گرد شده Total Rounded
محدوده دشت (شبکه آبیاری تجن) Plain area (Tajan irrigation network)	حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت (شبکه آبیاری سنتی) Tajan river basin up to plain entrance (Traditional irrigation network)	برنج Rice	1530	2000	2900	3200	2300	300	-	-	-	-	-	12230
	باغات (سیاه ریشه) Gardens (Stone fruits)	175	425	1525	1725	1425	1000	150	0	0	0	0	0	6425
	گندم Wheat	1200	2100	990	-	-	-	-	0	0	0	0	0	4290
	جو Barley	990	1930	1050	-	-	-	-	-	0	0	0	0	3970
	برنج Rice	1210	1580	2280	2500	1830	240	-	-	-	-	-	-	9640
	گندم Wheat	905	1590	750	-	-	-	-	0	0	0	0	0	3245
	جو Barley	210	1450	800	-	-	-	-	0	0	0	0	0	2460
	ذرت علوفه ای (تابستانه) Forage corn (Summer)	-	-	-	840	1200	1290	480	-	-	-	-	-	3810
	سویا (تابستانه) Soybean (Summer)	-	-	-	560	2220	1640	145	-	-	-	-	-	4565
	کلزا Rapeseed	860	1600	380	-	-	-	0	0	0	0	0	0	2840
	شیدر Clover	210	590	2320	2620	2640	380	-	-	-	-	-	-	8760
	سیاه ریشه Stone Fruits	106	257	924	1045	865	600	90	0	0	0	0	0	3887
	سبزیجات Vegetables	-	360	2100	1900	-	-	-	-	-	-	-	-	4360
	کشت دوم برنج (نشاء مجدد) Second rice crop (Transplanting)	-	-	-	260	3500	1230	350	-	-	-	-	-	5340
	کشت دوم برنج (پرورش ساقه) Second rice crop (Stalk Cultivation)	-	-	-	-	1750	1230	350	-	-	-	-	-	3330
	محصولات جالیزی Vegetable crops	-	530	1720	2500	1900	-	-	-	-	-	-	-	6650
	باغات (مرکبات) Gardens (Citrus)	180	455	1200	1180	880	450	30	0	0	0	0	0	4375

جدول ۶- نیاز آبیاری اراضی کشاورزی محدوده دشت تاجن (میلیون متر مکعب)

Table 6- Irrigation water requirement of agricultural lands in the Tajan plain area (MCM)

محصول Product	سطح خالص Net Area (Hectares)	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	جمع گرد شده Total Rounded
برنج Rice	25800	31.2	40.8	58.8	64.5	47.2	6.2	-	-	-	-	-	-	249.0
باغات (مرکبات) Gardens (Citrus)	22460	4.04	10.2	26.9	26.5	19.7	10.1	0.67	-	-	-	-	-	98.0
سیاه ریشه Stone fruits	3964	0.42	1.01	3.7	4.1	3.4	2.4	0.35	0	0	0	0	0	15.5
گندم Wheat	1000	0.9	1.6	0.7	-	-	-	-	0	0	0	0	0	3.0
ذرت علوفه‌ای Forage corn	1200	-	-	-	1.0	1.4	1.5	0.6	-	-	-	-	-	4.5
شبدر Clover	1200	0.3	0.7	2.8	3.1	3.1	0.5	-	-	-	-	-	-	10.5
سویا Soybean	500	-	-	-	0.3	1.1	0.8	0.1	-	-	-	-	-	2.0
کلزا Rapeseed	500	0.4	0.8	0.2	-	-	-	0	0	0	0	0	0	1.5
محصول جالبزی Vegetable crops	200	-	0.1	0.3	0.5	0.4	-	-	-	-	-	-	-	1.5
سبزیجات Vegetables	200	-	0.1	0.4	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0
کشت مجدد (ذرت علوفه‌ای) Re-cultivation (Forage corn)	1000	-	-	-	0.8	1.2	1.3	0.5	-	-	-	-	-	4.0
کشت دوم برنج Second rice crop	10000	-	-	-	1.3	26.2	12.3	3.5	-	-	-	-	-	43.0
جمع Total	68100	37.3	55.3	93.8	102.5	103.7	35.2	5.7	-	-	-	-	-	433.5

جدول ۷- نیاز آبی اراضی کشاورزی حوضه آبریز رودخانه تاجن تا ورودی به دشت (میلیون متر مکعب)

Table 7- Water requirement of agricultural lands in Tajan river basin up to the plain entrance (MCM)

محصول Product	سطح خالص (Hec.) Net Area	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	جمع گرد شده Total Rounded
برنج Rice	5000	7.6	10.0	14.5	16.0	11.5	1.5	-	-	-	-	-	-	61.5
باغات (سیاه‌ریشه) Gardens (Stone fruits)	900	0.15	0.38	1.4	1.5	1.3	0.9	0.14	0	0	0	0	0	6.0
گندم Wheat	4700	5.6	9.8	4.6	-	-	-	-	0	0	0	0	0	20.0
جو Barley	4700	4.6	9.0	4.9	-	-	-	-	0	0	0	0	0	18.5
جمع Total	15300	18.0	29.1	25.4	17.5	13.0	2.5	-	-	-	-	-	-	106.0

جدول ۸- نیاز آبی کشاورزی و آبی پروری در کل محدوده مورد مطالعه (میلیون متر مکعب)
Table 8- Agricultural and aquaculture water needs in the enJulye study area (MCM)

محدوده Area	نیاز آبی Water requirement	Month ماه												جمع Total
		فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	
دشت تجن Tajan Plain	کشاورزی و آبی پروری Agriculture & Aquaculture	37.3	55.3	93.8	102.5	103.7	35.2	5.7	0	0	18.1	18.1	18.1	488.0
خارج از محدوده شبکه Outside Network Area	شالیزار Rice Fields	0.5	0.6	0.9	1.0	0.7	0.1	-	-	-	-	-	-	4.0
جمع Total		37.8	55.9	94.7	103.5	104.4	35.3	5.7	0	0	18.1	18.1	18.1	492.0
حوضه تجن تا ورودی به Tajan Basin up to Plain Entrance	کشاورزی Agriculture	18.0	29.1	25.4	17.5	13.0	2.5	-	-	-	-	-	-	106.0
محدوده کلی طرح Total Project Area		55.8	85.0	120.1	121.0	117.4	37.8	5.7	0	0	18.1	18.1	18.1	598.0

جدول ۹- نیاز شرب و صنعت سالانه شهرستان های ساری و میاندرد (میلیون متر مکعب)
Table 9- Annual drinking and industrial water demand of Sari and Miandorud counties (MCM)

شهرستان County	شرب Drinking	صنعت Industry	شرب گردشگری Tourism Drinking	جمع Total
ساری و میاندرد Sari and Miandorud	55.21	6.1	2.99	64.3
کیاسر Kiasar	1.34	3	0.08	4.42
جمع کل Total	56.55	9.1	3.07	68.72

منابع آب قابل دسترس

منابع آب در دسترس فعلی برای مصارف مختلف عبارت از جریان آب تنظیم شده از سد شهید رجائی، جریان به هنگام رودخانه های حوضه میانی، ذخیره آب بندها و منابع آب زیرزمینی است. قابل ذکر است که ناحیه مصرف نکارود در بخش غربی رودخانه تجن کوچک بوده و شبکه تجن آن را تحت پوشش قرار می دهد، لذا سیستم تجن از سیاهرود تا نکارود در نظر گرفته شده است.

آب قابل استحصال از سد شهید رجائی

جریان تنظیم شده از سد شهید رجائی منبع اصلی تأمین آب اراضی کشاورزی، شرب و صنعت اراضی پائین دست، به خصوص دشت تجن به شمار می رود. این سد که در ۴۵ کیلومتری جنوب غربی ساری واقع شده، با حجم مخزن ۱۶۱ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۷۸ به بهره برداری رسید.

انتخاب سال آبی هیدرولوژیک

به منظور مقایسه مصارف با منابع آب قابل دسترس از سه سطح مقایسه شامل سال آبی نرمال، خشک و خیلی خشک استفاده شده است. همچنین به منظور تشخیص وضعیت سال آبی هیدرولوژیک از آمار ده ساله (۱۳۹۰-۱۴۰۰) رودخانه های اصلی حوضه میانی (زارم رود و چهاردانگه، لاجیم و تجن) استفاده شده است (جدول ۱۰). متوسط آبدهی ده ساله (۱۳۹۰-۱۴۰۰) معادل سال آبی متوسط یا نرمال، سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ معادل سال آبی خشک و سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ معادل سال آبی خیلی خشک به عنوان شاخص های مقایسه ای براساس آمار رودخانه های مذکور و به خصوص آمار ورودی سد شهید رجائی به عنوان منبع اصلی تأمین کننده آب در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۰- وضعیت آبدهی رودخانه‌های حوضه میانی در محدوده مورد مطالعه
Table 10- Water discharge status of rivers in the central basin within the study area

نام رودخانه River name	دوره آماری Statistical period	وضعیت سال آبی Water year status	ماه (میلیون متر مکعب) Month (MCM)												جمع شش ماهه اول Total six-month period	جمع سالانه Annual total
			فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March		
زارم رود Zarem Road	1390-1400	نرمال Normal	27.6	14.7	8.4	4.6	4.2	4.9	8.9	9.8	10.1	9.6	13.5	24.4	64.4	140.7
	1396-1397	خیلی خشک Very dry	3.6	5.6	3.4	0.7	2.8	2.3	7.4	3.0	4.6	5.4	12.4	6.9	18.4	58.1
	1393-1394	خشک Dry	9.85	1.19	1.21	1.04	0.95	2.95	2.51	3.11	2.83	2.31	2.98	11.07	17.19	42.0
چهار دانگه Chahardangeh	1390-1400	نرمال Normal	17.7	9.5	4.8	4.9	5.0	4.9	6.6	6.6	9.2	7.8	11.9	16.1	46.7	105.0
	1396-1397	خیلی خشک Very dry	3.2	9.1	3.9	1.6	5.0	2.6	7.9	2.4	3.8	3.1	6.6	3.0	25.4	52.1
	1393-1394	خشک Dry	10.61	1.28	1.13	2.22	10.71	9.54	2.67	2.67	4.12	2.55	4.41	10.29	35.49	62.20
لاجم Lajim	1390-1400	نرمال Normal	3.4	1.5	0.8	0.5	0.5	0.7	1.0	2.1	2.0	1.6	3.0	4.0	7.3	21.3
	1396-1397	خیلی خشک Very dry	0.5	0.7	0.4	0.03	0.18	0.17	0.92	0.31	0.6	1.3	2.3	0.9	2.0	8.3
	1393-1394	خشک Dry	2.10	0.63	0.33	0.38	0.11	0.64	0.43	0.39	0.78	0.5	0.87	2.90	3.56	9.43
تاجان Tajan	1390-1400	نرمال Normal	50.6	14.7	4.28	4.4	7.5	8.4	17.0	24.6	29.8	19.3	33.6	47.0	89.9	261.2
	1396-1397	خیلی خشک Very dry	1.5	3.0	0.6	0.4	1.6	0.75	14.0	6.0	7.0	6.0	15.8	2.1	7.9	58.7
	1393-1394	خشک Dry	3.91	1.44	0.76	4.85	0.73	7.0	1.87	9.9	8.37	1.31	1.15	12.0	18.69	53.29

(رودخانه‌های حوضه میانی) تغییر می‌یابد. بر اساس جدول ۱۱ حجم آب قابل استحصال در کل محدوده مورد مطالعه در شش ماهه اول سال برای سال آبی نرمال معادل ۲۳۱ میلیون متر مکعب بوده که این میزان در سال آبی خشک به ۱۹۴ میلیون متر مکعب و در سال آبی خیلی خشک به ۱۲۲ میلیون متر مکعب کاهش می‌یابد.

آب قابل استحصال از آب‌بندان‌ها

در محدوده مورد مطالعه ۵۱۳۷ هکتار آب‌بندان وجود دارد که بیش از ۹۵ درصد آنها یعنی حدود ۵۰۰۰ هکتار در محدوده دشت تجن واقع شده است. این آب‌بندان‌ها عموماً از طریق نهرهایی از رودخانه تجن آبیگیری می‌کنند و به‌صورت محدود نیز (در حد ۱۰ درصد) از طریق آب باران تأمین آب می‌شوند. چون در برآورد آب قابل دسترس محدوده از روش بیلان آبی استفاده شده، لذا عملاً میزان آب قابل استحصال از آب‌بندان‌ها در محاسبات بیلان منظور گردیده و لذا در ادامه فقط حجم قابل تأمین از آب باران (در حد ۱۰ درصد اشاره

متوسط دبی سالانه درازمدت ۲۰ ساله ورودی به سد شهید رجائی معادل ۱۷۲ میلیون متر مکعب بوده که در ده سال اخیر به حدود ۱۷۹ میلیون متر مکعب رسیده است. لذا متوسط ده سال اخیر با تغییر ۴٪+ نسبت به میانگین درازمدت می‌تواند به‌عنوان معرف سال آبی نرمال در نظر گرفته شود. با استفاده از آمار آبدهی ورودی به سد، سه حالت شامل سال آبی متوسط یا نرمال، سال آبی خشک و سال آبی خیلی خشک در نظر گرفته شده است. در سال آبی خشک (۹۴-۱۳۹۳) با متوسط آبدهی سالانه ورودی به سد معادل ۱۲۳/۱ میلیون متر مکعب نسبت به میانگین درازمدت سالانه (۱۷۲ میلیون متر مکعب) دارای تغییر ۲۸/۴٪- بوده که این میزان برای سال آبی خیلی خشک (۹۷-۱۳۹۶) به ۴۴٪- رسیده است. در شکل ۲ سهم آبدهی سد شهید رجائی و رودخانه‌های حوضه میانی برای سال آبی نرمال و خشک نشان داده شده است. بر اساس این شکل در سال آبی نرمال سهم سد شهید رجائی و رودخانه‌های حوضه میانی تقریباً معادل هم بوده و این در حالی است که در سال آبی خشک به‌دلیل کاهش منابع آبی و از طرفی تأثیرگذاری سد، این نسبت به ۶۵٪ (سد شهید رجائی) و ۳۵٪

های واقع در دشت تجن و کل محدوده به ترتیب ۹۰ و ۱۷۶ میلیون متر مکعب برآورد شده است.

در شکل ۳ تغییرات سطح ایستایی آبخوان واقع در محدوده دشت تجن طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۴۰۰ (براساس اطلاعات اخذ شده از واحد مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای مازندران) ارائه شده است. تغییرات محدود سطح ایستایی طی ده سال مذکور نشان‌دهنده تعادل نسبی بین تخلیه و تغذیه می‌باشد. در سال ۹۷-۱۳۹۶ که مصادف با سال آبی خیلی‌خشک بوده است به دلیل بهره‌برداری زیاد از سفره‌های آب زیرزمینی افت سطح ایستایی بیش از سال‌های قبل و بعد می‌باشد. در جدول‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ توزیع ماهانه منابع آب قابل دسترس در کل محدوده مورد مطالعه و دشت تجن برای سال آبی متوسط، خشک و خیلی‌خشک ارائه شده است. در سال‌های خشک به دلیل کاهش آبدی سد شهید رجایی و حوضه میانی، میزان آب برگشتی کاهش یافته و سبب برداشت از طریق چاه‌های غیرمجاز در منطقه شده است. در جدول ۱۴ متوسط ضریب ۷۰ در صد برای حجم آب قابل دسترس آب‌بندان‌ها در سال آبی خیلی‌خشک اعمال شده است.

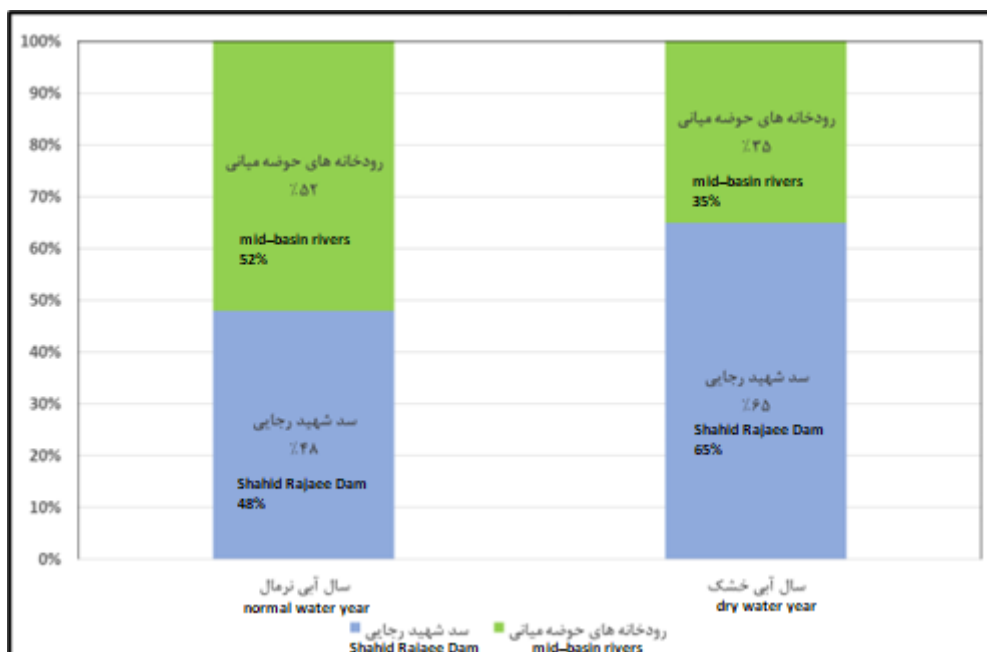
مقایسه منابع آب در دسترس و نیازها

در جدول ۱۵ و نمودار رسم شده در شکل ۴ مقایسه نیازها و منابع آب در دسترس برای کل محدوده مورد مطالعه و دشت تجن برای سال آبی متوسط یا نرمال، خشک و خیلی‌خشک نشان داده شده است.

شده) اعمال شده است. با در نظر گرفتن متوسط عمق ۲/۵ متر برای آب‌بندان‌ها، پتانسیل آب قابل ذخیره در آب‌بندان‌های کل محدوده و محدوده دشت تجن به ترتیب ۱۲۸ و ۱۲۵ میلیون متر مکعب است که از این حجم به میزان ۱۰ درصد (تأمین شده از آب باران) معادل ۱۲/۸ و ۱۲/۵ میلیون متر مکعب به عنوان آب قابل استحصال لحاظ شده است.

برداشت آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها

بر اساس اطلاعات اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای مازندران، تعداد چاه‌های موجود در دشت تجن و کل محدوده مورد بررسی در سال ۱۴۰۰ به ترتیب ۱۴۱۹۳ و ۱۹۸۶۰ می‌باشد. حدود ۷۰ درصد از چاه‌های واقع در محدوده دشت تجن برای باغات و مابقی برای کشت شالی استفاده می‌شوند. توزیع ماهانه برداشت آب از چاه‌ها (طبق آمار سازمان جهاد کشاورزی مازندران) برای باغات با کارکرد سالانه پمپاژ ۱۰۰۰ ساعت به ترتیب برای ماه‌های فروردین الی مهر ماه شامل ۱۰، ۱۵، ۳۲، ۲۴، ۱۱ و ۲ درصد و برای شالی (با کارکرد سالانه پمپاژ ۲۵۰۰ ساعت) برای ماه‌های فروردین الی مرداد ماه به ترتیب شامل ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۵ و ۱۵ درصد می‌باشد. با در نظر گرفتن موارد فوق و اعمال ضریب ۷۰ در صد برای باغات و ۳۰ در صد برای شالی، توزیع ماهانه کلی طی ماه‌های فروردین لغایت مهر ماه به ترتیب ۱۰، ۱۳، ۱۷، ۳۰، ۲۱، ۸ و ۱ درصد می‌باشد. میزان آب برداشتی از طریق چاه



شکل ۲- نمودار سهم آبدی سد شهید رجایی و رودخانه‌های حوضه میانی در سال آبی نرمال و خشک (شش ماهه اول سال)

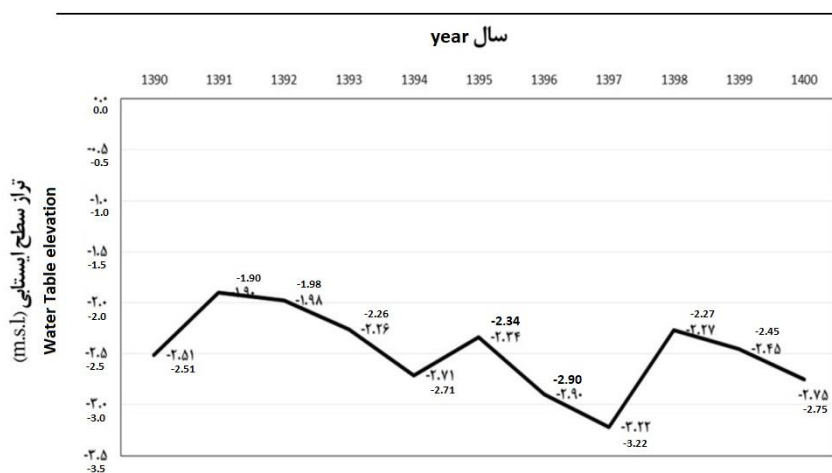
Figure 2- Diagram of the share of water discharge from Shahid Rajaei Dam and the rivers of the middle basin in normal and dry water years (first six months of the year)

جدول ۱۱- توزیع ماهانه آب قابل استحصال از سامانه سد شهید رجائی و رودخانه‌های حوضه میانی (میلیون متر مکعب)
Table 11- Monthly distribution of extractable water from the Shahid Rajaei Dam system and rivers in the central basin (MCM)

وضعیت Status	رودخانه River	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	جمع شش ماهه اول Total six-month
(سال آبی نرمال) 1390-1400 (Normal water year)	تجن (خروجی سد) Tajan (Dam output)	15.2	36.9	32.3	37.1	21.3	6.7	3.8	3.7	3.5	5.5	4.4	6.4	149.5
	لاجیم Lajim	4.8	2.1	1.1	0.7	0.7	0.67	0.98	2.17	2.05	1.63	3.08	4.08	10.1
	زارم رود Zarem Rood	38.6	20.58	11.7	6.48	5.92	4.9	8.9	9.8	10.1	9.64	13.5	24.4	88.18
	چهاردانگه Chahardangeh	24.75	13.3	6.72	6.86	6.97	4.87	6.63	6.6	9.17	7.82	11.9	16.1	63.47
	تجن (خروجی کردخیل) Tajan (Kordkheyl output)	45.5	13.2	3.9	4.9	6.8	7.5	16.95	24.6	29.8	19.34	33.62	47.0	80.0
	متوسط بیابان (رند شده) Average balance (Rounded)	38.0	60.0	48.0	47.0	28.0	10.0	3.0	0	0	5.0	0	4.0	231
(سال آبی خشک) 1393-94 (Dry water year)	تجن (خروجی سد) Tajan (Dam output)	3.31	42.1	36.9	35.4	15.3	3.5	2.7	2.7	2.6	2.7	2.7	2.6	136.5
	لاجیم Lajim	2.9	0.88	0.46	0.53	0.15	0.64	0.43	0.39	0.78	0.5	0.87	2.9	5.6
	زارم رود Zarem Rood	13.8	1.67	1.69	1.46	1.33	2.95	2.5	3.11	2.83	2.31	2.98	11.07	22.9
	چهاردانگه Chahardangeh	14.9	1.79	1.58	3.11	15.0	9.54	2.67	2.67	4.12	2.55	4.41	10.29	45.9
	تجن (خروجی کردخیل) Tajan (Kordkheyl output)	3.52	1.30	0.68	4.37	0.66	6.3	1.87	9.9	8.37	1.31	1.15	12.0	16.8
	متوسط بیابان (رند شده) Average balance (Rounded)	31.4	45.1	40.0	36.1	31.1	10.3	6.4	0	1.9	6.8	9.8	14.9	194
(سال آبی خیلی خشک) 1396-97 (Very dry water year)	تجن (خروجی سد) Tajan (Dam output)	3.62	13.31	13.24	27.22	5.67	3.088	3.71	3.68	3.66	3.68	3.7	3.63	66.9
	لاجیم Lajim	0.77	0.99	0.52	0.04	0.25	0.17	0.92	0.31	0.63	1.28	2.29	0.89	2.74
	زارم رود Zarem Rood	5.1	7.8	4.8	1.0	3.9	2.28	7.36	3.0	4.56	5.41	12.4	6.9	24.9
	چهاردانگه Chahardangeh	4.5	12.8	5.4	2.2	7.0	2.59	7.85	2.37	3.84	3.1	6.6	2.96	34.49
	تجن (خروجی کردخیل) Tajan (Kordkheyl output)	1.4	2.6	0.5	0.35	1.5	0.6	14	5.96	7.0	6.0	15.8	2.1	7.0
	متوسط بیابان (رند شده) Average balance (Rounded)	12.5	32.0	24.0	30.0	15.0	8.0	6.0	3.5	6.0	7.5	9.0	12.0	122

خشک میزان کمبود آب عمدتاً به دلیل کاهش خروجی دبی از سد مخزنی شهید رجائی و رودخانه‌های حوضه میانی همراه بوده، لذا علاوه بر ضرورت مدیریت توزیع آب و نوبت‌بندی و همچنین بهسازی شبکه آبیاری تجن که تا حدی میزان خسارت ناشی از کمبود آب را کاهش می‌دهد، احداث سدهای پیش‌بینی شده بر روی رودخانه‌های زارم رود و چهاردانگه در تنظیم دبی ماهانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بر اساس این جدول میزان کمبود آب در سال آبی نرمال، خشک و خیلی خشک در محدوده دشت تجن به ترتیب معادل ۱۴۷، ۲۱۲ و ۳۰۵ میلیون متر مکعب است. به عبارتی در سال آبی عادی یا نرمال در شبکه آبیاری و محدوده دشت تجن حدود ۱۵۰ میلیون متر مکعب کمبود آب وجود دارد. کمبود آب به دلیل کاهش منابع آب در دسترس از جمله خروجی سد شهید رجائی منجر به شرایط محدودیت منابع و در نتیجه کمبود آب در اراضی دشت تجن می‌گردد. در سال آبی



شکل ۳- تغییرات سطح ایستابی آبخوان آزاد ساری-نکا طی سال های ۱۳۹۰-۱۴۰۰ (محدوده دشت تجن)

Figure 3- Changes in the water table level of the Sari-Neka unconfined aquifer during the years 2011-2021 (Tajan Plain area)

جدول ۱۲- توزیع ماهانه آب قابل دسترس از منابع مختلف در وضع موجود یا در نظر گرفتن وضعیت متوسط آینده (سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۰)

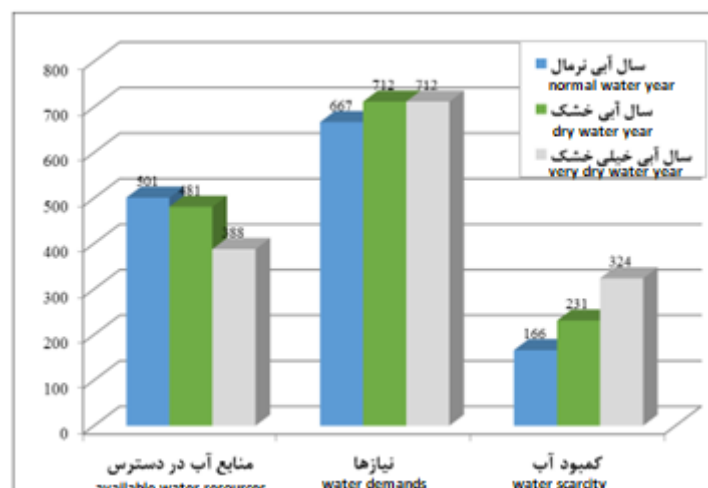
Table 12- Monthly distribution of available water from various sources under the current situation, considering the average flow condition (Water Year 2011-2021)

Flow condition (Water Year 2011-2021)														
محدوده Area	منابع تأمین آب Water supply sources	حجم ماهانه – میلیون متر مکعب Monthly volume – MCM												
		فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	جمع شش ماهه اول Total Six-Month
محبوده کلی طرح Enluye project area	جریان تنظیم شده از سد شهید رجائی و رودخانه‌های حوضه میانی Regulated flow from Shahid Rajaee Dam & Middle Basin Rivers	38.0	60.0	48.0	47.0	28.0	10.0	3.0	0	0	5.0	0	4.0	231.0
	آب‌بندها Water ponds	1.3	2.5	3.8	3.3	1.9	–	–	–	–	–	–	–	12.8
	چاه Wells	17.4	22.3	28.9	50.2	35.5	14.1	2.7	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	168.4
	آب برگشتی Return water	11.4	18	14.4	14.1	8.4	3.0	–	–	–	–	–	–	69.3
	جمع Total	68.1	102.8	95.1	114.6	73.8	27.1	5.7	1.02	1.02	6.02	1.02	5.02	481.5
	دشت تاجن Tajan plain	جریان تنظیم شده از سد شهید رجائی و رودخانه‌های حوضه میانی Regulated flow from Shahid Rajaee Dam & Middle basin rivers	38.0	60.0	48.0	47.0	28.0	10.0	3.0	0	0	5.0	0	4.0
آب‌بندها Water ponds		1.3	2.5	3.7	3.2	1.8	–	–	–	–	–	–	–	12.5
چاه Wells		9	11.5	15.0	26.4	18.5	7.2	1.1	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	87.6
آب برگشتی Return water		11.4	18	14.4	14.1	8.4	3.0	–	–	–	–	–	–	69.3
جمع Total		59.7	92.0	81.1	90.7	56.7	20.2	4.1	0.22	0.22	5.22	0.22	4.22	400.4

جدول ۱۳- توزیع ماهانه آب قابل دسترس از منابع مختلف در وضع موجود در سال آبی خشک ۱۳۹۳-۹۴

Table 13- Monthly distribution of accessible water from various sources in the current situation in dry water year 2014-2015

محدوده Area	منابع تأمین آب Water supply sources	حجم ماهانه - میلیون متر مکعب Monthly volume - MCM												جمع شش ماهه اول سال Total six-month
		فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	
محدوده کلی طرح EnJulye project area	جریان تنظیم شده از سد شهید رجائی و رودخانه‌های حوضه میانی Regulated flow from Shahid Rajaee dam & middle basin rivers	31.4	45.1	40.0	36.1	31.1	10.3	6.4	0	1.9	6.8	9.8	14.9	194.0
	آب‌بندان Water ponds	1.3	2.5	3.8	3.3	1.9	0	0	0	0	0	0	0	12.8
	چاه Wells	17.4	22.3	28.9	50.2	35.5	14.1	2.7	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	168.4
	آب برگشتی Return water	9.4	13.5	12.0	10.8	9.3	3.1	—	—	—	—	—	—	58.1
	جمع Total	59.5	83.4	84.7	100.4	77.8	27.5	9.1	1.02	2.9	7.8	10.8	15.9	433.3
دشت تاجان Tajan plain	جریان تنظیم شده از سد شهید رجائی و رودخانه‌های حوضه میانی Regulated flow from Shahid Rajaee dam & Middle basin rivers	31.4	45.1	40.0	36.1	31.1	10.3	6.4	0	1.9	6.8	9.8	14.9	194.0
	آب‌بندان Water ponds	1.3	2.5	3.7	3.2	1.8	—	—	—	—	—	—	—	12.5
	چاه Wells	9.0	11.5	15.0	26.4	18.5	7.2	1.1	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	87.6
	آب برگشتی Return water	9.4	13.5	12.0	10.8	9.3	3.1	—	—	—	—	—	—	58.1
	جمع Total	51.1	72.6	70.0	76.5	60.7	20.6	7.5	0.22	2.1	7.0	10.0	15.1	352.2



شکل ۴- منابع آب در دسترس و نیازهای کل محدوده مورد مطالعه در سال آبی نرمال، خشک و خیلی خشک (میلیون متر مکعب)

Figure 4- Available water resources and needs of the enJulye study area in normal, dry, and very dry water years (MCM)

جدول ۱۴- توزیع ماهانه آب قابل دسترس از منابع مختلف در وضع موجود در سال آبی خیلی خشک ۹۷-۱۳۹۶

Table 14- Monthly distribution of accessible water from various sources in the current situation in very dry water year 2017-2018

محدوده Area	منابع تأمین آب Water supply sources	حجم ماهانه - میلیون متر مکعب Monthly volume - MCM												جمع شش ماهه اول سال Total six-month period
		فروردین April	اردیبهشت Mav	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September	مهر October	آبان November	آذر December	دی January	بهمن February	اسفند March	
محدوده کل طرح EnJulye project area	جریان تنظیم شده از سد شهید رجایی و رودخانه‌های حوضه میانی Regulated flow from Shahid Rajaee dam & middle basin rivers	12.5	32.0	24.0	30.0	15.0	8.0	6.0	3.5	6.0	7.5	9.0	12.0	122.0
	آب‌بندان Water ponds	0.9	1.8	2.7	2.3	1.3	—	—	—	—	—	—	—	9.0
	چاه Wells	17.4	22.3	28.9	50.2	35.5	14.1	2.7	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	168.4
	آب برگشتی Return water	3.7	9.6	7.2	9.0	4.5	2.4	—	—	—	—	—	—	36.4
	جمع Total	34.5	65.7	62.8	91.5	56.3	24.5	8.7	4.5	7.0	8.5	10.0	13.0	336.0
دشت تجن Tajan plain	جریان تنظیم شده از سد شهید رجایی و رودخانه‌های حوضه میانی Regulated flow from Shahid Rajaee dam & middle basin rivers	12.5	32.0	24.0	30.0	15.0	8.0	6.0	3.5	6.0	7.5	9.0	12.0	122.0
	آب‌بندان Water ponds	0.9	1.8	2.6	2.2	1.3	—	—	—	—	—	—	—	8.8
	چاه Wells	9.0	11.5	15.0	26.4	18.5	7.2	1.1	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	87.6
	آب برگشتی Return water	3.7	9.6	7.2	9.0	4.5	2.4	—	—	—	—	—	—	36.4
	جمع Total	26.1	54.9	48.8	67.6	39.3	17.6	7.1	3.7	6.2	7.7	9.2	12.2	255.0

جدول ۱۵- مقایسه نیازها و منابع در سال آبی متوسط، خشک و خیلی خشک (میلیون مترمکعب)

Table 15- Comparison of needs and resources in average, dry, and very dry water years (MCM)

محدوده Area	سال آبی متوسط یا نرمال Average water year (Normal)			سال آبی خشک Dry water year			سال آبی خیلی خشک Very dry water year		
	نیازها Needs	منابع Resources	کمبود Shortage	نیازها Needs	منابع Resources	کمبود Shortage	نیازها Needs	منابع Resources	کمبود Shortage
کل محدوده EnJulye area	667.0	501.0	166.0	712.0	481.0	231.0	712.0	388.0	324.0
دشت تجن Tajan plain	561.0	414.0	147.0	606.0	394.0	212.0	606.0	301.0	305.0

نتیجه‌گیری

آبی محدوده دشت تجن (کشاورزی و آبی‌ری پروری) معادل ۴۹۲ میلیون متر مکعب بوده و در بخش اراضی بالادست (حوضه آبریز تجن تا ورودی به دشت) این نیاز معادل ۱۰۶ میلیون متر مکعب برآورد شده است. نیاز کل شرب، صنعت و شرب گردشگری منطقه (شهرستان‌های ساری و میاندرد و کیا سر)، ۶۸/۷ میلیون متر مکعب در سال است. نیاز محیط‌زیستی برآورد شده رودخانه تجن نیز معادل ۱۰۰ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. منابع آب در دسترس برای مصارف مختلف شامل جریان آب تنظیمی سد شهید رجایی، جریان به هنگام رودخانه‌های حوضه میانی، ذخیره آب‌بندان‌ها و منابع آب زیرزمینی

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در کل محدوده مورد مطالعه شامل حوضه آبریز رودخانه تجن تا ورودی به دشت و اراضی دشت تجن حدود ۱۱۹۸۰۰ هکتار اراضی کشاورزی خالص (زراعی و باغی) به صورت کشت آبی و دیم وجود دارد که ۷۴۵۰۰ هکتار آن به‌صورت کشت آبی و مابقی به‌صورت کشت دیم است. در محدوده دشت تجن استخرهای پرورش ماهی با مساحت کل ۵۵۰ هکتار وجود دارند که عموماً مربوط به ماهیان گرمابی هستند. همچنین برخی از آب‌بندان‌های واقع در محدوده برای آبی‌ری پروری هم استفاده می‌شوند. نیاز کل

آبیاری، بهبود راندمان انتقال و توزیع، کاهش سطح زیرکشت محصولات پرآب‌بر، معرفی ارقام کم‌آب‌طلب، و همچنین ارتقای فرهنگ مصرف آب در بخش کشاورزی و شرب پیشنهاد می‌شود. علاوه بر موارد پیشنهادی که تا حدی میزان خسارت ناشی از کمبود آب را کاهش می‌دهد، احداث سدهای پیش‌بینی شده بر روی رودخانه‌های زارم رود و چهاردانگه برای تنظیم دبی ماهانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

سپاسگزاری

از شرکت مهندسين مشاور پندام که در مراحل مختلف این پروژه همکاری نمودند، نهایت تشکر و قدردانی می‌شود.

است. برای مقایسه مصارف با منابع آب قابل دسترس از سه سطح مقایسه شامل سال آبی نرمال، خشک و خیلی خشک استفاده شده است. حجم آب قابل استحصال از سد شهید رجایی در شش ماهه اول سال برای سال آبی نرمال، خشک و خیلی خشک به ترتیب ۲۳۱، ۱۹۴ و ۱۲۲ میلیون متر مکعب است. حجم آب قابل استحصال از آب‌بندان‌ها و چاه‌های واقع در محدوده نیز به ترتیب ۱۲/۸ و ۱۷۶ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است. مقایسه نیازها و منابع آب در دسترس نشان می‌دهد که میزان کمبود آب در کل محدوده (حوضه آبریز تجن) در سال‌های آبی نرمال، خشک و خیلی خشک به ترتیب ۱۶۶، ۲۳۱ و ۳۲۴ میلیون متر مکعب است. برای مدیریت پایدار منابع آب محدوده مورد بررسی، اقداماتی همچون بهینه‌سازی شبکه‌های

References

1. Danesh Yazdi, M., & Malaek, S.M. (2023). Assessment of water resources, consumption, and agricultural economy in the Mahabad River Basin (southern part of Lake Urmia) using a hydro-economic model. *Iranian Water Resources Research*, 19(2), 87–105. <https://doi.org/20.1001.1.17352347.1402.19.2.6.3>.
2. Degefu, D.M., He, W., & Yuan, L. (2017). Monotonic bargaining solution for allocating critically scarce transboundary water. *Water Resources Management*, 31(9), 2627–2644. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1648-z>
3. Fadaeizadeh, K., & Shourian, M. (2019). Determination of the optimal river basin-wide agricultural water demand quantities meeting satisfactory reliability levels. *Water Resources Management*, 33(8), 2665–2676. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02242-7>
4. Khazarab Consulting Engineers. (2015). Comprehensive water resources plan of Mazandaran Province. *Water and Wastewater Engineering Company*, Tehran, Iran.
5. Laghbodoust Arani, A., Zarei, H., Radmanesh, F., & Zarghami, M. (2023). Evaluating the effects of Mollasadra Dam on water resources and consumption in Kamfirouz Plain and Doroodzan Dam. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 13(52), 202–224. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.173260>
6. Li, C.Y., & Zhang, L. (2015). An inexact two-stage allocation model for water resources management under uncertainty. *Water Resources Management*, 29(6), 1823–1841. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0913-2>
7. Loucks, D.P., & Van Beek, E. (2017). *Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
8. Mirzaei Arjenaki, S.Y., Sheikhi Beglari, P., & Chitsazan Mirzaei, M. (2021). Groundwater management in the Mianab Plain of Shooshtar emphasizing agricultural water demands using groundwater modeling. *Hydrogeology*, 6(1), 84–98. <https://doi.org/10.22034/hydro.2021.12225>
9. Nicklow, J., Reed, P., Savic, D., Dessalegne, T., Harrell, L., Chan-Hilton, A., ... & ASCE Task Committee on Evolutionary Computation in Environmental and Water Resources Engineering. (2010). State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 412–432. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000053)
10. Pandam Consulting Engineers. (2023). Water resources and demand study report (Tajan River Basin up to the Tajan Plain and its irrigated lands). *Mazandaran Regional Water Company*, Sari, Iran.
11. Tolaei Nejad, M., Makvandi, A., Mohammadpour Zangeneh, G., & Lavafian Nejad, B. (2009). An overview of the status of water resources and consumption in Khuzestan Province. *Proceedings of the 2nd National Water Conference*, Islamic Azad University, Behbahan Branch, Iran.
12. Valizadegan, E., & Yazdanpanah, S. (2018). Quantitative model of optimal conjunctive use of Mahabad plain's surface and underground water resources. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4), 631–640. <https://doi.org/10.22060/ceej.2017.12739.5266>.
13. Veyssel. (2024). Use of water resources and sustainability with concepts, definitions and examples. *Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences*, 10(1), 21–25. <https://doi.org/10.17352/2455-488X.000079>
14. Water allocation permit for Shahid Rajaee (Tajan) Dam. (2018). *Official letter No. 700/18436/97*, Ministry of Energy, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran.

15. Yousefi, P., Hessari, B., Brugmann, A., & Zarghami, M. (2023). Evaluation of water supply and demand in a river basin using WEAP-MABIA model (case study: Godarchay-Naghadeh Basin). *Iranian Water Resources Research*, 19(4), 80–94. <https://doi.org/10.22034/iwrr.2023.176840>
16. Zhou, Y., Guo, S., Xu, C.Y., Liu, D., Chen, L., & Ye, Y. (2015). Integrated optimal allocation model for complex adaptive system of water resources management (I): Methodologies. *Journal of Hydrology*, 531, 964–976. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.007>

Optimization of Fertilizer Use in Sugar Beet Fields in Khorasan Razavi Province Using the Compositional Nutrient Diagnosis (CND) Method: Results of a Two-Year Study

J. Ghaderi^{1*}, Sh. Fathi¹, M. Forouhar², K. Khalkhal¹

1- Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran

(*- Corresponding Author Email: ghaderij@yahoo.com)

2- Soil and Water Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran

Received: 24 February 2025

Revised: 17 July 2025

Accepted: 21 September 2025

Available Online: 27 September 2025

How to cite this article:

Ghaderi, J., Fathi, Sh., Forouhar, M., & Khalkhal, K. (2025). Optimization of fertilizer use in sugar beet fields in Khorasan Razavi province using the compositional nutrient diagnosis (CND) method: Results of a two-year study. *Journal of Water and Soil*, 39(4), 349-360. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92310.1468>

Introduction

In Iran, sugar beet is the second most prominent irrigated crop after forage corn and wheat, occasionally ranking third after sugarcane in specific years. This versatile plant not only serves as a primary source of sugar but also contains essential nutrients beneficial to human health. Its adaptability to diverse environmental conditions allows it to be cultivated across various regions of the country. Sugar beet production plays a significant role in Iran's agricultural sector, with recent data indicating an increase in production levels over the years. However, achieving optimal performance and desired product quality requires a precise understanding of the nutritional status of sugar beet. Therefore, awareness of its nutritional condition is crucial for enhancing both quantity and quality. Soil tests based on critical levels can indicate the adequacy of nutrients, but in some cases, soil testing alone is insufficient to reveal nutrient deficiencies or nutritional imbalances. Under these conditions, plant analysis leads to better identification of deficiencies as well as understanding the concentration of elements and comparing them with reference concentrations to ensure optimal plant growth. One method for interpreting leaf analysis results is the use of compositional nutrient diagnosis (CND) method. The CND method offers an effective approach for assessing the nutritional status of sugar beet plants by analyzing nutrient composition in plant tissues against standard values. Its primary objective is to identify nutritional deficiencies, optimize fertilizer use, mitigate adverse environmental impacts from excessive fertilization, and boost crop yields. This research aims to evaluate and optimize the nutritional status of sugar beet over two agricultural years in Khorasan Razavi province using the CND method.

Materials and Methods

The study was conducted over two agricultural years on sugar beet crops in Khorasan Razavi province, involving 30 fields in the first year and 31 fields in the second year, with varying soil properties. After selecting the fields, prior to planting and fertilizing the sugar beet, a composite soil sample was taken from each field, covering an area of one hectare and a depth of 0-30 cm. The physical and chemical properties of these samples were measured in the laboratory. Leaf sampling was performed in both years to determine nutrient concentrations, approximately 90 to 120 days after planting, using young, healthy, fully developed leaves. After washing with



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92310.1468>

distilled water, the leaf samples were dried in an oven at 70°C for 48 hours, ground with an electric grinder, and then nutrient concentrations were measured. In this study, the high-yielding group in sugar beet farms was identified using the CND method through mathematical and statistical analysis and the application of the cumulative function.

Result

Soil analysis revealed a wide range of physical and chemical characteristics among the selected fields. The findings in this province revealed that 67%, 52.5%, 82%, 62%, 59%, and 53% of the fields were deficient in phosphorus, potassium, iron, manganese, zinc, and copper, respectively. The results showed that the average yield across all fields was 58.5 tons per hectare, and the median yield of 70.9 tons per hectare was used as the threshold to distinguish between fields with favorable and unfavorable nutritional status. Based on the mean CND indices, 54.27% of the fields in this province were in a balanced nutritional state, while 45.43% were imbalanced. The most limiting macronutrients in low-yield farms were phosphorus (49%) and potassium (44%), while for micronutrients, the main limitations were copper (29%) and manganese (22%).

Conclusion

An assessment of the nutritional status of sugar beet fields in Khorasan Razavi province reveals significant challenges in nutrient balance. Widespread imbalances, particularly in phosphorus, potassium, and copper, along with soil salinity and alkalinity, highlight the need for a revision in fertilization programs. The CND results emphasize that over 45% of fields require adjustments in fertilizer application patterns to prevent the adverse effects of excesses and critical deficiencies. Additionally, the high yield of some fields (20 farms with an average of 70.9 tons per hectare) proves that achieving nutritional balance not only improves productivity but also reduces financial resource wastage and environmental pollution. The CND method, as a precise tool, enables the detection of nutritional imbalances even in cases where soil nutrient concentrations appear optimal. Therefore, it is recommended that management programs based on soil testing and modern diagnostic methods like CND, along with consideration of local conditions (salinity and lime content), be implemented to ensure sustainable sugar beet production in the region.

Keywords: Compositional nutrient diagnosis (CND), Sugar beet, Tissue analysis

بهینه‌سازی مصرف کود در مزارع چغندر قند با روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND): نتایج یک مطالعه دو ساله

جلال قادری^{۱*} - شاهرخ فاتحی^۱ - مجید فروهر^۲ - کمال خلخال^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

چکیده

استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND-clr) روش مفیدی برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی چغندر قند است. هدف از این تحقیق ارزیابی و بهینه‌سازی وضعیت تغذیه‌ای چغندر قند به مدت دو سال زراعی در استان خراسان رضوی با روش CND-clr است. در سال اول ۳۰ مزرعه و در سال دوم ۳۱ مزرعه با دامنه متفاوتی از خصوصیات خاک، انتخاب گردید. در سال‌های اول و دوم، نمونه‌برداری از برگ‌ها برای تعیین غلظت عناصر غذایی انجام شد. در این پژوهش گروه عملکرد زیاد در مزارع چغندر قند، با استفاده از روش CND از طریق ریا ضی، آماری و کاربرد تابع تجمعی متمایز گردید. نتایج حاصل از تجزیه خاک در استان خراسان رضوی نشان داد که ۶۷٪، ۵۲٪، ۸۲٪، ۶۲٪ و ۵۳٪ مزارع به ترتیب دچار کمبود فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی و مس در خاک بودند. میانگین عملکرد در کل مزارع ۵۸/۵ تن بر هکتار بود و عملکرد حد واسطه ۷۰/۹ تن در هکتار به عنوان معیار تفکیک مزارع با وضعیت تغذیه‌ای مطلوب و نامطلوب استفاده شد. بر اساس میانگین شاخص‌های CND، ۲۷٪/۵۴٪ مزارع این استان در وضعیت متعادل تغذیه‌ای و ۴۳٪/۴۵٪ آن در وضعیت نامتعادل قرار دارند. محدود کننده‌ترین عناصر غذایی پرمصرف در مزارع با عملکرد پایین فسفر (۴۹٪) و پتاسیم (۴۴٪) و برای عناصر غذایی کم مصرف مربوط به مس (۲۹٪) و منگنز (۲۲٪) بود. بنابراین به منظور افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول چغندر قند بایستی توجه ویژه‌ای به کوددهی پتاسیم، فسفر، مس در این مزارع شود. وضعیت نامتعادل تغذیه‌ای مزارع شامل ۵۰٪ کمبود و ۵۰٪ بیش بود عناصر غذایی بود. روش CND با در نظر گرفتن وضعیت تغذیه‌ای متعادل و نامتعادل و همچنین بیش بود و کمبود عناصر غذایی، ضمن توصیه کودی مناسب از هدررفت کود و منابع مالی نیز جلوگیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تجزیه گیاه، چغندر قند، CND-clr

مقدمه

سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱ رتبه چهارم میزان تولید (حدود ۶/۶۷ میلیون تن که ۸/۸۳٪ از کل میزان تولید) محصولات زراعی آبی را به خود اختصاص داده است. این محصول تنها ۲/۰۲٪ از کل سطح کشت آبی کشور را تشکیل داد، در حالی که گندم با تولید ۸/۸۱ میلیون تن، ۳۶/۵۲٪ از سطح زیر کشت آبی را به خود اختصاص داد که مساحت خیلی زیادی است (Statistical Yearbook of Agriculture, 2022 & 2023).

چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) به دلیل توانایی‌اش در سازگاری با شرایط مختلف خاک و آب، به عنوان یک محصول کلیدی در کشاورزی مدرن مورد توجه قرار گرفته است. این گیاه نه تنها منبع تولید شکر است بلکه دارای مواد مغذی و ترکیبات مفید برای سلامتی انسان نیز می‌باشد. طبق آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰، چغندر قند پس از ذرت علوفه‌ای و گندم، بالاترین مقدار تولید آبی و در

۱- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: ghaderij@yahoo.com

۲- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، مشهد، ایران

این پژوهش با هدف بررسی وضعیت تغذیه‌ای مزارع چغندر قند با استفاده از روش CND-clr، شناسایی عناصر غذایی محدود کننده و بهینه‌سازی وضعیت تغذیه‌ای چغندر قند انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی محصول چغندر قند از سال ۱۳۹۷ به مدت دو سال در استان خراسان رضوی انجام شد. در هر سال، حداقل ۳۰ مزرعه انتخاب گردید که این مزارع در تمامی مناطق کشت چغندر قند به نسبت سطح زیر کشت آن منطقه توزیع شدند. همچنین، در این مزارع دامنه‌ای متنوع از خصوصیات خاک (با استفاده از مطالعات خاک و ... وجود داشت

پس از انتخاب مزارع، پیش از کشت و کودپاشی چغندر قند، از هر مزرعه یک نمونه مرکب خاک از سطح یک هکتار و عمق ۳۰-۰ سانتی متری تهیه شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این نمونه‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری گردید. برای تجزیه نمونه‌های خاک، بافت به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، کربن آلی به روش والکلی و بالک (Walkley & Black, 1934)، pH با روش گل اشباع (McLean, 1982)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع با دستگاه هدایت سنج (Black et al., 1965)، درصد کربنات کلسیم (Page et al., 1982)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen, 1964) و پتاسیم قابل استفاده با عصاره‌گیری با استات آمونیوم یک نرمال (Knudsen et al., 1982) اندازه‌گیری شدند. همچنین منیزیم، کلسیم و پتاسیم به روش استات آمونیوم یک نرمال در pH ۸/۲ (Hanway & Heidel, 1952)، آهن، روی، منگنز و مس قابل استفاده خاک با عصاره‌گیر DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) اندازه‌گیری گردید. بور قابل جذب به روش آب داغ (Berger & Truog, 1939) و گوگرد به روش منوکلسیم فسفات (Fox et al., 1964) مورد بررسی قرار گرفت.

در سال‌های اول و دوم، نمونه‌برداری از برگ‌ها برای تعیین غلظت عناصر غذایی انجام شد. این نمونه‌برداری حدود ۹۰ تا ۱۲۰ روز پس از کاشت و از برگ‌های جوان کامل و سالم (بین جوان‌ترین برگ‌ها در مرکز بوته و برگ‌های مسن‌تر) صورت گرفت. نمونه‌های برگ پس از شستشو با آب مقطر، در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و سپس با آسیاب برقی پودر شدند. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر گیاه، مقدار ۰/۵ گرم از نمونه آسیاب شده به روش هضم تر روی اِجاق الکتریکی در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. نیتروژن کل به روش کج‌لدال (Buresh et al., 1982)، فسفر کل به روش تیلفسنجی (رنگ زرد مولیبدات

تجزیه گیاه می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاهان در نظر گرفته شود. برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاهان زراعی و باغی، از روش‌های مختلفی مانند غلظت بحرانی (CVA)، روش تلفیقی تشخیص و توصیف (DRIS)، روش انحراف از درصد بهینه (DOP) و روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) استفاده می‌شود. روش CND-clr با استفاده از تجزیه و تحلیل ریاضی و آماری، نسبت‌های مختلف عناصر غذایی را بررسی می‌کند. این اطلاعات می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا با توجه به نیازهای خاص خاک و شرایط محیطی، بهترین تصمیمات را اتخاذ کنند. در تحقیقات انجام شده، نشان داده شده است که استفاده از CND-clr^۱ می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کیفیت محصول منجر شود و با در نظر گرفتن نسبت‌های چند عنصری تا حدود زیادی نارسایی‌های روش دریس را برطرف کند (Daryashenas et al., 2020). این روش بر اساس تجزیه و تحلیل ترکیب عناصر غذایی در بافت‌های گیاهی و مقایسه آن با مقادیر استاندارد طراحی شده است. هدف اصلی CND-clr، شناسایی کمبودها و نواقص تغذیه‌ای گیاهان است تا با بهینه‌سازی مصرف کودها و سایر عوامل تغذیه‌ای، تأثیرات منفی زیست‌محیطی ناشی از استفاده بی‌رویه از کودها را کاهش دهند و در عین حال، عملکرد محصولات خود را افزایش دهند (García-Hernández et al., 2006). دریا شناس و ثقفی (Daryashenas & Thaqafi, 2011) در یک تحقیق، با بررسی داده‌های ۳۸۲ مزرعه چغندر قند و استفاده از مدل‌های ریاضی و آماری، وضعیت عناصر غذایی مختلف را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که استفاده از CND می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کیفیت محصول منجر شود. همچنین، این روش به کشاورزان کمک می‌کند تا با توجه به نیازهای خاص خاک و شرایط محیطی، بهترین تصمیمات را اتخاذ کنند. تحقیقات دیگری توسط پژوهشگران مختلفی از جمله قادری و همکاران (Ghaderi et al., 2023, 2025)، بابازاده جعفری و همکاران (Babazadeh Jafari et al., 2024)، دریا شناس و همکاران (Daryashenas et al., 2020)، بصیرت و همکاران (Basirat et al., 2018)، و سایرین (Parent et al., Parent & Dafir, 1992) انجام شده است. به طور کلی، روش CND نه تنها در زمینه تولید شکر بلکه در مدیریت منابع غذایی و پایدارسازی کشاورزی نقش مهمی ایفا می‌کند. با توجه به افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی با کیفیت بالا همچون چغندر قند، استفاده از روش‌های نوین مانند CND برای مدیریت تغذیه‌ای چغندر قند ضروری است. بنابراین با توجه به اهمیت و کشت چغندر قند و کمبود نرم‌های تغذیه‌ای برای این محصول مهم،

برای عناصری مانند $R_d, K, P, N, \dots$ ، فرم بیانی از وضعیت و نسبت عناصر غذایی در گیاه است که مقادیر آن در جامعه با عملکرد زیاد بیانگر غلظت مطلوب و ایده‌آل است و به‌عنوان ارقام مرجع یا نرم‌های استاندارد CND محسوب می‌شوند و معمولاً با $V_N^*, V_P^*, V_K^*, V_{Rd}^*$ و... نشان داده می‌شود. اگر غلظت هر عنصر غذایی گیاه مورد مطالعه را با غلظت ایده‌آل یا همان نرم‌های استاندارد مقایسه کنیم شاخص عناصر غذایی CND بدست خواهد آمد و برای عناصر R_d, K, P, N ، به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$I_{Zi} = \frac{(Z_i - Z_i^*)}{SD_{Zi}^*}, \quad I_N = \frac{V_N - V_N^*}{SD_{V_N}^*}, \quad (6)$$

$$I_P = \frac{V_P - V_P^*}{SD_{V_P}^*}, \quad I_K = \frac{V_K - V_K^*}{SD_{V_K}^*}, \quad I_{Rd} = \frac{V_{Rd} - V_{Rd}^*}{SD_{V_{Rd}}^*}$$

در این روابط $V_N^*, V_P^*, V_K^*, V_{Rd}^*, SD_{V_N}^*, SD_{V_P}^*, SD_{V_K}^*, SD_{V_{Rd}}^*$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار نسبت لگاریتمی عناصر غذایی هستند که به‌عنوان نرم استاندارد و یا ارقام مرجع CND محسوب می‌شوند.

V_N, V_P, V_K, V_{Rd} نسبت لگاریتمی مربوط به نمونه مطالعاتی است. I_N, I_P, I_K, I_{Rd} به ترتیب شاخص عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر باقیمانده هستند.

در روش CND، غلظت یک عنصر نسبت به میانگین هندسی کل عناصر و ترکیبات با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Daryashenas & Thaqafi, 2011; Parent & Dafir, 1992).

$$I_{Zi} = \frac{Z_i - Z_i^*}{SD_{Zi}^*} \quad (7)$$

۴- شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI^2) با روش CND از رابطه ذیل قابل محاسبه است (رابطه ۸). در این رابطه r^2 مجموع مربعات شاخص‌های عناصر غذایی است و همیشه می‌تواند اعداد صفر و بیشتر را به خود اختصاص دهد. از نظر تئوری هر اندازه r^2 به عدد صفر نزدیک‌تر شود تعادل عناصر غذایی مطلوب‌تر خواهد شد (Daryashenas & Thaqafi, 2011).

$$r^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + \dots + I_{Rd}^2 \quad (8)$$

بنابراین، برای هر نمونه مشخص گیاهی از طریق بدست آوردن r^2 می‌توان عدم توازن عناصر غذایی را تعیین کرد. با توجه به اینکه شاخص‌های عناصر غذایی CND متغیری مستقل و نرمال هستند، بنابراین مجموع این شاخص‌ها یعنی r^2 از یک توزیع مربع کای با درجه آزادی $d+1$ تبعیت می‌کند (Ross, 1987). تبعیت متغیر شاخص توازن عناصر غذایی CND یعنی r^2 از تابع توزیع مربع کای یک مزیت به شمار می‌رود که در سامانه دریس امکان‌پذیر نبوده است

وانادات) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر، پتاسیم کل با دستگاه فلیم فتومتر، گوگرد به روش کدورت سنجی با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر، منیزیم، آهن، روی، منگنز و مس کل به روش خاکستر کردن خشک با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند (Ryan et al., 2001). بور نیز به روش آزومیتین-اچ با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۲۰ نانومتر قرائت گردید (Jones, 2001). حدود کفایت عنصر فسفر ۱/۱-۴۵/۰، پتاسیم ۶-۲، منیزیم ۱-۲۵/۰ درصد و برای آهن ۱۴۰-۶۰، روی ۸۰-۱۰، منگنز ۳۶۰-۲۶ و بور ۲۰۰-۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم برگ چغندر قند گزارش کرده‌اند.

محاسبه روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND-clr) به روش زیر انجام می‌شود. این روش که مبانی ریاضی و آماری آن توسط پارتو دافیر (Parent & Dafir, 1992) مطرح شده است، به شرح زیر است (Daryashenas & Thaqafi, 2011):

۱- ترکیبات بافت گیاهی به‌صورت یک ساختار سادک^۱ (S^d) شامل عناصر غذایی ($N, P, K, \dots$) و یک بخش باقی‌مانده ترکیبات (R_d) قابل بیان است. این رابطه به شکل زیر می‌باشد که در آن d نمایانگر تعداد عناصر غذایی و R_d نشان‌دهنده باقی‌مانده ترکیبات گیاهی است:

$$S_d = [(N, P, K, \dots, R_d): N > 0, P > 0, K > 0, R_d > 0, N + P + K + \dots + R_d = 100] \quad (9)$$

در این رابطه عدد ۱۰۰ بیان‌کننده کل غلظت ماده خشک گیاه است (درصد) و $N, P, K, \dots, R_d$ عناصر غذایی تشکیل‌دهنده بافت گیاهی هستند که R_d نشانگر سایر عناصر غذایی باقی‌مانده و اندازه‌گیری نشده است که از رابطه (۲)، محاسبه می‌شود (Aitchison, 1986).

$$R_d = 100 - (N + P + K + \dots) \quad (2)$$

۲- میانگین هندسی عناصر غذایی با رابطه ۳ نشان داده می‌شود.

$$G = [N \times P \times K \times \dots \times R_d] \frac{1}{d+1} \quad (3)$$

۳- نسبت لگاریتم طبیعی عناصر از طریق روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود.

$$ZI = \log[x_i / g(x)]$$

$$V_N = \ln\left(\frac{N}{G}\right), \quad V_P = \ln\left(\frac{P}{G}\right), \quad V_K = \ln\left(\frac{K}{G}\right), \quad V_{Rd} = \ln\left(\frac{R_d}{G}\right) \quad (4)$$

$$V_N + V_P + V_K + \dots + V_{Rd} = 0 \quad (5)$$

V_x بیانگر نسبت لگاریتمی عناصر برای x عنصر است. رابطه ۵ درستی محاسبات را تأیید می‌کند. براساس این تعریف، مجموع ترکیبات گیاهی بر مبنای عدد ۱۰۰ است و مجموع نسبت لگاریتمی عناصر با احتساب مقدار باقی‌مانده ترکیبات (R_d) برابر صفر خواهد بود.

در مجموع، وسیع‌ترین کمبود در بین عناصر غذایی مربوط به کمبود آهن بود و بعد از آن عناصر فسفر، منگنز، روی، مس و پتاسیم قرار داشتند.

برخی از مزارع مشکل شوری داشتند و هدایت الکتریکی در سطح خاک‌ها بین مقادیر ۰/۶ تا ۱۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود (جدول ۱). pH خاک بین ۷/۵ الی ۸/۲ در نوسان بوده و در محدوده کمی قلیایی قرار داشت. کربن آلی خاک بین مقادیر ۰/۱۸ تا ۱/۶۶٪ در نوسان بود که نشان‌دهنده آن است که مزارع به مصرف نیتروژن برای رشد نیازمند بودند. مقدار آهک بین مقادیر ۶/۱٪ الی ۳۷٪ متغیر و فسفر قابل جذب خاک بین مقادیر ۳/۶ الی ۵۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک متغیر بود. غلظت بهینه فسفر در خاک برای اغلب گیاهان زراعی آبی بین ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک تعیین شده است (Malakooti & Ghaibi, 1997). نتایج نشان داد ۶۷٪ مزارع بررسی شده دارای فسفر قابل جذب کمتر از ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بودند. پتاسیم قابل جذب مزارع انتخابی بین مقادیر ۶۷ الی ۷۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نوسان بود. حد بحرانی پتاسیم قابل جذب خاک برای اغلب گیاهان زراعی آبی ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین شده است (Malakooti & Ghaibi, 1997). نتایج آزمایشگاهی بیانگر بهینه بودن غلظت پتاسیم قابل جذب خاک در بیش از ۴۷/۵٪ خاک‌های مورد ارزیابی بود و ۵۲/۵٪ مزارع دارای پتاسیم کمتر از حد بهینه بودند.

غلظت آهن قابل جذب در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک در اراضی تحت کشت در محدوده ۰/۴۶ الی ۱۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک متغیر بود. با توجه به حد بحرانی ۶-۵ میلی‌گرم در کیلوگرم آهن در خاک (Malakooti & Ghaibi, 1997)، ۸۲٪ مزارع بررسی شده دچار کمبود آهن قابل جذب بودند. حداقل و حداکثر منگنز قابل جذب خاک‌ها در محدوده ۱/۹ الی ۷۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک قرار داشت و با توجه به حد بحرانی ۶ میلی‌گرم در کیلوگرم منگنز در خاک (Malakooti & Ghaibi, 1997)، حدود ۳۸٪ خاک‌های مورد آزمایش مقدار منگنز قابل جذب آن‌ها در حد مطلوب بود. ولی ۶۲٪ خاک‌ها دارای منگنز کمتر از ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم منگنز قابل جذب بودند که بیانگر کمبود نسبی منگنز در حدود دوسوم اراضی تحت کشت چغندر قند بود (جدول ۱). همانطور که در جدول ۱، قابل مشاهده است غلظت روی در خاک مزارع بین مقادیر ۰/۲۶ الی ۶/۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در نوسان بود. حد بحرانی روی براساس روش DTPA در خاک ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین شده است (Malakooti & Ghaibi, 1997). نتایج نشان داد حدود ۵۹٪ خاک‌های مورد بررسی دچار کمبود شدید روی قابل جذب بودند. همچنین، نتایج نشان داد ۵۳٪ مزارع کمبود مس وجود دارد. حد بحرانی مس در خاک ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین شده است (Malakooti & Ghaibi, 1997).

(Khiari et al., 2001b; Daryashenas & Thaqafi, 2011).

۵- روش مناسب برای تمایز جامعه عملکرد به دو گروه زیاد و کم می‌تواند بر اساس ترسیم تابع تجمعی بین عملکرد و نسبت واریانس شاخص‌های عناصر غذایی باشد. این تابع عملکرد - عنصر غذایی شکل کاوی (concavity) دارد که با تعیین نقاط عطف منحنی (Inflection point) می‌توان گروه‌های عملکردی را با دقت ریاضی تفکیک نمود (Khiari et al., 2001b; Daryashenas & Thaqafi, 2011).

۱- مراحل به طریق زیر تعیین می‌شود:

۱- عملکردها از زیاد به کم ردیف می‌شوند؛

۲- نسبت لگاریتمی (Vx) عناصر غذایی محاسبه می‌شود.

۳- واریانس مقادیر VX برای اولین گروه عملکرد و برای سایر عملکردها محاسبه و نسبت واریانس آنها براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود. این عمل برای دومین گروه عملکرد و الی آخر انجام می‌شود.

$$F_i(V_x) = \frac{\text{واریانس } V_x \text{ برای } n_1 \text{ مشاهده}}{\text{واریانس } V_x \text{ برای } n_2 \text{ مشاهده}} \quad (9)$$

۴- تابع تجمعی نسبت واریانس نیز به روش بند ۳ بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$F_i^c = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} f_i(V_x)}{\sum_{i=1}^{n-3} f_i(V_x)} \times 100 \quad (10)$$

۵- تابع تجمعی $F_i^c(V_x)$ مرتبط با عملکرد (Y) با الگوی درجه ۳

به صورت رابطه ۱۱ است.

$$F_i^c(V_x) = aY^3 + bY^2 + cY + d \quad (11)$$

۶- نقطه عطف این منحنی که شکل کاوی دارد، از طریق مشتق

اول و دوم معادله بدست خواهد آمد.

$$\frac{\partial F_i^c(V_x)}{\partial Y} = 3ay^2 + 2by + c \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 F_i^c(V_x)}{\partial Y^2} = 6ay + 2b = 0 \quad (13)$$

از حل معادله (۱۳) مقدار $-\frac{b}{3a}$ - بیانگر عملکرد حدوا سط بین گروه عملکرد کم و زیاد است که برای $d+1$ عنصر غذایی قابل محاسبه است.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک‌های مزارع انتخابی نشان داد که از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها دارای طیف وسیعی از خصوصیات بودند (جدول ۱). مزارع عمدتاً از نظر کربن آلی زیر ۱/۶۶٪ بودند. در بسیاری از مزارع فسفر، آهن، روی و تا حدودی منگنز در مقایسه با حد بحرانی عناصر غذایی در خاک، جزو کمبودهای شاخص بود. ولی در تعداد کمی از مزارع کمبود پتاسیم و مس مشاهده شد. در تمام ویژگی‌های مورد بررسی اختلاف زیادی بین مزارع وجود داشت که انحراف استاندارد بالا در جدول ۱، نشان‌دهنده این موضوع است.

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک های مزارع چغندر قند در استان خراسان رضوی (۶۱ مزرعه)
Table 1- Soil test results of sugar beet fields in Khorasan Razavi province (61 fields)

صفت مورد بررسی Variable	واحد Unit	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف استاندارد SD	فراوانی کمتر از حد بحرانی Abundance less than critical	فراوانی بیشتر از حد بحرانی Abundance more than critical	ضریب تغییرات CV
pH		7.50	8.20	7.90	0.11	-	-	1.39
EC	(dS/m)	0.60	11.10	2.50	0.21	-	-	8.40
CaCO ₃	(%)	6.10	37	19.70	6.40	-	-	32.49
OC	(%)	0.18	1.66	0.81	0.41	-	-	50.62
Available P	(mg/kg)	3.60	56.40	14.60	10.80	67	33	73.97
Available K	(mg/kg)	67	780	276	139.70	52.50	47.50	50.62
Available Fe	(mg/kg)	0.46	13.60	3.16	3.10	82	18	98.10
Available Mn	(mg/kg)	1.90	70.40	8.60	7.10	62	38	82.56
Available Zn	(mg/kg)	0.26	6.20	1.06	0.01	59	41	0.94
Available Cu	(mg/kg)	0.28	3	1.10	0.64	53	47	58.18

$F_i^c(V_{Fe})=57/3$, $F_i^c(V_K)=53$, $F_i^c(V_P)=56/2$, $F_i^c(V_N)=70/9$
 $F_i^c=48/70$, $F_i^c(V_{Mn})=65/2$, $F_i^c(V_{Zn})=43/9$, $F_i^c(V_{Cu})=61/2$
 (V_B) و $F_i^c(V_R)=56/7$ همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می شود.
 مدل درجه ۳ برای تمام عناصر غذایی و باقی مانده در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. عملکرد چغندر قند $70/9$ تن در هکتار به عنوان عملکرد حد واسط برای تفکیک دو گروه با عملکرد بالا و پایین استفاده گردید (Pernet & Tremilli, 2001). بر اساس روش ذکر شده توسط پارنت و تری میلی (Pernet & Tremilli, 2001) حداکثر عملکرد در نقاط عطف مشاهده شده در منحنی های مقادیر تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی، به عنوان عملکرد حد واسط انتخاب شد. همانگونه که مشاهده می شود حداکثر عملکرد در نیتروژن مشاهده شده است. در مجموع و با این تفکیک ۲۰ مزرعه در جامعه با عملکرد بالا و ۴۱ مزرعه در گروه با عملکرد پایین قرار گرفتند.

روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) گروه بندی مزارع چغندر قند

داده های عملکرد و غلظت عناصر غذایی مربوطه به ۶۱ مزرعه بر اساس میزان عملکرد از زیاد به کم مرتب شدند. سپس مقادیر میانگین هندسی (G) و نسبت لگاریتمی (V_X) ، ۸ عنصر غذایی محاسبه گردید. در ادامه مقادیر تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی یعنی $F_i^c(V_N)$ ، $F_i^c(V_P)$ ، $F_i^c(V_K)$ ، $F_i^c(V_{Fe})$ ، $F_i^c(V_{Zn})$ ، $F_i^c(V_{Mn})$ ، $F_i^c(V_{Cu})$ و $F_i^c(V_R)$ برای کلیه عناصر محاسبه و ترسیم گردید که به صورت ۹ معادله درجه ۳ برای ۸ عنصر و یک قسمت باقی مانده (R_d) برازش داده شد (جدول ۲). نقاط عطف منحنی ها برای ۱۰ عنصر غذایی و ترکیبات باقی مانده برای چغندر قند استان خراسان رضوی بر حسب تن در هکتار محاسبه شدند و مطابق جدول ۲، عبارت بودند از:

جدول ۲- برآورد عملکرد حد واسط با روش توابع تجمعی واریانس نسبت لگاریتمی عناصر غذایی چغندر قند در استان خراسان رضوی
Table 2- Estimation of intermediate performance using cumulative variance functions of the logarithmic ratio of nutrients in sugar beet in Khorasan Razavi Province

عناصر غذایی Nutrients	$F_i^c(V_X)=aY^3+bY^2+cY+d$	R^2	عملکرد Yield
N	$y = 0.0004x^3 - 0.0851x^2 + 3.4491x + 61.114$	0.99**	70.9
P	$y = 0.0003x^3 - 0.0506x^2 + 1.5107x + 86.305$	0.99**	56.2
K	$y = 0.0003x^3 - 0.0477x^2 + 0.5621x + 1$	0.99**	53.0
Fe	$y = 0.0002x^3 - 0.0344x^2 + 0.9031x + 89.95$	0.99**	57.3
Mn	$y = 0.0003x^3 - 0.0587x^2 + 2.0681x + 79.321$	0.99**	65.2
Zn	$y = 0.0003x^3 - 0.0395x^2 - 0.5358x + 129.74$	0.98**	43.9
Cu	$y = 0.0002x^3 - 0.0367x^2 + 0.1238x + 113.$	0.99**	61.2
B	$y = 0.0002x^3 - 0.0292x^2 + 0.4307x + 97.253$	0.99**	48.7
R_d	$y = 0.0011x^3 - 0.187x^2 + 8.0943x - 0.0306$	0.65**	56.7

جدول ۳- نرم‌های CND و انحراف معیار برای عناصر غذایی در مزارع چغندر قند استان خراسان رضوی

Table 3- CND norms and standard deviation for nutrients in sugar beet fields in Khorasan Razavi Province

نرم CND norms	میانگین نرم Mean CND norms	انحراف معیار نرم SD of CND norms	عناصر غذایی Nutrients	میانگین غلظت در جامعه با عملکرد مطلوب Mean concentration in the population with optimal performance	واحد Unit	انحراف معیار SD
V_N^*	3.77	0.18	N	4.4	%	0.73
V_P^*	1.08	0.25	P	0.26	%	0.09
V_K^*	3.26	0.32	K	2.56	%	1.16
V_{Fe}^*	-1.82	0.56	Fe	185	mg/kg	106.11
V_{Mn}^*	-2.2	0.36	Mn	113	mg/kg	57.01
V_{Zn}^*	-3.73	0.24	Zn	28	mg/kg	28.86
V_{Cu}^*	-4.51	0.29	Cu	11	mg/kg	3.48
V_B^*	-2.7	0.37	B	51	mg/kg	26.97

جدول ۴- شاخص عناصر غذایی و دامنه کفایت و بحرانی برای ۸ عنصر غذایی در مزارع چغندر قند استان خراسان رضوی

Table 4- Nutrients indices and the sufficiency and critical ranges for 8 nutrients in sugar beet fields in Khorasan Razavi Province

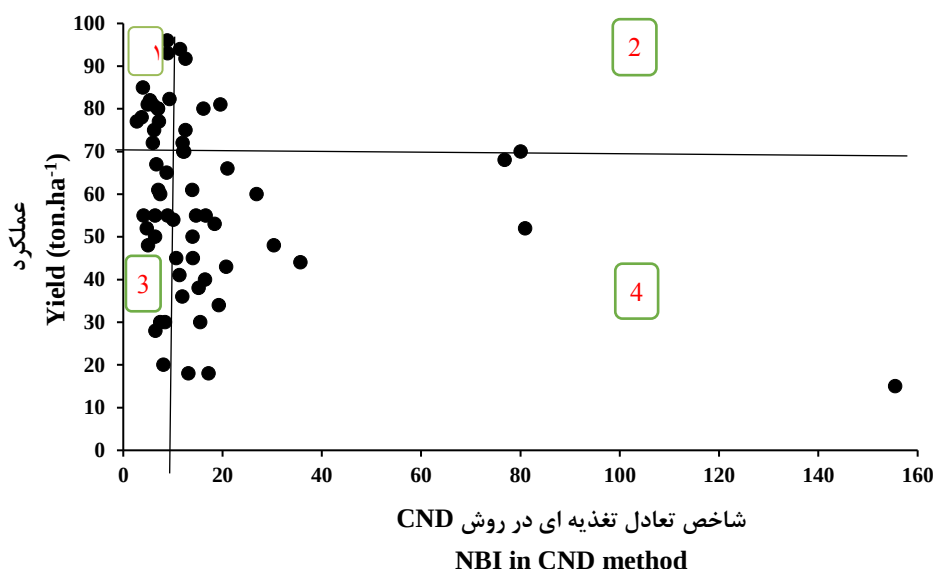
شاخص عناصر غذایی Nutrients Index	عملکرد بحرانی Critical Performance	مربع شاخص عناصر غذایی Nutrients Index Square (I^2x)	حد بحرانی پایین Low Critical Level (I^2x)	حد بحرانی بالا High Critical Level (I^2x)
I_N^2	46	1.73	-1.31	1.31
I_P^2	84	0.09	-0.29	0.29
I_K^2	90	0.45	-0.67	0.67
I_{Fe}^2	51	0.61	-0.78	0.78
I_{Mn}^2	49	1.12	-1.06	1.06
I_{Zn}^2	54	11.11	-3.33	3.33
I_{Cu}^2	57	0.14	-0.38	0.38
I_B^2	33	5.5	-2.34	2.34
جمع (r^2) Total	31	2.12	-1.25	1.25

این شاخص به عنوان معیاری برای ارزیابی وضعیت تعادل تغذیه‌ای می‌باشد و می‌تواند صفر و یا بزرگتر از صفر باشد. در این شاخص تعادل تغذیه‌ای نیز هر چه مجموع توان دوم شاخص‌های CND بزرگتر از صفر باشد، عدم تعادل تغذیه‌ای بیشتر می‌شود. در این روش، شاخص تعادل تغذیه‌ای از مجموع توان دوم شاخص‌های CND کلیه عناصر غذایی به دست می‌آید ($I_K, I_P, I_N, \dots$) که رابطه‌ی معکوس با میزان عملکرد دارد (Basirat et al., 2018). شاخص عناصر غذایی (I^2x) با استفاده از روش تصویری کیت-نلسون و عملکرد بحرانی آن عنصر و بر اساس تابع توزیع آماری کای اسکوتر (K^2) با درجه آزادی $d+1$ (d برای تعداد عنصر بررسی شده و یک برای قسمت باقی‌مانده) و فرمول مربوط در اکسل به دست آمد (شکل ۱). و مقدار آن برای عملکرد ۷۰/۹ تن در هکتار، ۱۰/۲۸ بدست آمد. البته اگر بر اساس روش تصویری کیت-نلسون بخواهد این شاخص برای ۱۰/۲۸ برآورد گردد، می‌تواند در این محدوده قرار گیرد تا حداکثر نقاط در قطعات اول و سوم قرار گیرد. شکل ۱، نشان‌دهنده رابطه عملکرد در دو گروه عملکرد بالا و پایین با شاخص تعادل عناصر غذایی است و نشان می‌دهد که در عملکردهای کمتر از ۷۰/۹ تن در هکتار تعادل تغذیه‌ای دچار اختلال شده است (۴۱ مزرعه یا ۶۷ درصد مزارع) و شاخص تعادل تغذیه‌ای افزایش یافته است. در عملکردهای بیشتر از ۷۰/۹ تن در هکتار (۱۲ مزرعه)، شاخص تعادل تغذیه‌ای کاهش یافته است.

برآورد اعداد مرجع عناصر غذایی به روش تشخیص چندگانه

با توجه به اینکه غلظت عناصر در جامعه با عملکرد بالا به عنوان اعداد مرجع و حد بهینه عناصر غذایی در نظر گرفته می‌شوند (Khari et al., 2001a,b,c) در نتیجه با در نظر گرفتن عملکرد ۷۰/۹ تن در هکتار، مقادیر $V_N^*, V_P^*, V_K^*, V_{Fe}^*, V_{Mn}^*, V_{Zn}^*, V_{Cu}^*$ و V_B^* به عنوان اعداد مرجع تعیین شدند که در جدول ۳ آورده شده است. غلظت عناصر در جامعه با عملکرد بالا به عنوان اعداد مرجع و حد بهینه عناصر غذایی در نظر گرفته می‌شوند (Khari et al., 2001a, b, c). حدود بالا و پایین شاخص بحرانی عناصر غذایی در استان خراسان رضوی در جدول ۴ ارائه شده است. دامنه‌های بحرانی ارائه شده در این جدول را می‌توان به عنوان یک "دامنه‌ی کفایت" برای شاخص‌های عناصر غذایی در نظر گرفت که اعداد خارج از این دامنه بیانگر وضعیت بحرانی و داخل دامنه، نشانه‌ی وضعیت خوب و بسنده است (Basirat et al., 2018). مربع شاخص‌های بحرانی (I^2x) برای عناصر غذایی $I_N^2, I_P^2, I_K^2, I_{Fe}^2, I_{Mn}^2, I_{Zn}^2, I_{Cu}^2$ و I_B^2 که به عنوان اعداد مرجع تعیین شدند، در جدول ۴ ارائه شده است.

ارتباط شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI) با عملکرد چغندر قند



شکل ۱- رابطه بین عملکرد (t ha⁻¹) و شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI) در چغندر قند در استان خراسان رضوی
(خط افقی عملکرد ۷۰/۹ تن در هکتار و خط عمودی شاخص ۱۰/۲۸ می باشد).

Figure 1- Relationship between yield (t.ha⁻¹) and nutrient balance index (NBI) in sugar beet in Khorasan Razavi province
(Horizontal line is yield 70.9 tons per hectare and vertical line is index 10.28).

(41.46%) > N (36.59%) > Zn (14.63%) > B (4.88%)
به صورت کلی ۵۴/۲۷٪ مزارع این استان در وضعیت متعادل تغذیه‌ای و ۴۵/۴۳٪ آن در وضعیت نامتعادل تغذیه‌ای قرار دارند (جدول ۶). نکته قابل توجهی که بایستی به آن اشاره کرد این است که زمانی که وضعیت یک عنصر غذایی نامتعادل است به این معنی نیست که این عنصر دارای کمبود است چرا که ممکن است دارای بیش بود باشد (Ghaderi et al., 2025). چنانچه در جدول ۶ مشاهده می شود در مزارعی که وضعیت نامتعادلی از لحاظ تغذیه‌ای دارند حدود ۵۰٪ کمبود و ۵۰٪ دارای بیش بود بوده و نیازی به مصرف کود نیست. بنابراین وجود همزمان کمبود و بیش بود عناصر در مزارع نامتعادل، لزوم مدیریت اختصاصی برای هر مزرعه را تأکید می کند. در بین عناصر غذایی پر مصرف در مزارع با عملکرد پایین، فسفر و پتاسیم به ترتیب ۴۹٪ و ۴۴٪ نیاز به مصرف کود دارند و در بین عناصر کم مصرف، مس بیشترین نیاز به مصرف کود را دارا می باشد (۲۹٪ مزارع دارای کمبود). علاوه بر این عناصر فسفر، پتاسیم و مس که بیشترین کمبود را دارا می باشند همزمان دارای بیشترین بیش بود می باشند (جدول ۶). بنابراین روش CND با در نظر گرفتن متعادل و نامتعادل بودن وضعیت تغذیه‌ای و همچنین بیش بود و کمبود عناصر مربوطه، ضمن توصیه کودی مناسب، جلوگیری از آلودگی خاک، از هدررفت کود و منابع مالی نیز جلوگیری می کند. بنابراین، کوددهی بایستی با دقت و براساس شاخص‌های CND صورت گیرد.

تفسیر نتایج تعدادی از مزارع با عملکرد پایین با روش تشخیص چندگانه

مزیت و برتری روش CND-clr نسبت به روش‌های DRIS و DOP این است که با استفاده از روش‌های آماری مانند کای اسکویر می توان وضعیت متعادل و یا نامتعادل عناصر غذایی هر مزرعه (با استفاده از جدول ۴ و ۵) را تعیین کرد (Khiari et al., 2001a, b, c; Daryashenas & Thaqafi, 2011). در روش CND-clr و یا CND-ilr برخلاف روش DRIS، منفی بودن شاخص عناصر غذایی (مثلا IN یا IP و ...) الزاماً دلیل بر کمبود آن عناصر نیست. در روش CND-clr ممکن است یک شاخص عناصر غذایی منفی باشد (جدول ۵) ولی در محدوده بین حد پایین بحرانی و حد بالای بحرانی قرار گیرد (جدول ۴) که در این صورت بیانی از حالت متعادل است و خارج از این محدوده نامتعادل است (Khiari et al., 2001a, b, c; Daryashenas & Thaqafi, 2011). در جدول ۶ شاخص‌های عناصر غذایی را به دو حالت متعادل و نامتعادل بیان شده است. همان طور که در جدول ۶ نشان داده شده است عناصر به ترتیب زیر دارای وضعیت متعادل یا نامتعادل هستند:

وضعیت متعادل:

B (95.12%) > Zn (82.93%) > N (63.41%) > Mn (58.54%) > Fe (56.1%) > Cu (34.15%) > K, P (21.95%)

وضعیت نامتعادل:

K, P (78.05%) > Cu (65.85%) > Fe (43.9%) > Mn

جدول ۵- شاخص‌های CND، عملکرد و نیاز عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف در مزارع عملکرد پایین در استان خراسان رضوی
Table 5- CND indicators, performance, and the needs of high- and low-consumption nutrients in low-yield farms in Razavi Khorasan Province

عملکرد Yield	I _N	I _P	I _K	I _{Fe}	I _{Mn}	I _{Zn}	I _{Cu}	I _B	r ²
70	0.8	0.77	-0.09	1.66	-2.32	-0.75	0.82	-1.15	23.67
70	2.99	-0.17	3.57	-1.43	-1.26	-3.56	0.31	-0.68	27.02
70	1.23	-0.31	-1.18	-0.53	-1.06	-0.91	1.69	1.26	22.81
68	3.54	0.81	3.92	-1.58	-2.21	-4.23	1.74	-0.81	27.72
67	1.31	-0.33	-1.16	0.54	0.36	-0.27	-0.98	-0.04	22.80
66	-2.77	-2.14	-0.47	1.05	1.03	0.74	-0.38	1.04	20.47
65	-1.51	-1.16	-0.67	1.04	1.21	-1.02	-0.24	0.46	21.43
61	1.53	-0.81	1.03	-0.63	0.31	0.01	-0.46	-0.46	24.03
61	0.04	1.73	-3.00	1.22	0.53	-1.30	0.28	-2.41	23.71
60	-0.28	-0.15	-1.43	0.56	-0.51	4.20	0.45	-1.45	21.79
60	-1.14	-0.55	-0.38	-0.19	0.90	-1.66	0.51	1.26	22.19
55	1.27	0.58	0.19	-0.722	-0.44	0.25	0.01	0.39	23.85
55	0.27	-0.28	-1.85	-0.32	-1.57	-0.09	1.45	2.33	21.96
55	0.39	0.41	-1.3	0.77	-1.29	0.61	1.26	-0.81	22.74
55	0.74	0.72	0.95	0.57	-0.80	1.72	-3.22	-0.44	24.36
55	0.55	-0.33	1.41	-0.70	1.39	-1.69	0.10	-0.74	24.10
54	0.77	-0.04	-0.95	0.58	0.87	-1.76	1.60	-1.21	22.68
53	-2.27	-1.68	0.96	1.33	-0.02	1.63	0.36	-1.45	21.84
52	0.59	1.04	-0.91	0.41	-0.29	0.86	-1.13	-0.12	23.21
52	-2.58	-2.45	-0.24	-0.24	-1.78	7.92	-0.13	0.52	20.60
50	0.04	-0.07	0.01	1.26	-2.17	0.96	0.47	-1.37	23.29
50	1.52	0.94	0.15	-0.75	0.67	-0.21	-1.10	-0.29	24.30
48	1.94	-1.16	2.58	-0.70	-0.30	-3.33	1.26	-0.44	25.07
48	-0.64	-0.06	0.87	1.12	-0.41	0.03	-0.92	-1.14	23.39
45	1.53	0.59	-0.41	-0.33	0.03	0.42	1.63	-2.10	23.75
45	0.78	-0.93	-2.55	0.78	1.57	-0.78	-0.57	0.33	21.41
44	2.95	0.49	3.20	-2.68	-0.42	0.08	-0.30	-0.70	26.74
43	-0.39	-0.96	-2.84	1.35	2.04	-1.91	0.17	0.001	20.79
41	0.70	-0.31	-1.52	1.51	0.31	-1.39	-1.64	0.50	22.33
40	-0.14	-0.79	-1.49	0.13	0.08	3.33	-1.26	0.60	21.61
38	-0.68	-1.95	-1.44	0.01	-0.52	2.33	0.77	0.92	21.05
36	2.00	0.46	0.67	-1.68	-0.06	1.18	-0.38	-0.23	24.65
24	-1.01	-1.10	1.88	-1.18	2.01	-1.27	1.41	0.16	22.76
30	-0.48	1.38	0.71	0.84	-0.56	0.67	0.32	-2.06	23.82
30	-0.04	-0.83	-1.29	0.34	-0.27	1.64	0.118	0.72	21.66
30	-0.05	-0.18	0.75	0.77	0.69	-0.31	0.33	-2.34	23.42
28	1.01	-0.11	-1.19	0.76	-0.27	-0.54	7.00	-1.06	22.72
20	2.23	0.11	0.25	-0.50	-1.06	0.97	0.07	-0.48	24.18
18	-0.73	-2.11	-1.40	-0.11	1.15	1.40	-0.16	0.86	21.00
18	-0.11	-1.61	0.72	-1.31	3.24	-0.16	-0.61	-0.36	22.79
15	6.17	-0.29	-1.76	-2.11	1.19	-3.19	1.38	-0.98	25.07

جدول ۶- وضعیت تعادل عناصر غذایی مزارع چغندر قند با عملکرد پایین در استان خراسان رضوی

Table 6- Nutrient balance status of low-yield sugar beet farms in Razavi Khorasan Province

وضعیت عناصر غذایی Nutrients status	I _N	I _P	I _K	I _{Fe}	I _{Mn}	I _{Zn}	I _{Cu}	I _B	مجموع Total
متعادل Balanced (%)	63.41	21.95	21.95	56.10	58.54	82.93	34.15	95.12	54.27
نامتعادل Unbalanced (%)	36.59	78.05	78.05	43.90	41.46	14.63	65.85	4.88	45.43
نامتعادل بیشبود Unbalanced(%)	26.83	29.27	34.15	26.83	19.51	7.32	36.59	0.00	22.56
نامتعادل کمبود Unbalanced shortage (%)	9.76	48.78	43.90	17.07	21.95	7.32	29.27	4.88	22.87

نتیجه‌گیری

بررسی وضعیت تغذیه‌ای مزارع چغندر قند خراسان رضوی حاکی از چالش‌های جدی در تعادل عناصر غذایی است. عدم تعادل گسترده، به ویژه در فسفر، پتاسیم و مس، همراه با شوری و قلیایی بودن خاک‌ها، نشان‌دهنده ضرورت بازنگری در برنامه‌های کوددهی است. نتایج روش CND تأکید می‌کند که بیش از ۴۵٪ مزارع نیازمند اصلاح الگوی مصرف کود هستند تا از اثرات منفی بیش‌بودها (فسفر، پتاسیم و مس) و کمبودهای بحرانی (مانند فسفر، پتاسیم و مس) جلوگیری شود. همچنین، عملکرد بالای برخی مزارع (۲۰ مزرعه با میانگین ۷۰،۹ تن در هکتار) اثبات می‌کند که دستیابی به تعادل تغذیه‌ای نه تنها عملکرد را بهبود می‌بخشد، بلکه از هدررفت منابع مالی و آلودگی محیط‌زیست نیز می‌کاهد. روش CND به عنوان یک ابزار دقیق، امکان تشخیص عدم تعادل‌های تغذیه‌ای را حتی در مواردی که غلظت عناصر در خاک به ظاهر مطلوب است، فراهم می‌کند. بنابراین، توصیه می‌شود برنامه‌های مدیریتی مبتنی بر آزمون خاک و روش‌های نوین تشخیص مانند CND، همراه با توجه به شرایط بومی (شوری و آهک)، در دستور کار قرار گیرد تا پایداری تولید چغندر قند در این منطقه تضمین شود.

روش CND-clr به عنوان یک ابزار دقیق، امکان تشخیص عدم تعادل‌های تغذیه‌ای را حتی در مواردی که غلظت عناصر در خاک به ظاهر مطلوب است، فراهم می‌کند. چراکه تجزیه خاک‌ها (جدول ۱) نشان‌دهنده کمبود گسترده عناصر غذایی به ویژه آهن (۸۲٪ مزارع)، فسفر (۶۷٪)، منگنز (۶۲٪)، روی (۵۹٪) و مس (۵۳٪) بود، در حالی که کمبود عناصر غذایی مذکور در چغندر قند بر اساس شاخص‌های CND متفاوت از نتایج خاک و به صورت زیر بود:

$$P (48.78\%) > K (43.9\%) > Cu (29.27\%) > Mn (21.95\%) > Fe (17.07\%) > N (9.76\%) > Zn (7.32\%) > B (4.88\%)$$

این مطالعه اثبات می‌کند که رویکرد CND نه تنها کارایی مصرف کود را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش هزینه‌های تولید و حفظ محیط‌زیست، گامی مؤثر به سوی کشاورزی پایدار است. برای دستیابی به عملکردهای بالاتر از ۷۰ تن در هکتار، ادغام این روش با مدیریت آبیاری و کنترل آفات ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، توصیه می‌شود هنگام کوددهی مزارع علاوه بر آزمون خاک، از روش‌های نوین تشخیص و ارزیابی وضعیت عناصر غذایی مانند CND-clr، با توجه به شرایط بومی نیز استفاده شود.

References

- Aitchison, J. (1986). *Statistical analysis of compositional data*. Chapman and Hall, New York.
- Babazadeh Jafari, S.B., Davatgar, N., Feizian, M., & Shakouri, M. (2024). Determining limitation of nutrients for rice using the compositional nutrient diagnosis (CND) method. *Journal of Soil and Plant Science*, 34(4), 53–73. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/sps.2024.19183>
- Basirat, M., Haghighatnia, H., & Mousavi, S.M. (2018). Evaluation and determination the nutritional status of Valencia orange orchards in south of Fars Province. *Water and Soil*, 32(1), 143-154. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i1.67597>
- Berger, K.C., & Truog, E. (1939). Boron determination in soils and plants. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 11(10), 540-545. <https://doi.org/10.1021/ac50138a007>
- Black, C.A., Evans, D.D., & Dinauer, R.C. (1965). *Methods of soil analysis* (Vol. 9, pp. 653-708). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1>
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Buresh, R.J., Austin, E.R., & Craswell, E.T. (1982). Analytical methods in N-15 research. *Fertilizer Research*, 3(1), 37-62. <https://doi.org/10.1007/bf01063408>
- Daryashenas, A.M., & Thaqafi, K. (2011). Compositional nutrient diagnosis in sugar beet. *Iranian Journal of Soil Research*, 25(1), 1-12. (In Persian with English abstract). <https://www.magiran.com/p891678>
- Daryashenas, A., Saghafi, K., & Davoodi, M.H. (2020). Diagnosis of macro and micro nutrients balance in sugar beet using ahalanobis distance, aitchison distance, and pan balance. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(2), 247-263. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2020.122634>
- Fox, R.L., Olson, R.A., & Rhoades, H.F. (1964). Evaluating the sulfur status of soils by plants and soil tests. *Soil Science Society of America Journal Proceedings*, 21(3), 287-292. <https://doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800020034x>
- García-Hernández, J.L., Valdez-Cepeda, R.D., & Murillo-Amador, B. (2006). Preliminary compositional nutrient diagnosis norms in *Aloe vera* L. grown on calcareous soil in an arid environment. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1-3), 244-252. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.09.001>
- Ghaderi, J., Akhyani, A., & Khalkhal, K. (2025). Nutritional status analysis of sugar beet in Shahroud county using the compositional nutrient diagnosis (CND) method. *Iranian Journal of Soil Research*, 38(4), 315-330. (In Persian)

- with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.367639.765>
13. Ghaderi, J., Tehrani, M.M., Hamed, F., & Heydari, K. (2023). Evaluation of nutritional balance in sugar beet fields through deviation from optimum percentage (DOP) and compositional nutrient diagnosis (CND) methods. *Iranian Journal of Soil Research*, 37(2), 95-115. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2023.359848.678>
14. Hanway, J.J., & Heidel, H. (1952). Soil analysis methods as used in Iowa State College soil testing laboratory. *Iowa Agricultural Experiment Station*, 57, 1-13. <https://doi.org/10.31274/agronomy-20210302-001>
15. Jones, J. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>
16. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001b). The phosphorus compositional nutrient diagnosis range for potato. *Agronomy Journal*, 93, 815-819. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.935815x>
17. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001c). Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agronomy Journal*, 93, 802-808. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.0172>
18. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001a). Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. *Agronomy Journal*, 93, 809-814. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.935809x>
19. Knudsen, D., Peterson, G.A., & Pratt P.F. (1982). Lithium, sodium, and potassium. Pp. 225-246. In Page A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds). *Method of Soil Analysis. Part2. Chemical and Microbiological Properties*. Soil Science Society of America. Book Ser. 5. Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c13>
20. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(4), 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
21. Malakooti, M.J., & Ghaibi, M.N. (1997). *Determining the critical limit of nutrients for strategic crops and correct fertilizer recommendations in the country*. Agricultural Education Publication. 11, 56. (In Persian)
22. McLean, E.O. (1982). Soil pH and lime requirement. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis, part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 199-224). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c12>
23. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., & Dean, L.A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate*. USDA Circular 939. US Government Printing Office, Washington DC.
24. Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). *Chemical and microbiological properties*. In *Methods of soil analysis, part 2, no. 9* (2nd ed., pp. 443-444). Madison, WI: American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c12>
25. Parent, L.-E., & Dafir, M. (1992). A theoretical concept of Compositional Nutrient Diagnosis. *Journal of The American Society for Horticultural Science*, 117(2), 239-242. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.2.239>
26. Parent, L.E., Cambouris, A.N., & Muhawenimana, A. (1994). Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in potato crops. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1432-1438. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050022x>
27. Pernet, D., & Tremilli, D. (2001). Modeling sugar beet yield and its components. In *Proceedings of the International Conference on Sugar Beet Research* (pp. 123-130).
28. Ross, S.M. (1987). *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, New York.
29. Ryan, J.R., Stefan, G., & Rashid, A. (2001). *Soil and plant analysis laboratory manual* (2nd ed.). ICARDA.
30. Statistical Yearbook of Agriculture. (2022). Center for Statistics, Information Technology and Communications, Deputy of Economic Planning, Ministry of Agriculture-Jihad. (In Persian)
31. Statistical Yearbook of Agriculture. (2023). Center for Statistics, Information Technology and Communications, Deputy of Economic Planning, Ministry of Agriculture-Jihad. (In Persian)
32. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>

Spatial Relationships between Soil Quality and Site Quality in the Zagros Forests: From Statistical Analysis to Spatial Prediction

N. Pordel¹, J. Hosseinzadeh^{1*}, M. Heydari¹, R. Omidipour²

1- Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

(*- Corresponding Author Email: j.hosseinzadeh@ilam.ac.ir)

2- Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

Received: 02 June 2025

Revised: 01 November 2025

Accepted: 02 November 2025

Available Online: 02 November 2025

How to cite this article:

Pordel, N., Hosseinzadeh, J., Heydari, M., & Omidipour, R. (2025). Spatial relationships between soil quality and site quality in the Zagros forests: From statistical analysis to spatial prediction. *Journal of Water and Soil*, 39(4), 361-379. (In Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93867.1484>

Introduction

Forests are recognized as one of the most vital components of terrestrial ecosystems, playing a multifaceted role in maintaining environmental equilibrium, supporting biodiversity, regulating climate, conserving water resources, and providing a wide range of essential ecosystem services. The long-term sustainability and productivity of forest ecosystems are closely linked to the quality of the soil and the inherent biological potential of the site in which the forest stands. These two critical factors, soil quality and site potential, are, in turn, profoundly shaped and affected by various environmental parameters, including geomorphological characteristics such as topography and elevation, the density and structure of vegetation or canopy cover, as well as anthropogenic influences stemming from land use changes, deforestation, and other human activities. In light of these considerations, the primary objective of this research was to conduct a detailed, quantitative evaluation of soil quality and site potential indices within the semi-arid Zagros forest regions. The study specifically focused on analyzing the impacts of key variables such as elevation gradients, slope orientation (aspect), and the density of canopy cover. In addition to the empirical assessment of these factors, this research employed advanced spatial analysis techniques and geostatistical tools to develop a reliable spatial prediction model. This model aims to enhance our understanding of spatial variability in forest conditions and provide a scientific basis for implementing more informed, effective, and sustainable forest management and restoration strategies tailored to the unique ecological context of the Zagros Mountains.

Materials and Methods

The study was conducted in the Zagros forests (Shalam Mountain, east of Ilam) within an elevation range of 1500 to 2150 meters. Sixty forest stands were selected across three elevation classes (lower, middle, and upper), two slope aspects (north-facing and south-facing), and two canopy cover classes (less than and more than 25%). Soil samples were collected from a depth of 0–15 cm in each stand, mixed, and their physical and chemical properties were analyzed in the laboratory. The Soil Quality Index (SQI) was calculated using the SQI-2 standard model based on normalization and weighting of selected soil properties. Site quality was estimated using a logarithmic model of tree height to log tree age ratio for Persian oak (the dominant species). For spatial structure analysis, variograms were fitted using spherical, exponential, Gaussian, and linear models, and the best model was identified for each index. Interpolation and spatial mapping were performed using ordinary kriging, simple kriging, universal kriging, co-kriging, and inverse distance weighting (IDW). The accuracy of these methods was evaluated using the mean standardized root mean square error, and the most accurate method for each index was determined.



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93867.1484>

Results

The findings showed significant differences in soil quality between north- and south-facing slopes across all elevation classes. The highest soil quality (0.84 ± 0.01) was found in densely canopied, north-facing mid-elevation stands, while the lowest (0.60 ± 0.03) was in open-canopy, south-facing upper elevation stands. Site quality also decreased with increasing elevation. Its highest value (25.26 ± 2.08 m) was recorded in densely canopied, north-facing lower elevation stands, and the lowest (16.51 ± 0.79 m) in open-canopy, south-facing upper elevation stands. Statistical analysis revealed a generally positive and significant correlation between soil quality and site quality, which was stronger on south-facing slopes. Regression analysis confirmed this relationship. Variogram modeling indicated that the spherical model best fit soil quality, while the exponential model was most suitable for site quality. Interpolation accuracy assessments showed that ordinary kriging was the most accurate method for soil quality, and universal kriging was best for site quality.

Conclusion

The study comprehensively demonstrated that both soil properties and overall site quality within the Zagros forests were significantly influenced by key environmental variables, including topographical features, the extent of canopy cover, and variations in elevation. The interrelationship between the two assessed indices, soil and site quality, is statistically significant, and the strength of this relationship fluctuates in response to differing ecological conditions, particularly on south-facing slopes, which are more exposed to solar radiation and drier microclimates. The results of the analysis underscore the necessity of incorporating both soil attributes and broader environmental characteristics when evaluating the biological productivity and ecological potential of forested regions. Moreover, observed differences in the spatial distribution patterns and the structure of the variogram models emphasize the critical importance of selecting appropriate and context-sensitive spatial modeling techniques. These findings not only provide a robust scientific basis for ongoing ecological assessment and environmental monitoring, but also offer valuable guidance for implementing targeted forest restoration strategies and developing long-term, sustainable management plans tailored to the unique conditions of the semi-arid Zagros forest ecosystems.

Keywords: Canopy cover, GIS, Kriging, Remote sensing, Soil, Variogram

روابط مکانی کیفیت خاک و رویشگاه در جنگل‌های زاگرس: تحلیل آماری تا پیش‌بینی فضایی

نرگس پردل^۱ - جعفر حسین زاده^{۱*} - مهدی حیدری^۱ - رضا امیدپور^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

چکیده

اکوسیستم‌های جنگلی از مهم‌ترین بوم‌سازگان خشکی هستند و نقش کلیدی در تعادل محیط‌زیستی و ارائه خدمات اکوسیستمی دارند. پایداری این اکوسیستم‌ها وابسته به کیفیت خاک و توان زیستی رویشگاه (کیفیت رویشگاه) است و تحت تأثیر عوامل محیطی مانند توپوگرافی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی قرار دارند. بنابراین با هدف بررسی کمی شاخص کیفیت خاک و کیفیت رویشگاه تحت تأثیر عواملی مانند ارتفاع، جهت دامنه و تراکم تاج‌پوشش، این پژوهش در جنگل‌های زاگرس (کوه شلم، شرق ایلام) با دامنه ارتفاعی ۱۵۰۰ - ۲۱۵۰ متر انجام شد. نمونه‌برداری در ۶۰ توده جنگلی در سه طبقه ارتفاعی (پایین‌بند (۱۷۵۰-۱۸۵۰ متر)، میان‌بند (۱۸۵۰-۱۹۵۰ متر) و بالا‌بند (۱۹۵۰-۲۰۵۰ متر) از سطح دریا)، دو جهت جغرافیایی (شمالی و جنوبی) و دو کلاس تاج‌پوشش (کمتر و بیشتر از ۲۵ درصد) انجام شد. از هر توده، نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر برداشت و پس از ترکیب، خصوصیات خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای محاسبه شاخص کیفیت خاک، از مدل استاندارد SQI-2 استفاده گردید که بر اساس نرمال‌سازی و وزن‌دهی به خصوصیات منتخب خاک عمل می‌کند. شاخص کیفیت رویشگاه نیز بر پایه مدل لگاریتمی نسبت ارتفاع درخت به لگاریتم سن درختان بلوط ایرانی به‌عنوان گونه غالب رویشگاه برآورد شد. برای تحلیل ساختار فضایی شاخص‌ها، واریوگرام‌ها بر اساس مدل‌های کروی، نمایی، گوسی و خطی برازش داده شد و مناسب‌ترین مدل‌ها برای هر شاخص تعیین شدند. برای مدل‌سازی و تهیه نقشه‌های پراکنش مکانی، از روش‌های درونیابی کریجینگ (معمولی، ساده و عام)، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) استفاده شد. دقت این روش‌ها با استفاده از مقدار میانگین ریشه خطای برآورد استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین روش برای هر شاخص انتخاب گردید. یافته‌های این پژوهش نشان داد که شاخص کیفیت خاک تابعی از جهت جغرافیایی، تراکم تاج درختان و طبقات ارتفاعی بود؛ به طوری که بیشترین مقدار آن در توده‌های با تاج متراکم جهت شمالی - میان‌بند (0.84 ± 0.01) و کمترین مقدار آن در بالا‌بند - دامنه جنوبی - تاج باز (0.60 ± 0.03) مشاهده شد. شاخص کیفیت رویشگاه نیز با افزایش ارتفاع از سطح دریا کاهش یافت. بیشترین مقدار آن (25.26 ± 2.08 متر) در دامنه شمالی - پایین‌بند - تاج متراکم و کمترین مقدار (16.51 ± 0.79 متر) در دامنه جنوبی - بالا‌بند - تاج باز ثبت گردید. بررسی آماری همبستگی میان شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه نشان داد که این دو متغیر دارای رابطه مثبت و معنی‌داری هستند (0.58). این همبستگی در دامنه جنوبی (0.86) بسیار قوی‌تر از دامنه شمالی (0.36) بود. همچنین بررسی مدل‌های واریوگرام نشان داد که مدل کروی برای شاخص کیفیت خاک و مدل نمایی برای شاخص کیفیت رویشگاه مناسب‌ترین مدل‌ها هستند. نتایج ارزیابی دقت روش‌های درونیابی نیز نشان داد که روش کریجینگ معمولی ($RMSE=1.12$) برای درونیابی شاخص کیفیت خاک و کریجینگ عام ($RMSE=1.04$) برای شاخص کیفیت رویشگاه دقیق‌ترین نتایج را ارائه دادند. این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان ویژگی‌های خاک و محیط در ارزیابی پتانسیل زیستی تأکید دارند. همچنین، تفاوت در الگوهای مکانی و ساختار فضایی این شاخص‌ها نشان می‌دهد که انتخاب روش مناسب مدل‌سازی مکانی ضروری است. این نتایج می‌توانند پایه‌ای برای مدیریت علمی، احیای هدفمند و برنامه‌ریزی پایدار جنگل‌های نیمه‌خشک زاگرس باشند.

واژه‌های کلیدی: تاج‌پوشش، خاک، سنجش از دور، کریجینگ، واریوگرام، GIS

۱- گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

* نویسنده مسئول: (Email: j.hoseinzadeh@ilam.ac.ir)

۲- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

مقدمه

یکی از حیاتی‌ترین اجزای بوم‌سازگان زمینی، جنگل‌ها هستند که با جذب دی‌اکسیدکربن، حفظ تنوع زیستی، تعدیل شرایط اقلیمی و محافظت از منابع آب و خاک، نقش کلیدی در پایداری زیست‌محیطی دارند و مدیریت پایدار آن‌ها برای تداوم عملکردهای اکوسیستم ضروری است (Swetha et al., 2023). پایداری اکوسیستم‌های جنگلی به کیفیت خاک وابسته است؛ زیرا خاک نه تنها بستر فیزیکی رشد گیاهان را فراهم می‌سازد، بلکه از نظر تأمین عناصر غذایی، ذخیره‌سازی آب و حمایت از فعالیت‌های زیستی نقشی بنیادی دارد (DeLuca et al., 2019). کیفیت خاک مفهومی چندبعدی است که شامل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی بوده و بررسی آن در مناطق جنگلی اهمیت ویژه‌ای دارد (Leul et al., 2023). این ویژگی تعیین می‌کند که خاک تا چه حد توانایی حمایت از پوشش گیاهی را دارد و چگونه به تخریب یا بازسازی اکوسیستم پاسخ می‌دهد (Guan & Fan, 2020). تحول خاک‌ها در طول زمان نتیجه تأثیرپذیری از عوامل مختلفی همچون اقلیم، جنس مواد مادری، توپوگرافی، موجودات زنده و پوشش گیاهی است که همگی در فرآیند خاک‌سازی نقش دارند (Eslamnejad et al., 2020; Heydari et al., 2021). در این میان، توپوگرافی به‌ویژه ارتفاع و جهت دامنه، با تأثیر بر خصوصیات خاک و شرایط محیطی، کیفیت خاک را تغییر می‌دهد (Heydari et al., 2023; Griffiths et al., 2009; Nepal et al., 2023). جهت دامنه به دلیل تفاوت در دریافت تابش خورشید، بر دما، رطوبت و تولید اولیه گیاهان اثرگذار است؛ به‌طور مثال، دامنه‌های شمالی معمولاً خاک خنک‌تر و مرطوب‌تری دارند که شرایط رشد مطلوب‌تری فراهم می‌کنند (Murphy et al., 2020; Maimouni et al., 2021). همچنین، تاج‌پوشش نقش مهمی در شکل‌گیری و ارتفاع ویژگی‌های خاک دارد؛ حضور آن با افزایش مواد آلی، نیتروژن و عناصر غذایی همراه است (Owliaie, 2010). پوشش تاجی انبوه در دامنه‌هایی با شرایط مساعد، با افزایش کربن آلی خاک و فعالیت‌های زیستی آن همراه است که نشان‌دهنده تأثیر توأم تاج‌پوشش و توپوگرافی بر کیفیت خاک است (Xue et al., 2021). بنابراین، در مدیریت پایدار جنگل، در نظر گرفتن هم‌زمان شرایط توپوگرافی و تاج‌پوشش برای ارزیابی کیفیت خاک ضروری است. از سوی دیگر، کیفیت رویشگاه مفهومی است که نمایانگر قابلیت زیست‌پذیری یک منطقه برای رشد طبیعی گونه‌های گیاهی خاص است (Sasanifar et al., 2024). کیفیت رویشگاه به توان ذاتی یک مکان در حمایت از رشد، توسعه و تولید زیستی گونه‌های درختی در یک دوره زمانی مشخص اشاره دارد. این شاخص ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های خاک، رطوبت، و توپوگرافی دارد (Gren & Amuakwa-Mensah, 2018).

در ارزیابی اکوسیستم‌های جنگلی، تهیه نقشه‌های دقیق از پراکنش مکانی کیفیت خاک و کیفیت رویشگاه از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که این اطلاعات می‌توانند راهگشای مدیریت پایدار و احیای جنگل‌ها باشند. اما محدودیت‌های مربوط به داده‌های نمونه‌برداری نقطه‌ای، همچون هزینه و زمان‌بر بودن، باعث شده تا روش‌های درون‌یابی به‌عنوان راه‌کاری مؤثر در مدل‌سازی پیوسته و تخمین متغیرهای محیطی مورد استفاده قرار گیرند (Taghipour et al., 2022). استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی نظیر کریجینگ، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله، امکان تحلیل دقیق‌تری از وضعیت اکولوژیکی منطقه فراهم می‌سازد و مبنای علمی برای اقدامات مدیریتی، فراهم می‌کند (Aguirre et al., 2022). کریجینگ یک روش زمین‌آماری دقیق است که با استفاده از واریوگرام‌ها و در نظر گرفتن همبستگی مکانی، داده‌های فضایی را درون‌یابی می‌کند (Tiyawarman et al., 2024). کوکریجینگ، نسخه پیشرفته‌تر آن، با استفاده از داده‌های کمی دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد و در برآورد شاخص‌های محیطی مانند کیفیت آب عملکرد بهتری دارد (Belkhiri et al., 2020). روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) نیز روشی ساده و سریع است که بر اساس نزدیکی نقاط عمل می‌کند و برای داده‌های یکنواخت مناسب‌تر است (Ligas et al., 2022). انتخاب روش مناسب، وابسته به نوع داده و ساختار فضایی آن است. به‌کارگیری این روش‌ها نه تنها موجب افزایش دقت تحلیل‌های مکانی می‌شود، بلکه امکان شناسایی نواحی بحرانی و اولویت‌دار برای حفاظت و بهبود را نیز فراهم می‌سازد.

جنگل‌های زاگرس دارای تنوع زیستی منحصر به فرد، ارزش‌های هیدرولوژیکی و اکولوژیکی بسیار بالا و دارای نقش کلیدی در کنترل فرسایش خاک هستند (Moradi & Sharifi, 2022). اما متأسفانه این رویشگاه‌ها طی دهه‌های اخیر با تهدیداتی چون بهره‌برداری بی‌رویه، آتش‌سوزی و تغییرات کاربری زمین مواجه بوده‌اند که مستقیماً کیفیت خاک و در نهایت پایداری زیستی این اکوسیستم‌ها را تحت تأثیر قرار داده است (Heydari & Faramarzi, 2014). در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه در جنگل‌های زاگرس، شناسایی تغییرات فضایی آن‌ها تحت تأثیر عوامل محیطی و توپوگرافی مانند ارتفاع، جهت دامنه و تراکم تاج‌پوشش، و تعیین دقیق‌ترین روش درون‌یابی برای پیش‌بینی پراکنش مکانی شاخص‌ها انجام شد. همچنین، این مطالعه رابطه میان کیفیت خاک و کیفیت رویشگاه و ساختار فضایی این شاخص‌ها را بررسی می‌کند تا چارچوب علمی لازم برای مدیریت، احیا و برنامه‌ریزی پایدار جنگل‌های نیمه‌خشک زاگرس فراهم گردد.

مواد و روش‌ها

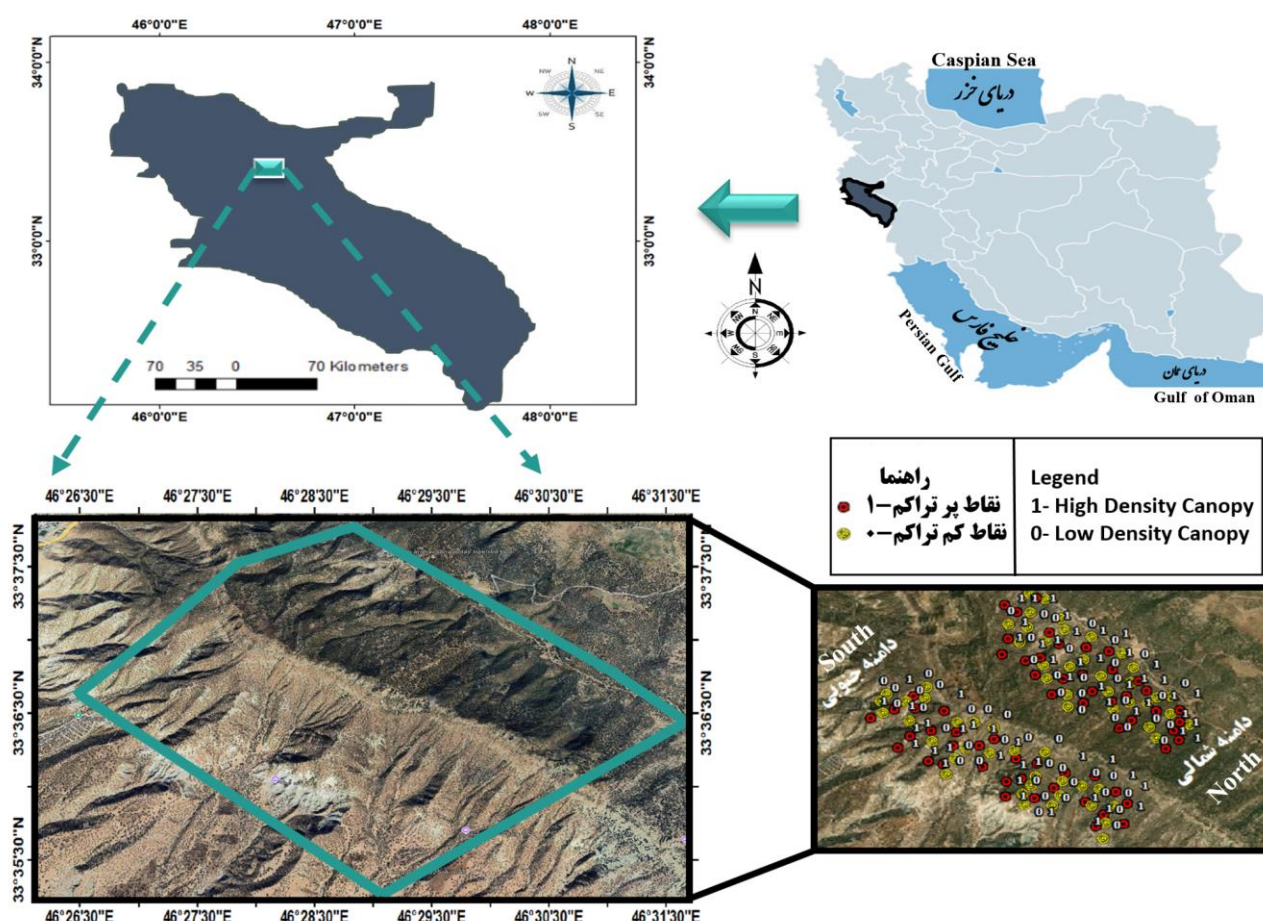
منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه‌ای از جنگل‌های زاگرس (کوه شلم واقع در شرق شهر ایلام) انجام شد (شکل ۱). ارتفاع این منطقه از سطح دریا بین ۱۵۰۰ تا ۲۱۵۰ متر متغیر است، از شیب‌های ملایم تا شدید برخوردار است، دارای دو جهت غالب دامنه (شمالی و جنوبی) است. ساختار زمین آن کوهستانی بوده و تحت تأثیر اقلیم مدیترانه‌ای قرار دارد. سنگ‌بستر غالب منطقه آهکی (limestone) است و خاک منطقه بر اساس طبقه‌بندی US Soil Taxonomy، از نوع Entisols طبقه‌بندی می‌شود. این خاک‌ها معمولاً دارای بافت سبک تا متوسط بوده و از نظر مواد آلی فقیر هستند، که بر ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی تأثیرگذار است (Hosseini & Hosseini, 2022). میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۶۴۳ میلی‌متر است که از طریق نقشه‌های هم‌باران ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ایلام واقع در ۴ کیلومتری محدوده مورد مطالعه، محاسبه شده است. حداکثر دمای منطقه به

۱۸/۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که میانگین حداقل دما ۶/۱ درجه سانتی‌گراد است (Fathizadeh et al., 2017). گونه غالب درختی این ناحیه، بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) است و گونه‌های دیگری مانند زالزالک (*Crataegus azarolus*)، کیکم (*Acer monspessulanum*) و بنه (*Pistacia atlantica*) نیز در آن مشاهده می‌شوند.

جمع‌آوری داده‌ها

برای انجام این پژوهش، منطقه (با مساحت ۲۰۰۰ هکتار) به گونه‌ای انتخاب شد که امکان بررسی ویژگی‌های مدنظر در دو جهت دامنه (شمالی و جنوبی) و در سه طبقه ارتفاعی شامل پایین‌بند (۱۷۵۰-۱۸۵۰ متر)، میان‌بند (۱۸۵۰-۱۹۵۰ متر) و بالا‌بند (۱۹۵۰-۲۰۵۰ متر از سطح دریا) فراهم باشد. در این محدوده، با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث و بازدیدهای میدانی، مجموعاً ۶۰ توده جنگلی شناسایی شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و شهرستان ایلام- منطقه شلم
Figure 1- Location of the study area in Iran and Ilam County– Shalam region

$$Si = 0.1, \quad \text{if } Xi > U$$

(۳)

$$Si = 0.1, \quad \text{if } Xi < L$$

$$Si = 0.1 + 0.9 * (Xi - L) / (T - L), \quad \text{if } L \leq Xi \leq T$$

$$Si = 1 - 0.9 * (Xi - T) / (U - T), \quad \text{if } T < Xi \leq U$$

$$Si = 0.1, \quad \text{if } Xi > U$$

که در آن Xi مقدار مشاهده شده شاخص، L حد پایین قابل قبول، U حد بالای قابل قبول و T مقدار بهینه است.

پس از محاسبه امتیاز هر شاخص، شاخص کلی به صورت جمع وزنی محاسبه شد (Taghipour et al., 2022):

$$SQI = \sum (Wi \times Si)$$

که در آن Wi وزن هر شاخص و Si امتیاز استاندارد شده شاخص در بازه ۰ تا ۱ است. جمع وزن‌ها برابر ۱ در نظر گرفته شد.

همچنین در هر یک از این پلات‌ها، به منظور ثبت ویژگی‌های ساختاری، قطر برابر سینه (DBH) و ارتفاع درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) موجود اندازه‌گیری و ثبت گردید. برای تخمین سن درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) در نواحی زاگرس، از روابط تجربی و مدل‌های رگرسیونی که در مطالعات قبلی برای مشابه‌ترین شرایط اکولوژیک و گونه‌های مشابه استخراج شده‌اند، بهره گرفته شد. بدین منظور ابتدا قطر برابر سینه درختان بلوط ایرانی در ۶۰ نقطه مختلف از نواحی زاگرس اندازه‌گیری شد. داده‌های قطر با استفاده از نوار اندازه‌گیری و در ارتفاع ۱٫۳ متر از سطح زمین ثبت گردید. به منظور تخمین سن درختان، از معادله‌ای که توسط جهانبازی و همکاران (Jahanbazi et al., 2000) برای گونه بلوط ایرانی (میانگین رویش قطری با پوست در سال ۵/۶ میلی‌متر) در نواحی زاگرس پیشنهاد شده است استفاده گردید. برای تخمین شاخص کیفیت رویشگاه، از مدل لگاریتمی ساده بر اساس نسبت ارتفاع به لگاریتم سن درخت استفاده شد (Nord-Larsen et al., 2009; Cao, 1993; Burkhardt & Tomé, 2012) که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$SQI = a + b \times \ln(H / \ln(A))$$

که در آن SQI شاخص کیفیت رویشگاه، H ارتفاع درخت (متر)، A سن درخت (سال)، a, b ضرایب مدل برآورد شده از داده‌های میدانی است.

ارزیابی مدل‌های زمین‌آماري

برای مقایسه مدل‌های مختلف درون‌یابی، جهت استخراج پارامترهای درون‌یابی، واریوگرام محاسبه گردید که شامل مؤلفه‌های Sill (حداکثر واریانس)، Range (برد همبستگی مکانی) و Nugget (واریانس ناشی از خطا یا تغییرات کوچک مقیاس) است (Shabani et al., 2011). برای تعیین ضرایب کریجینگ، مدل‌های مختلف واریوگرام مانند خطی، نمایی، گوسی و کروی بررسی شدند که هر کدام

تاج‌پوشش در این منطقه در دامنه‌ای از کمتر از ۲۵ درصد (توده‌های باز یا تنک) تا بیشتر از ۲۵ درصد (توده‌های متراکم یا نیمه‌انبوه) متغیر بود. بر این اساس، ۳۰ توده با پوشش کمتر از ۲۵ درصد و ۳۰ توده با پوشش بیشتر از ۲۵ درصد به عنوان توده‌های باز و متراکم انتخاب شدند. در هر جهت دامنه، ۱۵ توده تنک و ۱۵ توده نیمه‌انبوه در نظر گرفته شد و به گونه‌ای توزیع یافتند که در هر طبقه ارتفاعی، پنج توده از هر نوع تاج‌پوشش وجود داشته باشد.

روش نمونه‌برداری و اندازه‌گیری

برای نمونه‌برداری خاک (خردادماه ۱۴۰۳)، ابتدا مرکز هر قطعه نمونه با استفاده از دستگاه GPS مشخص شد. سپس در هر توده، پلاتی به شعاع ۱۲۰۵ متر (با مساحت ۵۰۰ متر مربع) به عنوان واحد نمونه‌برداری تعیین شد. از هر پلات، چهار نمونه خاک (دو نمونه در زیر تاج‌پوشش و دو نمونه از خارج آن) به صورت تصادفی برداشت گردید. این نمونه‌ها از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر (Koosha et al., 2022) برداشت و پس از ترکیب، به عنوان یک نمونه مرکب به آزمایشگاه منتقل شدند. در مجموع، ۳۰ نمونه خاک از هر دامنه و در کل ۶۰ نمونه از منطقه جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل گردید.

در آزمایشگاه پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها و عبور از الک ۲ میلی‌متری، اسیدیته و هدایت الکتریکی به روش پتاسیومتری، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه، ماده آلی با استفاده از روش والکی-بلاک، بافت خاک به روش هیدرومتری (Jafari Haghighi, 2003) و رطوبت خاک به روش وزنی (Perrier & Salkini, 1991) اندازه‌گیری شد. برای بررسی شاخص کیفیت خاک از شاخص کیفی وزنی جمعی (SQI-2 - Weighted Additive SQI) استفاده شد. در این روش به هر شاخص خاک امتیازی در بازه ۰ تا ۱ داده می‌شود. از توابع خطی برای امتیازدهی استفاده شد و توابع غیرخطی حذف شده‌اند تا پیش‌بینی دقیق‌تری از تأثیر بر محصول ارائه شود. شاخص‌ها بر اساس سه گروه طبقه‌بندی شدند: بیشتر-بتر (More-is-Better): شاخص‌هایی مانند ماده آلی و رطوبت که افزایش مقدار آنها مفید است (رابطه ۱). کمتر-بتر (Less-is-Better): شاخص‌هایی مانند جرم مخصوص ظاهری که کاهش مقدار آنها بهتر است (رابطه ۲). بهینه (Optimum): شاخص‌هایی مانند بافت pH و EC که مقدار مطلوبی (رابطه ۳) دارند (Mukherjee, & Lal, 2014).

(۱)

$$Si = 0.1, \quad \text{if } Xi < L$$

$$Si = 0.1 + 0.9 * (Xi - L) / (U - L), \quad \text{if } L \leq Xi \leq U$$

$$Si = 1, \quad \text{if } Xi > U$$

(۲)

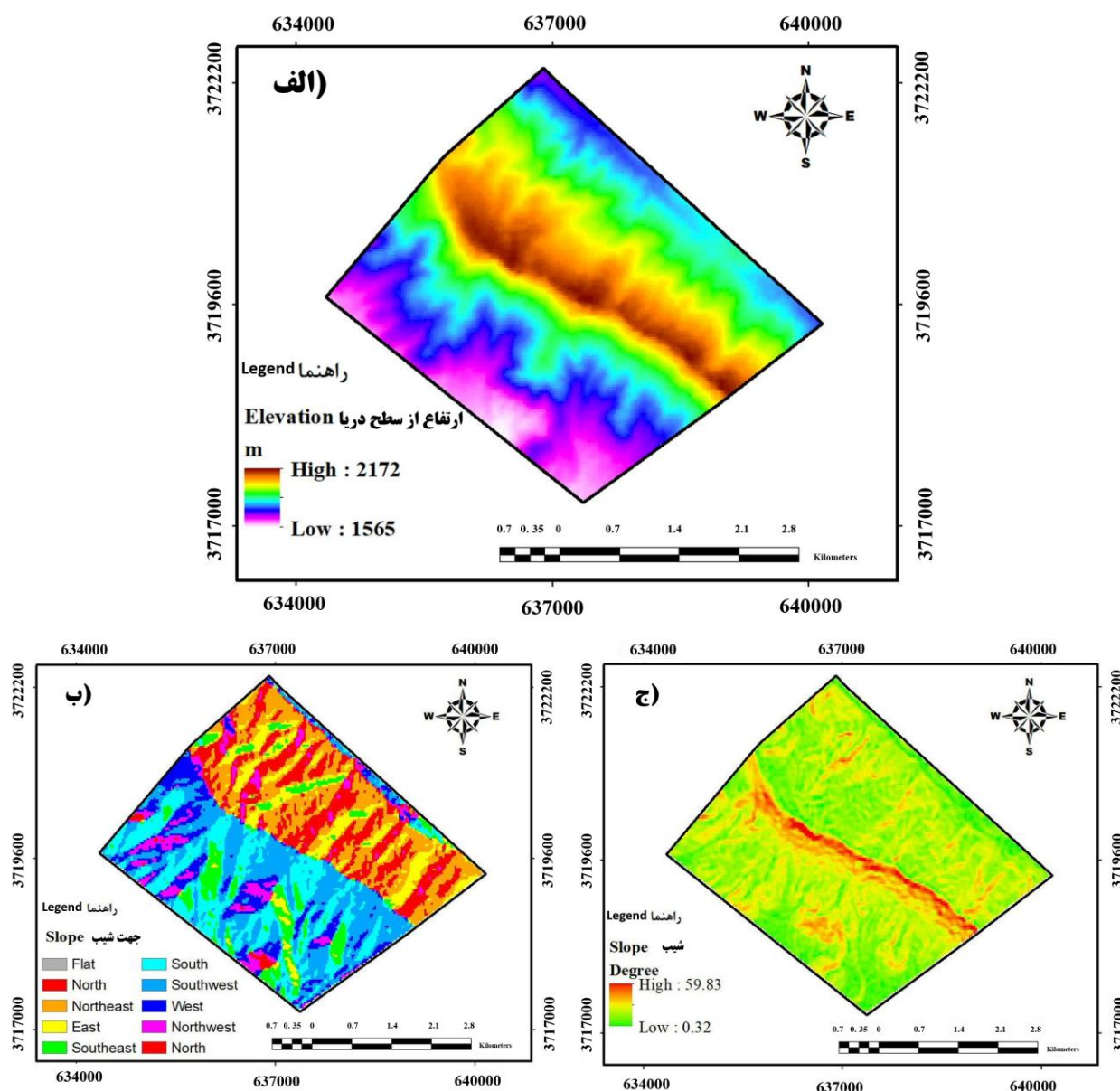
$$Si = 1, \quad \text{if } Xi < L$$

$$Si = 1 - 0.9 * (Xi - L) / (U - L), \quad \text{if } L \leq Xi \leq U$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای ارزیابی همگنی و نرمال بودن داده‌ها، از آزمون‌های لون و کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. بررسی اثرات جهت دامنه و تراکم تاج پوشش در سه موقعیت ارتفاعی (پایین، میانی و بالا) و اثر متقابل آنها بر شاخص‌های کیفیت خاک و رویشگاه با استفاده از مدل‌های خطی عمومی (GLM) تعیین شد.

بسته به ساختار داده‌ها انتخاب می‌شوند (Laun et al., 2016). بهترین مدل با استفاده از نرم‌افزار GS+ و بر اساس کمترین مقدار RSS و بیشترین R^2 تعیین گردید (Stateczny & Włodarczyk-). پس از تعیین مدل واریوگرام مناسب، سه روش کریجینگ (معمولی، عمومی و ساده)، کوکریجینگ و IDW برای درونیابی و تهیه نقشه دو شاخص کیفیت رویشگاه و خاک استفاده شدند. در نهایت، برای هر کدام از شاخص‌ها، بر اساس روشی که کمترین RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) را داشت، نقشه تهیه شد.



شکل ۲- نقشه‌های توپوگرافیک از منطقه مورد مطالعه: نقشه مدل رقومی ارتفاع (الف)، نقشه جهت شیب (ب) و نقشه شیب (ج)

Figure 2- Topographic maps of the study area: Digital elevation model, slope aspect and slope degree

با توجه به نرمال بودن توزیع داده‌ها، تحلیل واریانس (ANOVA و MANOVA) به کار گرفته شد. برای مقایسه میانگین گروه‌های مستقل، از آزمون t و آزمون دانکن استفاده شد. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۳٫۰ (SPSS Inc)، شیکاگو، IL، GIS و R (پکیج ggplot2، Ggally، dplyr، tidyr، broom و purr) انجام شد.

نتایج

ویژگی‌های توپوگرافی منطقه مطالعه

نقشه توپوگرافی (شکل ۲) تغییرات ارتفاعی و جهت دامنه‌های منطقه را نمایش می‌دهد. بر اساس این نقشه، منطقه دارای سه طبقه ارتفاعی مشخص شامل پایین‌بند، میان‌بند و بالابند است که شیب دامنه‌ها به‌طور عمده به سمت شمال و جنوب جهت‌گیری دارند. این الگوی توپوگرافی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری تفاوت‌های میکروکلیمایی، تغییرات رطوبتی و توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک و رویشگاه دارد.

نتایج آماری و مکانی شاخص‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که جهت دامنه و ارتفاع از سطح دریا اثر معنی‌داری بر هر دو شاخص کیفیت خاک و کیفیت رویشگاه داشتند ($p < 0.05$). در مقابل، تأثیر عامل تاج‌پوشش و اثر مقابل جهت دامنه $\times$ تاج‌پوشش تنها بر شاخص کیفیت خاک معنی‌دار ($p < 0.05$) بود (جدول ۱).

نتایج جدول ۲ نشان داد که پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص کیفیت خاک دارای تغییرات فضایی قابل توجهی هستند. بیشترین مقادیر ماده آلی و رطوبت خاک در میان‌بند و بالابند در جهت شمالی و در تاج بسته مشاهده شد، در حالی که کمترین مقادیر ماده

آلی در پایین‌بند و جهت جنوبی-تاج باز و کمترین مقدار رطوبت خاک در دامنه جنوبی-تاج باز-بالابند ثبت گردید. جرم مخصوص ظاهری بیشترین مقدار خود را در پایین‌بند-تاج باز و بسته-جنوبی و کمترین مقدار را در بالابند-تاج بسته-جهت شمالی نشان داد. هدایت الکتریکی نیز بیشترین مقدار را در پایین‌بند-جهت شمالی-تاج بسته/باز و کمترین مقدار را در بالابند-تاج باز-جهت شمالی داشت. بیشترین مقدار pH در جهت جنوبی-تاج باز-میان‌بند و در جهت شمالی-تاج بسته-بالابند کمتر بود. توزیع بافت خاک نیز دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای بود. این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات در ویژگی‌های خاک ارتباط مستقیم با موقعیت توپوگرافیک و وضعیت پوشش گیاهی دارند. به‌ویژه، مناطق دارای پوشش متراکم‌تر (تاج بسته) و شیب‌های شمالی شرایط بهتری برای تجمع ماده آلی و بهبود کیفیت خاک فراهم کرده‌اند، در حالی که دامنه‌های جنوبی و تاج‌های باز از کیفیت پایین‌تری برخوردارند. این تغییرات فضایی در پارامترهای خاک منشا شکل‌گیری نقشه کیفیت خاک بوده و تفاوت‌های مشهود در تغییرات SQI را توضیح می‌دهند.

نتایج مقایسه میانگین شاخص کیفیت خاک نشان داد که در هر سه کلاس ارتفاعی میزان کیفیت خاک در هر دو جهت شمالی و جنوبی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) با هم اختلاف دارند و در دامنه شمالی کیفیت خاک بیشتر از دامنه جنوبی بود. بیشترین مقدار کیفیت خاک (0.184 ± 0.01) در تاج متراکم در جهت شمالی در میان‌بند و کمترین میزان کیفیت خاک (0.060 ± 0.03) در بالابند-دامنه جنوبی-تاج باز مشاهده شد. در هر دو جهت جنوبی و شمالی، از نظر میزان کیفیت خاک بین تاج باز و متراکم اختلاف معنی‌داری مشاهده شد و در هر سه کلاس ارتفاعی و هر دو دامنه شمالی و جنوبی، کیفیت خاک در تاج متراکم بیشتر از تاج باز بود (شکل ۳).

جدول ۱- نتایج مدل‌های خطی عمومی (GLM) برای آزمون اثرات جهت دامنه، ارتفاع از سطح دریا و تراکم تاج‌پوشش بر شاخص کیفیت رویشگاه و شاخص کیفیت خاک

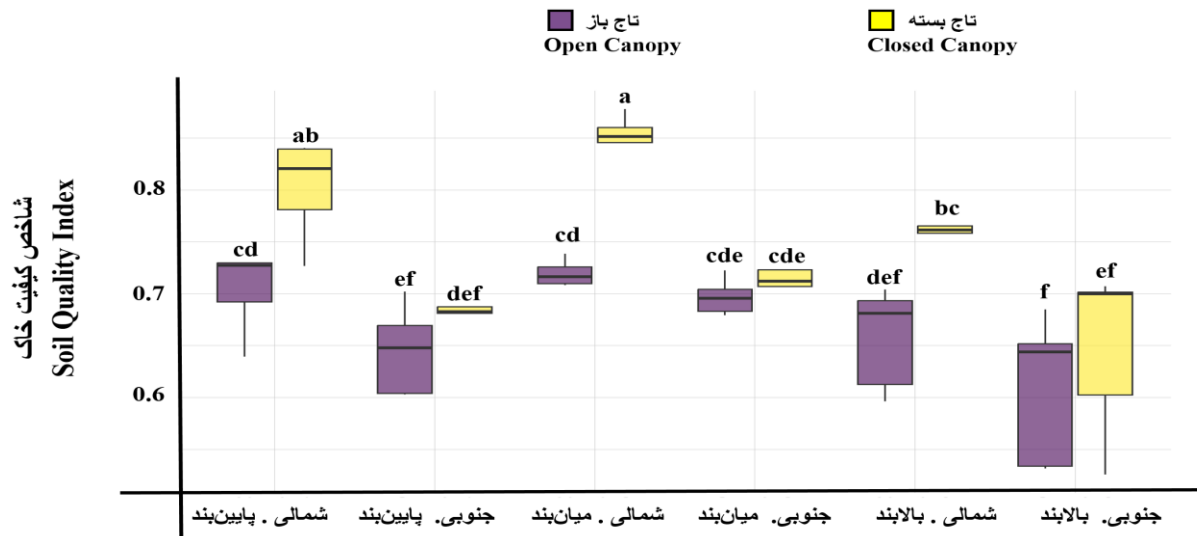
Table 1- Results of generalized linear models (GLM) testing the effects of slope aspect, elevation, and canopy cover density on site quality index and soil quality index

منبع تغییرات Source of variation	شاخص کیفیت خاک Soil quality index				شاخص کیفیت رویشگاه Site index		
	Df	MS	F-value	P-value	MS	F-value	P-value
Aspect جهت دامنه	1	0.115	45.80	0.000	81.090	4.913	0.031
Canopy تاج‌پوشش	1	0.060	23.69	0.000	1.974	0.120	0.731
Elevation ارتفاع از سطح دریا	2	0.029	11.53	0.000	127.156	7.703	0.001
Aspect $\times$ Canopy	1	0.022	8.539	0.005	14.209	0.861	0.358
Aspect $\times$ Eleva	2	0.001	0.345	0.710	29.063	1.761	0.183
Canopy $\times$ Eleva	2	0.000	0.122	0.885	15.155	0.918	0.406
Aspect $\times$ Canopy $\times$ Eleva	2	0.002	0.803	0.454	8.977	0.544	0.584

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین ($\pm$ انحراف معیار) خصوصیات خاک تحت تأثیر اثر متقابل جهت $\times$ ارتفاع از سطح دریا و جهت $\times$ تاج‌پوشش
Table 2- Comparison of mean values ($\pm$ standard error) of soil properties under the interaction effects of aspect $\times$ elevation and aspect $\times$ canopy cover

تاج پوشش Canopy	جهت دامنه Aspect	ارتفاع از سطح دریا Elevation	هدایت الکتریکی EC (µS/cm)	اسیدیته pH	جرم مخصوص ظاهری BD Bulk Density (g/cm³)	ماده آلی Organic matter (%)
Open باز	جنوبی South	پایین‌بند Lowland	161.4± 3.56 c	7.62 ± 0.02 a	1.83± 0.01a	4.84 ± 0.06 f
		میان‌بند Midland	140.32± 5.32 de	7.66 ± 0.02 a	1.79± 0.009 ab	5.22 ± 0.25 e
		بالا‌بند Highland	152.44± 2.99 cd	7.62 ± 0.03 a	1.64± 0.01cd	4.91± 0.11 ef
	شمالی North	پایین‌بند Lowland	210.32± 6.84 a	7.19 ± 0.03 e	1.66± 0.02c	5.80± 0.04 d
		میان‌بند Midland	181.58± 8.03 b	7.40 ± 0.04 c	1.60± 0.02cde	5.97± 0.07 bcd
		بالا‌بند Highland	125.76± 5.47 e	7.40 ± 0.01 c	1.58± 0.01def	5.98 ± 0.12 cd
Closed متراکم	جنوبی South	پایین‌بند Lowland	158.58± 1.43 c	7.51 ± 0.02 b	1.83± 0.01a	6.01 ± 0.23 abcd
		میان‌بند Midland	149.74± 5.43 cd	7.61 ± 0.04 a	1.73± 0.02b	6.20 ± 0.09 abc
		بالا‌بند Highland	160.17± 3.41 c	7.61 ± 0.02 a	1.74± 0.03b	6.14± 0.10 abcd
	شمالی North	پایین‌بند Lowland	210.58± 9.83 a	7.29 ± 0.04 d	1.61± 0.01cde	6.36± 0.02 ab
		میان‌بند Midland	208.24± 4.18 a	7.22 ± 0.01 de	1.56± 0.03ef	6.39± 0.01 a
		بالا‌بند Highland	128.14± 7.14 e	7.10 ± 0.04 f	1.53± 0.01f	6.39± 0.01 a
			Sand (%) شن	Clay (%) رس	Silt (%) سیلت	Moisture (%) رطوبت
Open باز	جنوبی South	پایین‌بند Lowland	21.90±0.40 fg	34.70 ± 1.85 abcd	43.40 ± 1.93 a	4.50±0.18 de
		میان‌بند Midland	20.60±3.65 g	40.4 ± 4.06 a	39.00 ± 0.63 b	4.16±0.29 de
		بالا‌بند Highland	43.00±1.41 a	24.4± 0.97 g	32.60± 1.16 d	3.92±0.24 e
	شمالی North	پایین‌بند Lowland	26.70±1.74ef	39.60± 2.63 ab	33.70± 1.62 cd	4.98±0.25 cde
		میان‌بند Midland	29.90±1.16 de	36.80± 0.48 abc	33.30± 1.35 cd	5.50±0.39 cd
		بالا‌بند Highland	31.10±1.72 de	30.80± 1.85 de	38.10± 1.16 b	5.35±0.32 cde
Closed متراکم	جنوبی South	پایین‌بند Lowland	30.70±1.01de	30.30± 1.49 def	39.00± 0.89 b	5.09±0.27 cde
		میان‌بند Midland	34.60±2.17 cd	26.80± 1.72 efg	38.60± 1.93 b	6.07±0.41 c
		بالا‌بند Highland	38.20±2.05abc	24.80± 0.80 fg	37.00± 1.54 bc	5.44±0.43 cd
	شمالی North	پایین‌بند Lowland	37.30±1.34 bc	31.60± 1.46 cde	31.10± 0.48 d	10.27±0.66 b
		میان‌بند Midland	41.50±1.41 ab	24.80± 0.48 fg	33.70± 1.2 cd	12.45±0.60 a
		بالا‌بند Highland	33.50±1.41 cd	34.00± 1.41 bcd	32.50± 0.63 d	12.46±0.79 a

حروف کوچک تفاوت‌های معنی‌دار بین طبقات ارتفاع از سطح دریای مختلف در دو جهت دامنه و در دو کلاس تاج‌پوشش را بر اساس آزمون چندگانه دانکن ($p < 0.05$) نشان می‌دهند.



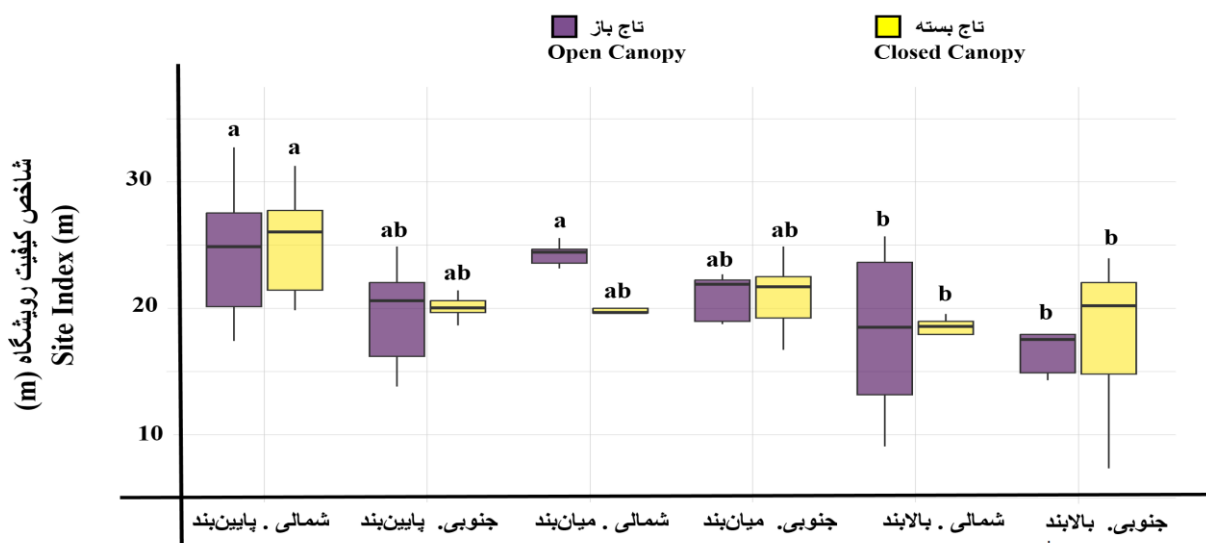
ارتفاع از سطح دریا . جهت دامنه

Aspect . Elevation

شکل ۳- مقایسه میانگین ($\pm$ انحراف معیار) میزان شاخص کیفیت خاک در طبقات مختلف ارتفاع از سطح دریا در جهت شمالی و جنوبی به تفکیک تاج پوشش اشکوب فوقانی باز و متراکم

حروف ناهمسان در ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ درصد می‌باشد

Figure 3- Comparison of the mean ($\pm$ standard error) soil quality index across different elevation classes on northern and southern slopes, separated by open and closed canopy conditions of the upper tree layer
Different letters within columns indicate significant differences at the 0.05 level.



ارتفاع از سطح دریا . جهت دامنه

Aspect . Elevation

شکل ۴- مقایسه میانگین ($\pm$ انحراف معیار) میزان شاخص کیفیت رویشگاه در طبقات مختلف ارتفاع از سطح دریا در جهت شمالی و جنوبی به تفکیک تاج پوشش اشکوب فوقانی باز و متراکم

حروف ناهمسان در ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ درصد می‌باشد

Figure 4- Comparison of the mean ($\pm$ standard error) site quality index across different elevation classes on northern and southern slopes, categorized by open and closed canopy conditions of the upper tree layer
Different letters within columns indicate statistically significant differences at the 0.05 level.

دارد و در دامنه شمالی - تاج متراکم - بالابند ($R^2=0/10$) این رابطه ضعیف بود.

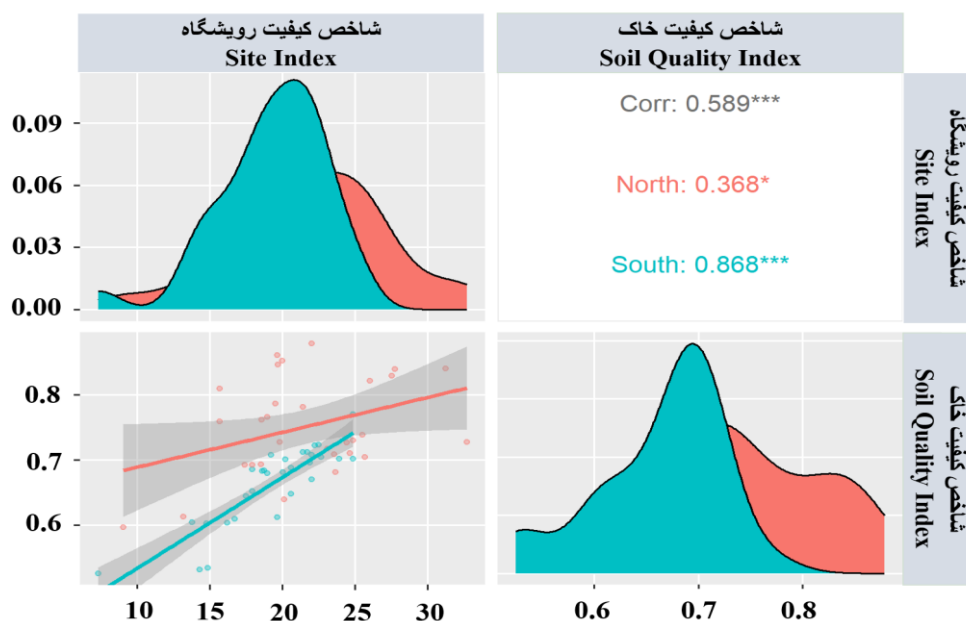
نتایج حاصل از واریوگرام‌های برازش شده در نرم‌افزار GS+ برای مدل‌های مختلف (کروی، نمایی، خطی و گوسین) در داده‌های شاخص کیفیت خاک و کیفیت رویشگاه نشان داد که برای شاخص کیفیت خاک رویشگاه، مدل نمایی (Exponential) و برای شاخص کیفیت خاک مدل کروی (Spherical) به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد (شکل ۷).

نتایج ارزیابی دقت روش‌های مورد بررسی (جدول ۳)، نشان داد که برای شاخص کیفیت خاک کریجینگ معمولی با پایین‌ترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۱/۱۲ و برای شاخص کیفیت رویشگاه کریجینگ عام با پایین‌ترین میزان RMSE معادل ۱/۰۴ بهترین روش برای درون‌یابی در این پژوهش می‌باشند. در نهایت با استفاده از کریجینگ معمولی و کریجینگ عام در این تحقیق نقشه توزیع کیفیت خاک و کیفیت رویشگاه تهیه گردید (شکل ۸).

نتایج مربوط به شاخص کیفیت رویشگاه نشان داد که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، کیفیت رویشگاه کاهش یافت. در ارتفاع بالابند، تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) میان تاج باز و متراکم و جهت جنوبی و شمالی دامنه مشاهده نشد. در دامنه جنوبی، بیشترین مقدار کیفیت رویشگاه در میان‌بند و در دامنه شمالی، بیشترین مقدار آن در پایین‌بند ثبت شد. به‌طور کلی، کیفیت رویشگاه در شرایط تاج باز بیشتر از تاج متراکم بود (بجز دامنه شمالی در میان‌بند). بالاترین کیفیت رویشگاه در دامنه شمالی - تاج متراکم - پایین‌بند ($25/26m \pm 2/08$) و کمترین مقدار آن در دامنه جنوبی - تاج باز - بالابند ($16/51m \pm 0/79$) مشاهده شد (شکل ۴).

نتایج همبستگی میان شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه (شکل ۵) نشان داد که بین این دو شاخص به‌طور کلی ($r = 0/589$)، در دامنه جنوبی ($r = 0/868$) و در دامنه شمالی ($r = 0/368$) رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد.

نتایج رگرسیون بین شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه (شکل ۶) نشان داد که در دامنه جنوبی - تاج باز و متراکم - بالابند ($R^2=0/96$) رابطه قوی و معنی‌داری بین این دو شاخص وجود

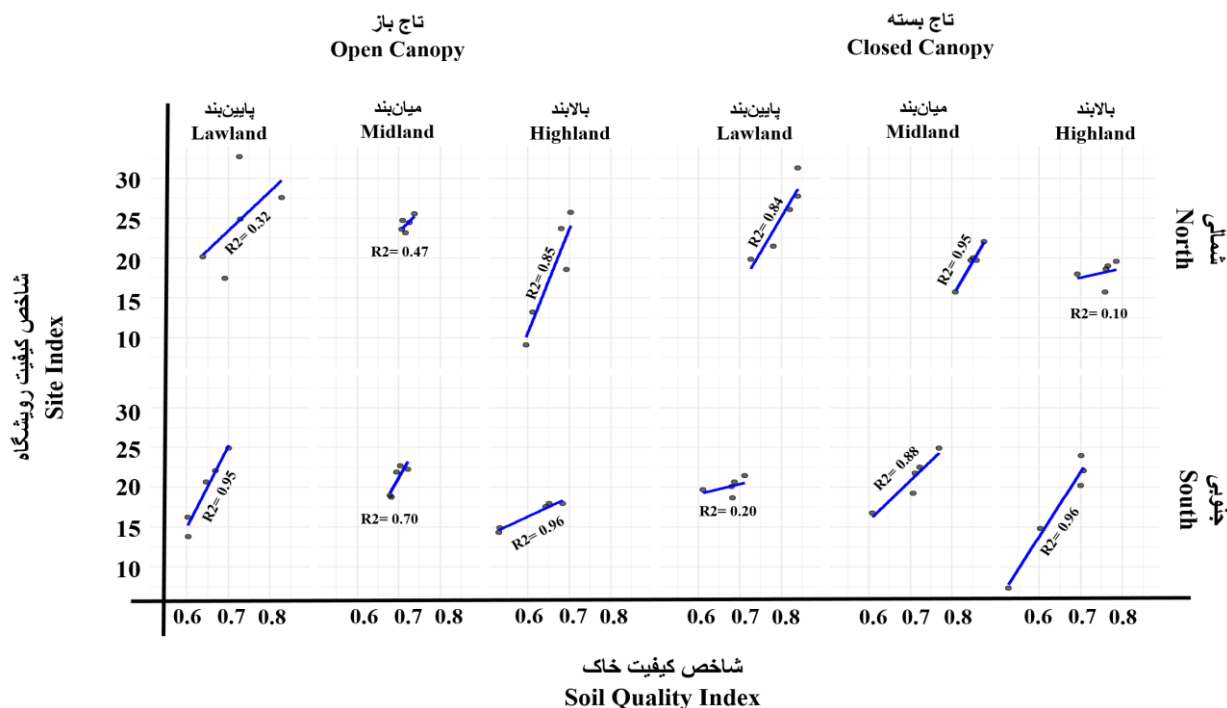


شکل ۵- همبستگی شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه

***، **، و * به ترتیب معنی‌داری در سطوح ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ را نشان می‌دهند.

Figure 5- Correlation between soil quality index and site quality index

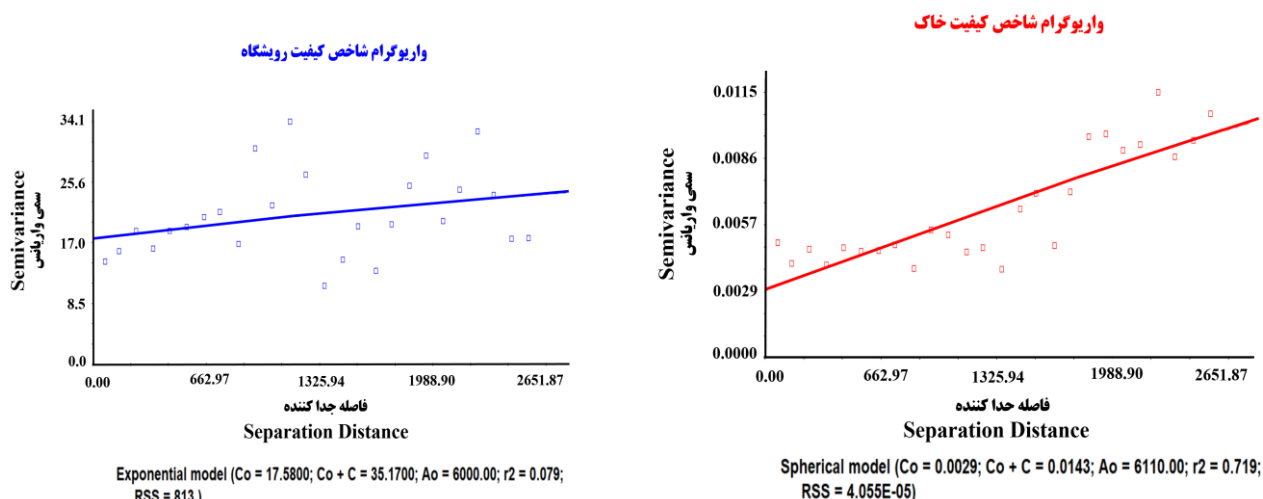
The symbols *, **, and *** indicate statistical significance at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.



شکل ۶- رگرسیون خطی شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه
Figure 6- Linear regression between soil quality index and site quality index

جدول ۳- نتایج صحت‌سنجی سرتاسری برای روش‌های مختلف درونیابی
Table 3- Overall accuracy assessment results for different interpolation methods

ریشه میانگین مربع خطا برآورد استاندارد (RMSE)	میانگین استاندارد شده خطا برآورد (MSE)	معدل خطا استاندارد، خطای برآورد (ASE)	مربع میانگین ریشه خطا برآورد (RMS)	Model مدل	
1.12	0.02	4.7	2.92	کریجینگ معمولی Ordinary Kriging	شاخص کیفیت خاک Soil quality index
4.49	0.38	1.32	3.53	کریجینگ ساده Simple Kriging	
1.93	0.13	3.12	3.04	کریجینگ عام Universal Kriging	
1.74	0.08	3.62	3.16	کو کریجینگ Co-Kriging	
4.55	0.41	1.28	3.89	میانگین وزنی معکوس فاصله IDW	
1.63	0.11	3.08	2.35	کریجینگ معمولی Ordinary Kriging	شاخص کیفیت رویشگاه Site quality index
3.06	0.30	2.03	2.06	کریجینگ ساده Simple Kriging	
1.04	0.004	3.4	1.63	کریجینگ عام Universal Kriging	
1.34	0.03	3.23	2.11	کو کریجینگ Co-Kriging	
3.29	0.35	1.76	2.22	میانگین وزنی معکوس فاصله IDW	



شکل ۷- واریوگرام برازش شده برای شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه

Figure 7- Fitted variogram for soil quality index and site quality index

بحث

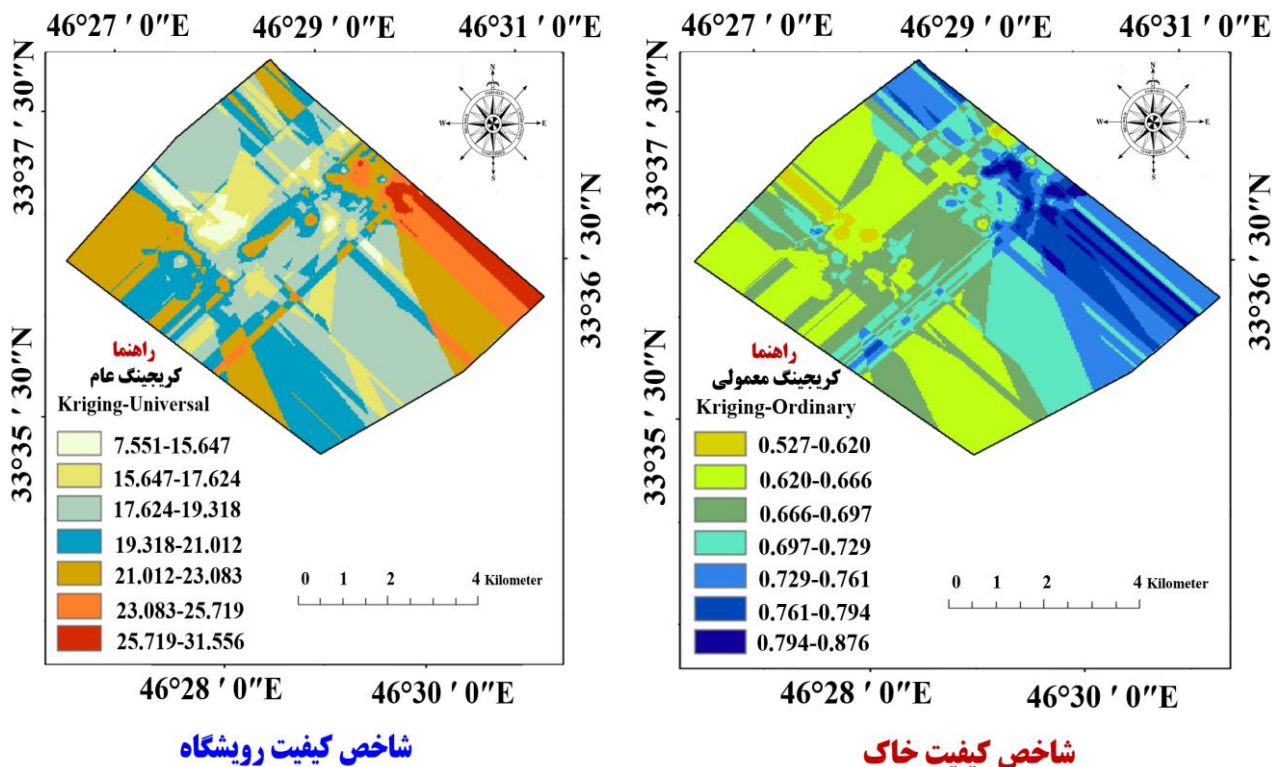
تأثیرات توپوگرافی بر کیفیت خاک و رویشگاه

تغییرات فضایی مشاهده شده در پارامترهای مورد استفاده برای محاسبه شاخص کیفیت خاک با توجه به عوامل توپوگرافی و پوشش گیاهی قابل توجیه است. به‌طور کلی، مقادیر بالاتر ماده آلی و رطوبت در دامنه‌های شمالی و مناطق با تاج بسته و مقادیر بالاتر جرم مخصوص ظاهری و هدایت الکتریکی در پایین‌بند و تاج باز مشاهده شد. همچنین تفاوت‌های جزئی در pH و بافت خاک منعکس‌کننده اثرات تابش خورشید، تبخیر و فرسایش است (Zhou et al., 2015; Khan et al., 2013; Badia et al., 2016). بنابراین، تفاوت‌های مشاهده‌شده در پارامترهای خاک نه تنها بازتاب تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک هستند، بلکه نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده توپوگرافی و نوع پوشش در حفظ یا تخریب کیفیت خاک‌اند. این موضوع اهمیت پوشش گیاهی و مدیریت توپوگرافی را در بهبود شاخص کیفیت خاک (SQI) تأیید می‌کند.

همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص کیفیت خاک در سه کلاسه ارتفاعی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) تحت تأثیر جهت دامنه قرار گرفته و کیفیت خاک در دامنه شمالی بالاتر از دامنه جنوبی بود. همچنین کیفیت خاک در تاج متراکم در هر دو دامنه به‌طور معنی‌داری بیشتر از تاج باز بود، به‌طوری‌که بیشترین کیفیت خاک در تاج متراکم و دامنه شمالی در ارتفاع میان‌بند و کمترین مقدار در تاج باز و دامنه جنوبی در بالاترین بند ثبت شد. این نتیجه می‌تواند به تفاوت تابش خورشید در دامنه‌های شمالی و جنوبی نسبت داده شود؛ دامنه‌های شمالی خنک‌تر و مرطوب‌تر بوده و تجمع ماده آلی بیشتری دارند که منجر به افزایش کیفیت خاک می‌شود (Tyminska-Czabańska et al., 2021). همچنین پوشش تاج

متراکم اشکوب فوقانی باعث کاهش تبخیر، افزایش رطوبت و فراهم کردن بستر مناسب برای تشکیل ماده آلی و افزایش کیفیت خاک می‌شود (Shen et al., 2019). نتایج این تحقیق با یافته‌های لیو و همکاران (Liu et al., 2013) که بالا بودن کیفیت خاک در دامنه‌های شمالی را گزارش کردند هم‌سو بود. همچنین مطالعه ویت و همکاران (Viet et al., 2022) و تقی‌پور و همکاران (Taghipour et al., 2022) بر تأثیر مثبت تاج متراکم بر افزایش کیفیت خاک تأکید داشتند.

همچنین نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، شاخص کیفیت رویشگاه کاهش یافت. در ارتفاع بالاتر، تفاوت معنی‌داری بین جهت دامنه (شمالی و جنوبی) و نوع تاج (باز و متراکم) مشاهده نشد. در دامنه جنوبی، بالاترین شاخص کیفیت رویشگاه در میان‌بند و در دامنه شمالی در پایین‌بند ثبت شد. در مجموع، شاخص کیفیت رویشگاه در تاج باز بیشتر از تاج متراکم بود، به جز در دامنه شمالی در میان‌بند که کیفیت در تاج متراکم بیشتر بود. بالاترین شاخص کیفیت رویشگاه مربوط به دامنه شمالی، تاج متراکم، پایین‌بند و کمترین مقدار مربوط به دامنه جنوبی، تاج باز، بالاترین بند، کاهش کیفیت رویشگاه با افزایش ارتفاع عمدتاً به دلایلی مانند کاهش دما، کوتاه‌تر شدن طول فصل رشد، کاهش ضخامت خاک و کاهش دسترسی به رطوبت نسبت داده می‌شود (Jung et al., 2014). در ارتفاعات بالاتر، عوامل محدودکننده مانند فشار تبخیر بیشتر و دمای پایین‌تر موجب کاهش کارایی استفاده از آب و در نتیجه کاهش کیفیت رویشگاه می‌شود (Ameztegui et al., 2021). علاوه بر این، در شرایط ارتفاعی بالاتر، ریشه‌دوانی درختان به دلیل کم شدن ضخامت خاک محدود می‌شود و بازده تولیدی رویشگاه کاهش می‌یابد (Duan et al., 2022).



شکل ۸- نقشه توزیع شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه به روش کریجینگ
Figure 8- Distribution map of Soil Quality Index and Site Quality Index using Kriging method

کیفیت رویشگاه نیز نشان داد که بین این دو شاخص همبستگی مثبت و معنی داری وجود دارد که این رابطه در دامنه جنوبی بسیار قوی تر از دامنه شمالی است. این تفاوت می تواند به این دلیل باشد که در دامنه جنوبی، به دلیل شرایط سخت تر محیطی مانند تابش مستقیم تر، دمای بالاتر و رطوبت کمتر، کیفیت خاک نقش تعیین کننده تری در رشد گیاهان دارد، بنابراین تأثیر آن بر کیفیت رویشگاه آشکارتر شده و همبستگی بالاتری دیده می شود (García-Saucedo et al., 2024). نتایج رگرسیون نیز نشان داد که نتایج رگرسیون بین شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه (شکل ۵) نشان داد که در دامنه جنوبی- تاج باز و متراکم- بالابند رابطه قوی و معنی داری بین این دو شاخص وجود دارد و در دامنه شمالی- تاج متراکم- بالابند این رابطه ضعیف بود. این تفاوت می تواند به این دلیل باشد که در دامنه هایی که اثر نور، رطوبت و دمای میکروکلیمای بر کیفیت خاک بیشتر قابل مشاهده است گیاهان بیشتر به ویژگی های خاک وابسته می شوند (Lenk et al., 2024). به عبارت دیگر، در دامنه های جنوبی، خاک نقش تعیین کننده تری در تأمین نیازهای رشد ایفا می کند و در نتیجه همبستگی با کیفیت رویشگاه بیشتر می شود (Owliaie, 2010). از سوی دیگر، در مناطق با تاج متراکم، پوشش متراکم درختی ممکن است میکروکلیمای یکنواخت تری ایجاد کند و تأثیر خاک را پوشش دهد

تفاوت بین تاج باز و متراکم نیز قابل توجه است؛ تاج های باز در مناطق ارتفاعی میانی می توانند نور بیشتری به کف جنگل برسانند، که این مسئله در افزایش رشد و بهبود کیفیت رویشگاه نقش دارد (Siegert et al., 2016). در ارتفاع بالابند، شدت محدودیت های محیطی (مثل دما و باد) چنان بالاست که اثرات پوشش تاج و جهت دامنه تضعیف می شود و به همین دلیل اختلاف معنی داری دیده نشده است (Maimouni et al., 2021). مطالعه ژو و همکاران (Zou et al., 2023) روی جنگل های ماسون پاین در چین نشان داد که کیفیت رویشگاه تحت تأثیر مستقیم ارتفاع، جهت دامنه و شیب قرار دارد و کیفیت در ارتفاعات پایین تر بهتر حفظ می شود. مطالعه دان و همکاران (Duan et al., 2022) روی درختان لارچ در شمال چین نیز تأیید کرد که ارتفاع و جهت دامنه اثر معنی داری بر شاخص کیفیت رویشگاه دارند و با افزایش ارتفاع، کیفیت کاهش می یابد. مطالعه آمیزتگیو و همکاران (Ameztegui et al., 2021) نیز نشان داد که حداکثر ارتفاع درختان در ارتفاعات بالاتر کاهش چشمگیر دارد که نشان دهنده کاهش کیفیت رویشگاه است. بنابراین، نتایج این مطالعه با یافته های قبلی همسو است و تأثیر ترکیبی ارتفاع، جهت دامنه و تاج بندی در کیفیت رویشگاه را تأیید می کند. نتایج بررسی همبستگی بین شاخص کیفیت خاک و شاخص

یا کاهش دهد، به‌ویژه در دامنه شمالی که رطوبت بیشتر و شدت نور کمتر است (Arx et al., 2013).

ارزیابی و کاربرد مدل‌های درون‌یابی

نتایج حاصل از برازش واریوگرام‌ها در نرم‌افزار GS+ نشان داد که برای شاخص کیفیت رویشگاه، مدل نمایی و برای شاخص کیفیت خاک، مدل کروی بهترین برازش را داشته‌اند. این یافته نشان می‌دهد که ساختار مکانی شاخص کیفیت رویشگاه نسبت به فاصله به صورت تدریجی و پیوسته کاهش می‌یابد، همبستگی آن در فواصل مختلف تداوم دارد و احتمال وجود روند مکانی مشخص در آن بیشتر است (Lima et al., 2016). در مقابل، کیفیت خاک دارای همبستگی مکانی قوی‌تری در فواصل کوتاه‌تر است و پس از یک فاصله مشخص، همبستگی کاهش یا قطع می‌شود، که با رفتار مدل کروی تطابق دارد (Yan et al., 2019). این تفاوت مدل‌ها از نظر علمی منطقی است، چراکه کیفیت خاک بیشتر تحت تأثیر فرآیندهای موضعی مانند بافت خاک، پوشش گیاهی، شیب و کاربری زمین قرار دارد، در حالی که کیفیت رویشگاه از ترکیب عوامل خاک، میکروکلیم و توپوگرافی در مقیاس وسیع‌تری اثر می‌پذیرد. بنابراین، تفاوت در مقیاس فضایی اثرگذاری این عوامل، منجر به انتخاب مدل‌های متفاوت واریوگرام برای هر شاخص شده است (Appel et al., 2020). نتایج ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی نیز نشان داد که کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging) بهترین عملکرد را برای شاخص کیفیت خاک، و کریجینگ عام (Universal Kriging) دقیق‌ترین روش برای شاخص کیفیت رویشگاه بود. این یافته نیز با توجه به ماهیت مکانی متغیرها قابل توجیه است؛ شاخص‌های خاک معمولاً فاقد روند مکانی مشخص هستند و پراکندگی آن‌ها بیشتر تحت تأثیر عوامل محلی قرار دارد، در نتیجه روش‌هایی مانند کریجینگ معمولی که فرض میانگین ثابت دارند، مناسب‌ترند. در مقابل، شاخص کیفیت رویشگاه تحت تأثیر عوامل محیطی بزرگ‌مقیاس مانند توپوگرافی، نور و اقلیم است و احتمال وجود روند مکانی مشخص در آن بیشتر است، بنابراین کریجینگ عام که امکان لحاظ چنین روندی را دارد، عملکرد دقیق‌تری ارائه می‌دهد (Reshid, 2019). مطالعات مختلفی این موضوع را تأیید کرده‌اند؛ از جمله پژوهشی در جمهوری چک که نشان داد کریجینگ معمولی برای ویژگی‌های خاک دقت بالاتری دارد، در حالی که کریجینگ عام برای متغیرهایی با روند مکانی قوی مناسب‌تر است (Vašát et al., 2018). همچنین در چین، کریجینگ معمولی برای تخمین خصوصیات خاک عملکرد دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌ها داشت (Li et al., 2014). اولیور و وبستر (Oliver & Webster, 2014) نیز در پژوهش خود بیان کرده‌اند که در مواردی که داده‌ها دارای تغییرات سریع در فواصل

کوتاه هستند، به‌کارگیری مدل واریوگرام نمایی در چارچوب کریجینگ معمولی می‌تواند به نتایج دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری منجر شود. در مطالعه‌ای در مراکش نیز مشخص شد کریجینگ معمولی همراه با مدل نمایی بهترین برآورد را برای ماده آلی خاک فراهم می‌کند که تفاوت آن با یافته ما احتمالاً به نوع متغیر مورد بررسی و مقیاس فضایی داده‌ها برمی‌گردد (Bouasria et al., 2021). در مطالعه‌ای دیگر، مقایسه بین کریجینگ و روش‌هایی مانند IDW و RBF نشان داد که انتخاب روش مناسب، به نوع شاخص و وجود یا عدم وجود روند مکانی بستگی دارد (Mokarram et al., 2016) که کاملاً با تحلیل و انتخاب ما در این تحقیق مطابقت دارد. به‌طور کلی کریجینگ معمولی برای واریوگرام‌های کروی مناسب‌تر است، چرا که این مدل با فرض همبستگی مکانی قوی در فواصل کوتاه و بدون وجود روند مکانی، توانایی خوبی در برآورد متغیرهایی مانند کیفیت خاک دارد؛ در مقابل، کریجینگ عام برای واریوگرام‌های نمایی عملکرد بهتری دارد، زیرا کاهش تدریجی همبستگی و وجود روند مکانی را در نظر می‌گیرد و برای متغیرهایی مانند کیفیت رویشگاه که تحت تأثیر عوامل بزرگ‌مقیاس هستند، انتخاب دقیق‌تری است (Reshid, 2019; Vašát et al., 2018; Asa et al., 2012).

بر اساس نتایج این پژوهش، مدیریت پایدار جنگل‌های نیمه‌خشک باید به‌طور ویژه تعاملات بین ساختار تاج و ویژگی‌های توپوگرافی را در نظر بگیرد. از آنجا که کیفیت خاک و رویشگاه تحت تأثیر جهت دامنه و ارتفاع قرار دارد، تدوین برنامه‌های مدیریتی منطقه‌ای ضروری است. برای مثال، در دامنه‌های جنوبی می‌توان با استفاده از پوشش تاج متراکم و افزایش فعالیت‌های حفظ ماده آلی خاک، مقاومت اکوسیستم را در برابر شرایط خشک و تابش شدید بهبود داد. همچنین در ارتفاعات بالاتر، بهره‌گیری از اقدامات حفاظتی که از فرسایش خاک جلوگیری کنند و رطوبت خاک را حفظ نمایند، اولویت دارد. بهره‌گیری از مدل‌های زمین‌آماري مناسب برای برآورد و پیش‌بینی کیفیت خاک و رویشگاه می‌تواند ابزاری مؤثر در پایش بلندمدت و برنامه‌ریزی مدیریت منابع طبیعی باشد. بدین ترتیب، نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان پایه‌ای علمی برای طراحی سیاست‌ها و راهبردهای مدیریت کارآمد در جنگل‌های نیمه‌خشک، به‌ویژه در مواجهه با تغییرات اقلیمی، مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه تحت تأثیر عوامل توپوگرافی (ارتفاع، جهت دامنه) و ساختار پوشش تاج درختی قرار دارند. کیفیت خاک در دامنه شمالی، در تمامی طبقات ارتفاعی، به‌طور معنی‌داری بالاتر از دامنه جنوبی بود، به‌ویژه در شرایط تاج متراکم که سبب افزایش رطوبت، کاهش

دقیق‌ترین نتایج را ارائه دادند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب مدل واریوگرام و نوع روش درون‌یابی باید متناسب با ویژگی‌های ساختار فضایی هر متغیر انجام گیرد و در تحلیل‌های مکانی، توجه به ماهیت فضایی متغیر و انتخاب دقیق مدل زمین‌آماري متناسب، برای دستیابی به نتایج معتبر و قابل اتکا، امری ضروری است. در نهایت، نقشه‌های حاصل از این مدل‌سازی‌ها توزیع فضایی قابل اعتمادی از شاخص‌های کیفیت خاک و رویشگاه ارائه دادند. این نقشه‌ها با دقت بالا می‌توانند به‌عنوان ابزار تحلیلی مؤثر در پایش کیفیت اکولوژیکی مناطق جنگلی، شناسایی رویشگاه‌های حساس، و بهینه‌سازی تصمیمات مدیریتی در مدیریت پایدار منابع طبیعی و برنامه‌ریزی کاربری اراضی جنگلی مورد استفاده قرار گیرند.

فرسایش و بهبود خصوصیات خاک می‌شود. در مقابل، شاخص کیفیت رویشگاه با افزایش ارتفاع کاهش یافت و تأثیر جهت دامنه در ارتفاعات بالا کمتر محسوس بود؛ با این حال، در بیشتر شرایط، تاج باز به‌دلیل دریافت نور بیشتر، شاخص کیفیت رویشگاه بالاتری داشت. ارتباط مثبت و معنی‌دار بین شاخص کیفیت خاک و شاخص کیفیت رویشگاه در کل منطقه تأیید شد، هرچند این همبستگی در دامنه جنوبی بسیار قوی‌تر بود، که می‌تواند نشان‌دهنده نقش کلیدی خصوصیات خاک در تعیین کیفیت رویشگاه در شرایط محیطی سخت‌تر است. مدل‌های واریوگرام نیز نشان دادند که برای شاخص کیفیت خاک مدل کروی و برای شاخص کیفیت رویشگاه مدل نمایی الگوی ساختار مکانی هستند. همچنین روش کریجینگ معمولی برای درون‌یابی شاخص کیفیت خاک و کریجینگ عام برای شاخص کیفیت رویشگاه به‌ترتیب

References

1. Aguirre, A., Moreno-Fernández, D., Alberdi, I., Hernández, L., Adame, P., Cañellas, I., & Montes, F. (2022). Mapping forest site quality at national level. *Forest Ecology and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120043>
2. Ameztegui, A., Rodrigues, M., Gelabert, P., Lavaquioli, B., & Coll, L. (2021). Maximum height of mountain forests abruptly decreases above an elevation breakpoint. *GIScience & Remote Sensing*, 58(4), 442–454. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1894832>
3. Appel, E., Seidel, E.J., & Oliveira, M.S.D. (2020). Geostatistical-based index for spatial variability in soil properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20200086>
4. Arx, G., Pannatier, E.G., Thimonier, A., & Rebetez, M. (2013). Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. *Journal of Ecology*, 101(1). <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12121>
5. Asa, E., Saafi, M., Membah, J., & Billa, A. (2012). Comparison of linear and nonlinear kriging methods for characterization and interpolation of soil data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(1), 11–18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000118)
6. Badía, D., Ruiz, A., Girona, A., Martí, C., Casanova, J., Ibarra, P., & Zufiaurre, R. (2016). The influence of elevation on soil properties and forest litter in the Siliceous Moncayo Massif, SW Europe. *Journal of Mountain Science*, 13(12), 2155–2169.
7. Belkhiri, L., Tiri, A., & Mouni, L. (2020). Spatial distribution of the groundwater quality using kriging and Co-kriging interpolations. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100473. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2020.100473>
8. Bouasria, A., Ibno Namr, K., Rahimi, A., & Ettachfini, E.M. (2021). Geospatial assessment of soil organic matter variability at Sidi Bennour district in Doukkala plain in Morocco. *Journal of Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.12911/22998993/142935>
9. Burkhart, H.E., & Tomé, M. (2012). Modeling forest trees and stands. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>
10. Cao, Q.V. (1993). Estimating coefficients of base-age-invariant site index equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(11), 2343–2347. <https://doi.org/10.1139/X93-288>
11. DeLuca, T.H., Pingree, M.R.A., & Gao, S. (2019). Assessing soil biological health in forest soils. *In Developments in Soil Science*, 36, 397–426. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00016-1>
12. Duan, G., Lei, X., Zhang, X., & Liu, X. (2022). Site index modeling of larch using a mixed-effects model across regional site types in Northern China. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f13050815>
13. Eslaminejad, P., Heydari, M., Kakhki, F.V., Mirab-Balou, M., Omidipour, R., Muñoz-Rojas, M., & Lucas-Borja, M.E. (2020). Plant species and season influence soil physicochemical properties and microbial function in a semi-arid woodland ecosystem. *Plant and Soil*, 456, 43–59.
14. Fathizadeh, O., Hosseini, S.M., Zimmermann, A., Keim, R.F., & Boloorani, A.D. (2017). Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. *Science of the Total Environment*, 601, 1824–1837.
15. García-Saucedo, F., García-Morote, F.A., Picazo, M., Wic, C., Rubio, E., López-Serrano, F., & Andrés-Abellán, M. (2024). Responses of enzymatic and microbiological soil properties to the site index and age gradients in

- Spanish Black Pine (*Pinus nigra* Arn ssp. *salzmannii*) Mediterranean forests. *Forests*, 15(1), 113. <https://doi.org/10.3390/f15010113>
16. Gren, I., & Amuakwa-Mensah, F. (2018). Estimating economic value of site quality for uncertain ecosystem service provision in Swedish forests. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 14(1), 117–126. <https://doi.org/10.1080/21513732.2018.1472143>
17. Griffiths, R., Madritch, M., & Swanson, A. (2009). The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change on soil properties. *Forest Ecology and Management*, 257(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.08.010>
18. Guan, H., & Fan, J. (2020). Effects of vegetation restoration on soil quality in fragile karst ecosystems of southwest China. *Peer Journal*, 8, e9456. <https://doi.org/10.7717/peerj.9456>
19. Heydari, M., & Faramarzi, M. (2014). The short term effects of fire severity on composition and diversity of soil seed bank in Zagros forest ecosystem, Servan County. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 3(9), 69. Isfahan University of Technology.
20. Heydari, M., Roshan, S.A., Lucas-Borja, M.E., Omidipour, R., & Prévosto, B. (2021). Diverging consequences of past forest management on plant and soil attributes in ancient oak forests of southwestern Iran. *Forest Ecology and Management*, 494, 119360.
21. Heydari, M., Cheraghi, J., Omidipour, R., Rostaminia, M., Kooch, Y., Valkó, O., & Carcaillet, C. (2023). Tree dieback, woody plant diversity, and ecosystem driven by topography in semi-arid mountain forests: Implication for ecosystem management. *Journal of Environmental Management*, 339, 117892.
22. Hosseini, A., & Hosseini, S.M. (2022). Contrasting foliar and soil nutrients responses to drought induced crown dieback in a *Quercus brantii* forest. *Dendrobiology*, 87, 101–112. <https://doi.org/10.12657/denbio.087.007>
23. Jafari Haghighi, M. (2003). Soil analysis methods: Sampling and important physical and chemical analyses with emphasis on theoretical and practical principles. Neday-e Zahra Publications, 236pp. (In Persian)
24. Jahanbazi, H., Mirbadin, A.R., & Talebi, M. (2001). Determination of diameter increment of Persian oak (*Quercus brantii*) in West-Iran (Chaharmahal va Bakhtiari Province). *Journal of Forest and Wood Science*, 5(1), 1-32.
25. Jung, E., Otieno, D., Kwon, H., Berger, S., Hauer, M., & Tenhunen, J. (2014). Influence of elevation on canopy transpiration of temperate deciduous forests in a complex mountainous terrain of South Korea. *Plant and Soil*, 378(1–2), 153–172. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-2019-z>
26. Khan, F., Hayat, Z., Ahmad, W., Ramzan, M., Shah, Z., Sharif, M., & Hanif, M. (2013). Effect of slope position on physico-chemical properties of eroded soil. *Soil in the Environment*, 32, 22-28.
27. Koosha, N., Mohammadi-Samani, K., & Hosseini, V. (2022). Carbon stock and some chemical properties of soil in sacred groves and pollarded forest stands of Northern Zagrosf. *Journal of Water and Soil*, 36(5), 579-591. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.2022.77579.1180>
28. Laun, S., Rösch, N., Breunig, M., & Doori, M.A. (2016). Implementation of kriging methods in mobile GIS to estimate damage to buildings in crisis scenarios. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 211-216. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b2-211-2016>
29. Lenk, A., Richter, R., Kretz, L., & Wirth, C. (2024). Effects of canopy gaps on microclimate, soil biological activity and their relationship in a European mixed floodplain forest. *The Science of the Total Environment*, 173572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173572>
30. Leul, Y., Assen, M., Damene, S., & Legass, A. (2023). Effects of land use types on soil quality dynamics in a tropical sub-humid ecosystem, western Ethiopia. *Ecological Indicators*, 147, 110024. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110024>
31. Li, X., Li, H., & Liu, H. (2014). Mapping the spatial variability of soil properties: A comparative study of spatial interpolation methods in Northeast China. *Applied Mechanics and Materials*, 535, 483–488. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.535.483>
32. Ligas, M., Lucki, B., & Banasik, P. (2022). A crossvalidation-based comparison of kriging and IDW in local GNSS/levelling quasigeoid modelling. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 114, 1-7. <https://doi.org/10.2478/rgg-2022-0004>
33. Lima, G.C., Silva, M.L., Freitas, D.A.F., Cândido, B., Curi, N., & Oliveira, M.S.D. (2016). Spatialization of soil quality index in the Sub-Basin of Posses, Extrema, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1), 78–84. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V20N1P78-84>
34. Liu, Z., Shao, M., & Wang, Y. (2013). Large-scale spatial interpolation of soil pH across the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 69(8), 2731–2741. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2095-z>
35. Maimouni, S., Daghor, L., Oukassou, M., Moutaki, S., & Lhissou, R. (2021). Evaluate the effect of topographic factors and lithology on forest cover distribution: a case study of the Moroccan High Atlas. *Environmental Modeling & Assessment*, 26, 787–801. <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09785-3>
36. Mokarram, M., Najafi-Ghiri, M., Negahban, S., & Roshan, G. (2016). Relationship between landform and soil salinity in the surface and subsurface soils (case study: Southeast of Fars Province, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0073-7>

37. Moradi, E., & Sharifi, A. (2022). Assessment of forest cover changes using multi-temporal Landsat observation. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 1351–1360. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02097-2>
38. Mukherjee, A., & Lal, R. (2014). Comparison of soil quality index using three methods. *PLoS ONE*, 9(8), e105981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>
39. Murphy, P., Knowles, J., Moore, D., Anchukaitis, K., Potts, D., & Barron-Gafford, G. (2020). Topography influences species-specific patterns of seasonal primary productivity in a semiarid montane forest. *Tree Physiology*. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa083>
40. Nepal, S., Kc, M., Pudasaini, N., & Adhikari, H. (2023). Divergent effects of topography on soil properties and above-ground biomass in Nepal's mid-hill forests. *Resources*, 12(11), Article 136. <https://doi.org/10.3390/resources12110136>
41. Nord-Larsen, T., Meilby, H., & Skovsgaard, J.P. (2009). Site-specific height growth models for six common tree species in Denmark. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24(2), 194–204. <https://doi.org/10.1080/02827580902795036>
42. Oliver, M., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, 113, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
43. Owliaie, H. (2010). *Effect of Oak (Quercus brantii Lindl.) canopy on soil properties of Zagros forests, Southwestern Iran (Case study: Yasouj Region)*. Geophysical Research Abstracts, 12, EGU2010-7609.
44. Perrier, E., & Salkini, A. (1991). Soil water measurement. *Water Management*, 123–131.
45. Reshid, T.M. (2019). Kriging and simulation in Gaussian random fields applied to soil property interpolation. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 8(6), 296. <https://doi.org/10.11648/J.AJTAS.20190806.21>
46. Sasanifar, S., Alijanpour, A., Banj Shafiei, A., Eshaghi Rad, J., & Molaei, M. (2024). Forest conservation mediating soil quality relationship with diversity of various plant layers in the biosphere of Arasabran, Iran. *Science of The Total Environment*, 928, 172475. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172475>
47. Shabani, A., Matinfar, H.R., Arekhi, S., & Rahimi Harabadi, S. (2011). Modeling rainfall erosivity factor using geostatistic techniques (Case study: Ilam Dam watershed). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 2(2), 56–65. (Translated in Persian)
48. Shen, Q., Wang, Y., Wang, X., Liu, X., Zhang, X., & Zhang, S. (2019). Comparing interpolation methods to predict soil total phosphorus in the Mollisol area of Northeast China. *CATENA*, 174, 485–495. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.10.052>
49. Siegert, C., Levia, D., Hudson, S., Dowtin, A., Zhang, F., & Mitchell, M. (2016). Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 359, 109–117. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.09.028>
50. Stateczny, A., & Włodarczyk-Sielicka, M. (2012). Test results of bathymetric data processing obtained by swath sounder GS+. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 53(4), 105–118.
51. Swetha, B.S., Prabhakar, I., & Veeresh. (2023). The role of forests in combating climate change and promoting sustainable development: An integrative review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 3755–3761. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i113555>
52. Taghipour, K., Heydari, M., Kooch, Y., Fathizad, H., Heung, B., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2022). Assessing changes in soil quality between protected and degraded forests using digital soil mapping for semiarid oak forests, Iran. *CATENA*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106204>
53. Tiyawarman, A.A.C., Kurniadin, N., Wumu, R., & Itsnani SM, A. (2024). Pemetaan Muka Air Tanah dengan Menggunakan Metode IDW dan Kriging di PT Bukit Baiduri Energi (Blok Utara) Kabupaten Kutai Kartanegara. *Journal of Geomatics Engineering, Technology, and Science*. <https://doi.org/10.51967/gets.v2i2.39>
54. Tymińska-Czabańska, L., Socha, J., Maj, M., Cywicka, D., & Hoang Duong, X.V. (2021). Environmental drivers and age trends in site productivity for oak in Southern Poland. *Forests*, 12(2), 209. <https://doi.org/10.3390/F12020209>
55. Vašát, R., Pavlů, L., Borůvka, L., Drábek, O., & Nikodem, A. (2018). Mapping the topsoil pH and humus quality of forest soils with ordinary, universal, and regression kriging: Cross-validation comparison. *Soil and Water Research*, 8, 97–104. <https://doi.org/10.17221/62/2012-SWR>
56. Viet, H.D.X., Tymińska-Czabańska, L., & Socha, J. (2022). Drivers of site productivity for oak in Poland. *Dendrobiology*, 88, 57–69. <https://doi.org/10.12657/denbio.088.006>
57. Xue, W., Chen, Y., Dong, C., & Qiao, Y. (2021). Influence of abiotic and biotic factors on soil microbial biomass in *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Hilly Region. *Forests*, 12(4), 501. <https://doi.org/10.3390/f12040501>
58. Yan, P., Peng, H., Luobin, Y., & Lin, K. (2019). Spatial variability of soil physical properties based on GIS and geo-statistical methods in the red beds of the Nanxiong Basin, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(4), 2961–2972. <https://doi.org/10.15244/pjoes/92245>
59. Zhou, X., Zhou, Y., Zhou, C., Wu, Z., Zheng, L., Hu, X., Chen, H., & Gan, J. (2015). Effects of cutting intensity on soil physical and chemical properties in a mixed natural forest in Southeastern China. *Forests*, 6(12), 4495–

4509. <https://doi.org/10.3390/f6124383>

60. Zou, K., Duan, G., Wu, Y., Wang, Z., & Liu, X. (2023). Site index model for Southern Subtropical Masson pine forests using stand dominant height. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f15010087>

Effect of Fe Aminochelates and FeSO₄ Fertigation on the Distribution of Fe Chemical Fractions in the Soil Solid Phase and Fe Concentration in Sunflower

M. Alipour Babadi^{1*}, M. Norouzi Masir¹, A. Moezzi¹, A. Rahnama Ghahfarokhi², M. Taghavi Zahedkolaei³

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: m-alipour_babadi@stu.scu.ac.ir)

2- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 20 July 2025

Revised: 10 October 2025

Accepted: 02 November 2025

Available Online: 02 November 2025

How to cite this article:

Alipour Babadi, M., Norouzi Masir, M., Moezzi, A., Rahnama Ghahfarokhi, A., & Taghavi Zahedkolaei, M. (2025). Effect of fertigation-applied iron (Fe) aminochelates and FeSO₄ on the distribution of Fe chemical fractions in the soil solid phase and Fe concentration in sunflower. *Journal of Water and Soil*, 39(4), . (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.94536.1491>

Introduction

Iron (Fe) is an essential micronutrient that plays a vital role in various plant metabolic processes. However, in calcareous soils with high pH, the availability of Fe is greatly limited due to its precipitation into insoluble forms, resulting in Fe deficiency and reduced crop yields. This limitation highlights the need for alternative strategies to enhance Fe uptake efficiency in plants. Recent studies suggest that Fe aminochelates (complexes of Fe with organic ligands such as amino acids) can significantly improve Fe availability and uptake in alkaline soils. Fe deficiency is especially problematic in arid and semi-arid regions, where calcareous soils dominate and conventional Fe fertilizers, such as FeSO₄, are often ineffective due to rapid oxidation and fixation of Fe³⁺. Insufficient Fe availability disrupts chlorophyll synthesis, enzyme activity, and overall photosynthetic efficiency, which ultimately affects plant growth, biomass accumulation, and nutritional quality. Therefore, improving Fe acquisition through more stable and bioavailable sources is crucial for sustainable crop production. Among various synthetic and natural Fe sources, Fe aminochelates have drawn attention because of their stability, solubility, and ability to resist precipitation in high-pH environments. By forming soluble Fe–amino acid complexes, these chelates enhance Fe translocation within plant tissues and promote physiological functions even under Fe-limiting conditions. Given this potential, the present study was conducted with the following objectives: (i) to evaluate the effect of fertigation application with Fe aminochelates and FeSO₄ on the distribution of Fe chemical fractions in the solid phase of calcareous soil, (ii) to analyze the correlation between soil Fe fractions and Fe content/uptake in sunflower (*Helianthus annuus* L. cv. Oscar), and (iii) to establish a comparative efficacy framework for Fe sources in calcareous soil-plant systems under fertigation management.

Materials and Methods

A field experiment was carried out using a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The treatments included: (1) control (without any Fe fertilizer), (2) FeSO₄ at 20 kg ha⁻¹, (3) Fe-glycine [Fe (Gly)₂] aminochelate at 4 L ha⁻¹, and (4) Fe-methionine [Fe(Met)₂] aminochelate at 4 L ha⁻¹. Fertilizers were applied through irrigation (fertigation). At the end of the growing season, soil samples were



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.94536.1491>

collected and analyzed for pH, DTPA-extractable Fe, and Fe chemical forms in the solid phase using the modified Tessier sequential extraction method. The measured Fe fractions included exchangeable (EXC-Fe), organically bound (ORG-Fe), carbonate-bound (CAR-Fe), Fe/Mn oxide-bound (OX-Fe), and residual (RES-Fe). Additionally, Fe concentration in sunflower seeds and leaves and also seed Fe uptake were quantified.

Results and Discussion

Application of Fe aminochelates significantly affected Fe dynamics in the soil and improved Fe nutrition of plants. Both $[\text{Fe}(\text{Gly})_2]$ and $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$ treatments resulted in a significant decrease in soil pH compared to the control and FeSO_4 , which likely enhanced Fe solubility. The DTPA-extractable, relative to the control, Fe content increased by 28.5% and 35.2% in $[\text{Fe}(\text{Gly})_2]$ and $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$ treatments, respectively. These treatments also increased seed Fe concentration by 5.1% and 7.5%, and seed Fe uptake by 66.6% and 86.7%, respectively. The distribution of Fe chemical fractions in the soil followed the order: residual > Fe/Mn oxides > carbonate-bound > organically bound > exchangeable. Fe aminochelates, especially $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$, significantly enhanced the relative proportion of EXC-Fe and ORG-Fe while decreasing the proportion of CAR-Fe compared to both control and FeSO_4 . Furthermore, DTPA-extractable Fe exhibited strong positive correlations with EXC-Fe ($r = 0.87^{**}$) and ORG-Fe ($r = 0.84^{**}$) fractions. Among the different forms, EXC-Fe ($r = 0.72^{**}$) and ORG-Fe ($r = 0.69^{**}$) showed significant positive correlations with seed Fe concentration, indicating their critical role in Fe bioavailability and plant uptake. These findings support the hypothesis that $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$, due to its greater stability and chelation strength, improves Fe mobilization and provides a renewable pool of bioavailable Fe in the soil system. Thus, Fe aminochelates can contribute to improved nutrient acquisition and enhanced crop quality under Fe-deficient calcareous conditions.

Conclusion

This study confirms the superior efficacy of Fe aminochelates, particularly $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$, over conventional FeSO_4 in enhancing Fe bioavailability in nutrient-deficient, calcareous soils. The significant shift in Fe fractions towards more labile pools (EXC-Fe and ORG-Fe) and the strong correlations between these pools and plant Fe uptake underscore the potential of aminochelates to create a more plant-available Fe reservoir. Therefore, the use of Fe aminochelates represents a viable and efficient strategy to correct Fe deficiency and improve crop nutritional quality in calcareous soils, contributing to more sustainable micronutrient management practices.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Research council of Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran for the financial support of this research (grant number: SCU.AS1401.26962).

Keywords: Aminochelates, Available iron, Iron uptake, Sequential extraction, Sunflower

تأثیر کاربرد کودآبیاری آمینوکلات‌های آهن و سولفات آهن بر توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک و غلظت آهن در آفتابگردان

مینا عالی پور بابادی^{۱*} - مجتبی نوروزی مصیر^۱ - عبدالامیر معزی^۱ - افراسیاب راهنما قهفرخی^۲ - مهدی تقوی زاهد کلانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

چکیده

کشت گیاه در خاک‌های آهنی دچار کمبود آهن (Fe)، نیازمند استراتژی‌های نوین مدیریت عناصر غذایی، به‌ویژه غنی‌سازی زیستی آهن است. این مطالعه با هدف بررسی شکل‌های شیمیایی مختلف آهن در فاز جامد خاک و همبستگی آنها با غلظت و جذب آهن در گیاه آفتابگردان (رقم اسکار) انجام شد. این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار در شرایط مزرعه انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کود آبیاری آمینوکلات گلیسین - آهن $[Fe (Gly)_2]$ (۴ لیتر در هکتار)، آمینوکلات متیونین - آهن $[Fe (Met)_2]$ (۴ لیتر در هکتار)، کود سولفات آهن (به مقدار ۲۰ کیلوگرم در هکتار) و تیمار شاهد (بدون کود) بود. پس از اتمام دوره کشت، pH خاک، غلظت آهن قابل استفاده در خاک و غلظت آهن در برگ و دانه گیاه اندازه‌گیری شد. جهت تعیین غلظت شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک، از روش عصاره‌گیری متوالی استفاده شد. نتایج نشان داد آمینوکلات‌های گلیسین - آهن و متیونین - آهن به‌طور معنی‌داری pH خاک را کاهش داده و به‌ترتیب موجب افزایش غلظت آهن قابل استفاده خاک (۳۵/۲ و ۲۸/۵ درصد افزایش)، غلظت آهن دانه (۵/۱ و ۷/۵ درصد افزایش) و جذب آهن دانه (۶۶/۶ و ۸۶/۷ درصد افزایش) نسبت به تیمار شاهد شدند. آمینوکلات‌های آهن به‌ویژه متیونین - آهن سبب افزایش معنی‌دار غلظت آهن به فرم تبدلی و متصل به ماده آلی و کاهش غلظت آهن کربناتی نسبت به تیمار سولفات آهن و شاهد در فاز جامد خاک شدند. آهن قابل استفاده با اجزای تبدلی و متصل به ماده آلی (به‌ترتیب $r^{**} = 0.87$ و $r^{**} = 0.84$) همبستگی مثبت معنی‌داری نشان داد. همچنین از بین شکل‌های شیمیایی آهن، آهن تبدلی ($r^{**} = 0.72$) و آهن متصل به ماده آلی ($r^{**} = 0.69$) با غلظت آهن دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری داشتند که بیانگر نقش مؤثر این شکل‌ها در تغذیه آهن گیاه بود. یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از آمینوکلات‌های آهن در قالب روش کودآبیاری، با بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک، موجب افزایش فراهمی زیستی آهن شده و در نتیجه نقش مؤثری در ارتقاء وضعیت تغذیه‌ای گیاه آفتابگردان تحت شرایط کمبود آهن ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آفتابگردان، آمینوکلات، آهن قابل استفاده، جذب آهن، عصاره‌گیری متوالی

مقدمه

بوده و کودها نقشی حیاتی در رفع کمبود عناصر غذایی ایفا می‌کنند (McConnell et al., 2023). با توجه به وضعیت فعلی روند تخریب اراضی کشاورزی و نیز فراگیری گرسنگی پنهان ناشی از کمبود عناصر غذایی در خاک، اهداف توسعه پایدار (SDG^۴) تا سال ۲۰۳۰ محقق نخواهد شد (Denning, 2025). این چالش به‌ویژه در خاک‌های آهنی که بخش قابل‌توجهی از زمین‌های کشاورزی جهانی را تشکیل می‌دهند، مشهود است؛ زیرا دسترسی عناصر غذایی به‌ویژه آهن اغلب به‌دلیل حلالیت کم در سطوح pH بالا و نیز وجود مقادیر

توانایی کشاورزی مدرن در تأمین امنیت غذایی یک مسئله جهانی

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: alipour_babadi@stu.scu.ac.ir

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.94536.1491>

زیادی از کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها محدود است (Ning et al., 2023; Naeem et al., 2023). هنگامی که pH خاک از ۸/۵ تجاوز کند، آهن عمدتاً به شکل کربنات آهن نامحلول در فاز جامد خاک وجود دارد (Huei-hsuan & Wolfgang, 2020). در این شرایط، حلالیت آهن به دلیل تمایل آن به تشکیل ترکیبات اکسی هیدروکسید، هیدروکسید و اکسیدی محدود بوده که سبب کاهش قابلیت دسترسی آن برای گیاه می‌شود (Priyadarshini et al., 2019). آهن به دلیل عملکردهای حیاتی آن در فرآیندهای مختلف فیزیو-بیوشیمیایی گیاه با افزایش رشد، متابولیسم و مورفولوژی گیاه مرتبط است (Tripathi et al., 2018; González et al., 2019; et al., 2019). علاوه بر این، آهن نقش مهمی در تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و نیز فرآیندهای متابولیک سلولی، از جمله فتوسنتز، تثبیت نیتروژن، بیوسنتز مولکول‌های کلروفیل و سنتز متالوپروتئین‌ها ایفا می‌کند (Liu et al., 2014; Santos et al., 2019; Marschner, 2012). گیاهان دارای کمبود آهن واکنش اکسیداسیون و فعالیت آنزیمی کمتری دارند (Shambhavi et al., 2016).

حلالیت آهن در خاک و جذب آن توسط ریشه گیاه تا حد زیادی به pH، شرایط اکسیداسیون و احیا خاک و شکل آهن محلول بستگی دارد (Azadi et al., 2021). همچنین توزیع اشکال شیمیایی مختلف آهن در خاک، بسته به ویژگی‌های خاک، متفاوت بوده و می‌تواند بر جذب آن توسط گیاه تأثیر بگذارد. روش‌های استخراج متوالی، اغلب برای درک شیمی عناصر غذایی نظیر آهن و تعامل آنها با سایر اجزای خاک مانند کانی‌های رسی، مواد آلی و محلول خاک، و نیز جهت ارزیابی تحرک و حلالیت آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Shambhavi et al., 2016). مطالعات اشکال شیمیایی آهن در خاک، معمولاً آهن را به بخش‌های قابل تبادل، پیوند شده با مواد آلی، متصل به کربنات‌ها، متصل به اکسیدها و بخش‌های باقی‌مانده تقسیم‌بندی می‌کنند (Tessier et al., 1979). توزیع آهن در بین این بخش‌ها، تحرک و قابلیت دسترسی آن برای جذب توسط گیاه را تعیین می‌کند (Uren, 1984). شکل‌های محلول و قابل تبادل آهن، نسبت به اجزای باقیمانده و متصل به کربنات‌ها و اکسیدها در خاک قابلیت جذب بیشتری برای گیاه دارند (Xian, 1989). با توجه به نوع خاک و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن شکل غالب آهن قابل جذب به‌عنوان منبع اصلی آهن برای گیاه متفاوت است. در مطالعات مختلف منبع آهن ترکیب شده با مواد آلی خاک (Wei et al., 2010; Colombo et al., 2014) و یا آهن تبدلی (Young et al., 2006)، به‌عنوان منابع اصلی آهن قابل جذب برای گیاه گزارش شده‌اند، با این وجود آهن تبدلی به دلیل مقادیر کم آن، سهم اندکی از مقدار کل آهن قابل جذب محسوب می‌شود (Wei et al., 2010).

بنابراین درک پویایی شکل‌های شیمیایی مختلف آهن برای بهینه‌سازی استراتژی‌های کوددهی آهن و بهبود تغذیه آهن در گیاه

بسیار حائز اهمیت است. استفاده طولانی‌مدت از کود شیمیایی آهن مانند سولفات آهن سبب تشکیل ترکیبات غیر محلول آهن در خاک شده و کارایی مناسب را در رفع علائم کمبود آهن در گیاه نخواهد داشت (Ning et al., 2023; Nikolic et al., 2018). در مقابل، کودهای آلی خاک نه تنها دارای محتوای آهن بالا، عملکرد پایدار و عمدتاً محلول در آب هستند، بلکه می‌توانند مقدار ماده آلی خاک را افزایش داده و سبب حفظ اثربخشی عناصر غذایی خاک، بهبود ظرفیت انتقال آهن در گیاه و افزایش جذب آهن توسط گیاه شوند (Ren et al., 2025). از این رو، استفاده از یک روش جایگزین نظیر کاربرد آمینوکلات‌های آهن، به عنوان کودهایی با بنیان آلی، فرمولاسیون نوین و کارایی بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Souri & Hatamian, 2018; Ghasemi et al., 2014). آمینوکلات‌های آهن حلالیت و دسترسی زیستی آهن را با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با یون‌های آهن، جلوگیری از رسوب و تسهیل جذب توسط گیاهان افزایش می‌دهند (Fernández & Ebert, 2005). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از آمینوکلات‌های آهن در گیاهان مختلف می‌تواند به بهبود جذب آهن و عملکرد گیاه، حتی در خاک‌های آهکی، منجر شود. به‌عنوان مثال، سوری و همکاران (Souri et al., 2018) گزارش کردند که کاربرد خاکی و محلول پاشی آمینوکلات گلايسين-آهن سبب افزایش معنی‌دار غلظت آهن برگ و بهبود شاخص‌های کیفیت غلاف در لوبیا شد. به‌طور مشابه، ظهیر و همکاران (Zaheer et al., 2020) گزارش کردند که کاربرد آمینوکلات لیزین-آهن حتی در حضور عوامل محدودکننده دسترسی آهن، موجب بهبود رشد و افزایش غلظت آهن جذب‌شده در بافت‌های گیاه اسفناج شد. از سوی دیگر، آمینوکلات‌ها در مقایسه با کلات‌های آلی مصنوعی نظیر Fe-EDTA و Fe-EDDHA زیست تخریب‌پذیرتر و سازگار با محیط‌زیست هستند (Santos et al., 2020). استفاده از کلات‌های مصنوعی می‌تواند همراه با معایبی مانند بقایای لیگاند آزاد، احتمال حرکت یون‌های فلزات سنگین و کاهش زیست‌پایداری باشد؛ درحالی‌که انواع لیگاندهای طبیعی، اگرچه ممکن است پایداری کاملاً مشابهی نداشته باشند، در کوتاه‌مدت عملکرد قابل قبولی داشته و اثرات منفی زیست‌محیطی کمتری ایجاد می‌کنند (Nadal et al., 2015; López-Rayó et al., 2012). با وجود مطالعات گسترده بر روی کلات‌های مصنوعی، شواهد محدودی درخصوص رفتار کلات‌های آلی با بنیان اسیدهای آمینه (آمینوکلات‌ها) در خاک‌های آهکی با pH و کربنات بالا و رقابت یونی شدید وجود دارد. اغلب پژوهش‌های پیشین بر پاسخ گیاه به تغذیه آهن تمرکز داشته و یا صرفاً به بررسی آهن محلول یا قابل استخراج پرداخته‌اند. با این حال، بررسی جامع توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک (مانند آهن قابل تبادل، متصل به کربنات‌ها و مواد آلی، اکسیدی و

قرمز با استفاده از دستگاه $FT-IR^1$ مدل 8400 Shimadzu در دامنه 4000 تا 400 cm^{-1} با صفحه KBr انجام شد (جدول ۳). همچنین تجزیه عنصری آمینوکلات‌ها با استفاده از دستگاه elemental analyzer مدل Perkin-Elmer 2400 انجام شد (جدول ۴).

آزمایش مزرعه‌ای

قبل از انجام آزمایش جهت تعیین ویژگی‌های خاک مورد مطالعه، ابتدا نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری به‌صورت مرکب انتخاب و پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Rhoades, 1996)، هدایت الکتریکی و pH در سوسپانسیون ۱:۲/۵ خاک: آب، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Walkley, 1947)، کربنات کلسیم به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و تیتراسیون برگشتی با هیدروکسید سدیم (Elfaki, 2016)، فسفر قابل دسترس به روش اولسن (Olsen & Sommers, 1982)، پتاسیم قابل تبادل با استفاده از استات آمونیوم و نیتروژن به روش کجلدال (Bremner & Mulvaney, 1982) تعیین شد. برای اندازه‌گیری آهن قابل استفاده از محلول DTPA-TEA (۵ میلی‌مولار) استفاده شد و غلظت آهن در عصاره به‌وسیله دستگاه جذب اتمی PerkinElmer مجهز به کوره گرافیتی (مدل AAAnalyst 800) تعیین شد (Hossner, 1996). با توجه به نتایج حاصل از تجزیه ویژگی‌های شیمیایی خاک، غلظت آهن قابل استفاده (عصاره‌گیری شده با DTPA) برابر با ۴/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. بر اساس گزارش جلالی و همکاران (Jalali et al., 2022)، این مقدار کمتر از حد بحرانی ۶/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که نشان‌دهنده کمبود آهن در خاک‌های آهکی غرب ایران است (جدول ۱).

پس از انجام عملیات خاک‌ورزی در مزرعه، هر کرت آزمایشی مشتمل بر ۳ خط کاشت ۳ متری با فاصله ۶۰ سانتی‌متر بین ردیف کاشت و فاصله بذر روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر (تراکم بوته حدود ۸۰۰۰ در هکتار) در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، مقدار عناصر فسفر و پتاسیم محلول خاک بیش از حدود بحرانی بوده، بنابراین با توجه به نیاز کودی گیاه، تنها مدیریت کودی نیتروژن به فرم کود اوره (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) به صورت سرک در دو مرحله (ابتدای کشت و سه هفته پس از کشت) انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت دانه آفتابگردان و آبیاری‌های بعدی تا استقرار کامل مزرعه هر پنج روز یکبار انجام شد. همچنین پس از استقرار کامل گیاهچه‌ها عملیات تنک و نیز کنترل علف‌های هرز (در طول مراحل رشد) به‌صورت دستی انجام شد.

باقی‌مانده) و ارتباط آن با جذب گیاه، به‌ویژه در حضور آمینوکلات‌های آهن، تاکنون انجام نشده است. بنابراین این مطالعه با هدف بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک و همبستگی آن با غلظت و جذب آهن در گیاه آفتابگردان تحت تأثیر کود آبیاری آمینوکلات‌های آهن در خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش

این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز با موقعیت جغرافیایی $32^{\circ}22'$ درجه شمالی و $48^{\circ}07'$ درجه شرقی، ارتفاع ۲۲ متر از سطح دریا و میانگین بارش سالیانه ۲۱۳ میلی‌متر صورت گرفت. در این آزمایش تأثیر کود آبیاری آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن بر شکل‌های شیمیایی مختلف آهن در فاز جامد خاک و میزان غلظت و جذب آهن در گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) رقم اسکار مورد بررسی قرار گرفت. بذر آفتابگردان از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. تیمارهای آزمایش شامل آمینوکلات‌های گلايسين-آهن و متيونين-آهن، کود شیمیایی سولفات آهن ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) و تیمار شاهد (بدون کود) بود.

آماده‌سازی و مشخصه‌یابی آمینوکلات‌های آهن

کمپلکس‌های اسید آمینه-آهن با استفاده از دو اسید آمینه گلايسين (Glycine) و متيونين (Methionine) به‌عنوان لیگاند با درصد خلوص ۹۹ درصد (Merck) تهیه شدند. سپس اسیدهای آمینه به‌صورت جداگانه با نمک سولفات آهن ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) با نسبت مولاری ۲ به ۱ مخلوط شده و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت روی صفحه داغ همزده و تقطیر شدند. در طول واکنش، یون سولفات (SO_4^{2-}) موجود در $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ با کلسیم اضافه‌شده به‌صورت کربنات کلسیم ($CaCO_3$) واکنش داده و رسوب سولفات کلسیم ($CaSO_4$) تشکیل شد، که به‌صورت جامد از محیط واکنش جدا گردید. پس از تبخیر حلال، آمینوکلات‌های گلايسين-آهن [$Fe(Gly)_2$] و متيونين-آهن [$Fe(Met)_2$] به فرم میکروکریستال حاصل شده، که پس از شستشو با اتانول ۹۵ درصد و حذف یون سولفات باقی‌مانده، هوا خشک و جمع‌آوری شدند (Ashmead et al., 2000). به‌منظور تعیین ویژگی‌های ساختاری آمینوکلات‌های آهن و تأیید تشکیل کمپلکس بین لیگاند آزاد و فلز آهن، طیف‌سنجی مادون

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

Table 1- Characteristic of studied soil

ویژگی Property	مقدار Value
بافت Texture	لومی رسی Clay Loam
pH	7.7
هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	3.8
کربن آلی Organic C (%)	0.35
کربنات کلسیم CaCO ₃ (%)	37.5
نیترژن کل Total N (%)	0.06
فسفر قابل دسترس P _{ava} (mg kg ⁻¹)	16
پتاسیم قابل دسترس K _{EXC} (mg kg ⁻¹)	275
آهن قابل استخراج با DTPA DTPA-extractable Fe (mg kg ⁻¹)	4.15

تیمارهای کودی شامل آمینوکلات گلايسين- آهن و آمینوکلات متیونین- آهن هر کدام به مقدار ۴ لیتر در هکتار و کود شیمیایی سولفات آهن به مقدار ۲۰ کیلوگرم در هکتار بودند که به روش کودآبیاری در سه نوبت (مرحله چهاربرگی، ظهور طبق، و پرشدن دانه) به خاک اعمال شدند. دوز مصرفی کودها بر اساس توصیه‌های رایج تغذیه‌ای برای شرایط خاک‌های آهکی ایران (Malakouti & Kianoush, 2001) و متناسب با شکل فیزیکی و غلظت آهن هر منبع انتخاب گردید. پس از اتمام دوره رشد (۱۲۰ روز) و رسیدگی فیزیولوژیکی، گیاه آفتابگردان با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای ردیف-

های کناری برداشت شد. سپس نمونه‌های گیاهی در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شد. سپس دانه‌های آفتابگردان به دقت از طبق جدا شده و توزین شدند. جهت تعیین غلظت کل آهن در برگ و دانه گیاه از روش هضم خشک و دستگاه جذب اتمی PerkinElmer (مدل AAnalyst 800) استفاده شد (Huang et al., 2021; Wolf, 1982).

تعیین شکل‌های شیمیایی آهن

پس از برداشت گیاهان، بلافاصله خاک نزدیک ریشه از هر ردیف کشت نمونه‌برداری و یک نمونه مرکب برای هر کرت آزمایشی تهیه، هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس مقدار آهن قابل استفاده خاک توسط DTPA توسط دستگاه جذب اتمی قرائت گردید (Hossner, 1996). جهت بررسی توزیع شکل‌های مختلف آهن در اثر کاربرد منابع کودی آهن از روش تسیر و همکاران (Tessier et al., 1979) استفاده شد (جدول ۲). همچنین جهت ارزیابی کارایی روش استخراج دنباله‌ای و کنترل دقت نتایج حاصل از آن، درصد بازیابی آهن برای هر تیمار با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (Sposito et al., 1982):

$$(۱) \quad \text{بازیابی درصد} = \frac{\text{مرحله ۱} + \text{مرحله ۲} + \text{مرحله ۳} + \text{مرحله ۴} + \text{مرحله ۵}}{\text{غلظت کل}}$$

که در آن:

مرحله ۱: آهن در بخش تبادل و محلول، مرحله ۲: آهن متصل به کربنات‌ها، مرحله ۳: آهن متصل به اکسیدهای آهن و منگنز، مرحله ۴: آهن متصل به ماده آلی، مرحله ۵: آهن باقیمانده و غلظت کل: مقدار کل عنصر اندازه‌گیری شده است.

جدول ۲- خلاصه روش عصاره‌گیر دنباله‌ای

Table 2- Summary of the sequential extraction method

مرحله Step	شکل شیمیایی عنصر Chemical fractions	عصاره گیر Extractant	درجه حرارت Temperature (°C)	اسیدی ته pH	زمان Time (h)
1	تبادلی Exchangeable	Mg (NO ₃) ₂ , 1M	25	7	1
2	متصل به کربنات Carbonate- bound	NaOAc, 1M	25	5	5
3	متصل به اکسید آهن- منگنز Oxide Fe-Mn- bound	NH ₂ OH-HCl, 0.04M	96	2	6
4	متصل به ماده آلی Organic bound	H ₂ O ₂ , 30%	85	2	3
5	باقی مانده Residual	HNO ₃ -HCl	120	-	3

تحلیل‌های آماری

تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار RStudio نسخه (12.1+402, 2023) صورت گرفت. به‌منظور انجام مقایسات میانگین از آزمون چند مرحله‌ای Tukey's HSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. ضرایب همبستگی پیرسون بین میزان آهن در گیاه و آهن قابل استفاده خاک با شکل‌های شیمیایی آهن در خاک و همچنین مدل‌های رگرسیون چندمتغیره به‌منظور برآورد جذب و غلظت آهن گیاه به کمک شکل‌های شیمیایی در فاز جامد خاک با استفاده از نرم‌افزار RStudio نسخه (12.1+402, 2023) انجام شد. ترسیم شکل‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار OriginPRO نسخه (v.10.2, 2025) انجام شد.

نتایج و بحث

مشخصه‌یابی آمینوکلات‌های آهن

به‌منظور تأیید تشکیل کمپلکس‌های اسید آمینه-آهن، طیف‌های IR آنها در منطقه $4000-400\text{ cm}^{-1}$ شناسایی شد (جدول ۳). فرکانس‌های غالب (بیشترین مکان‌های پیوند) برای کمپلکس‌های اسید آمینه-آهن با ارتعاشات $\nu(\text{NH}_2)$ $\nu(\text{C=O})$ $\nu(\text{COO}^-)$ و $\nu(\text{C-N})$ همراه است (جدول ۳). هر اسید آمینه به‌صورت دو دندانه‌ای (اتم اکسیژن و نیتروژن) به فلز آهن متصل شده و گروه‌های عاملی $(\text{C}=\text{O})$ با ملکول آب شبکه پیوند هیدروژنی دارند و همچنین پیوند ضعیفی با کمپلکس مجاور حاوی فلز آهن تشکیل می‌دهند. به‌طور کلی، ظهور پیک‌های واضح در محدوده

۳۳۴۲ تا 3477 cm^{-1} برای گروه‌های NH_2 - نشان‌دهنده‌ی وجود پیوندهای ارتعاشی در کلات‌های آلی با یون آهن می‌باشد. ارتعاش گسترده در این ناحیه از طیف، حاکی از برهمکنش بین مولکولی ترکیبات در حالت جامد و کمپلکس شدن اسید آمینه با یون آهن است. همچنین وجود ارتعاشات غالب در محدوده 1629 تا 1658 cm^{-1} برای گروه‌های (C=O) نشان‌دهنده این است که پیوند یون آهن با لیگاند اسید آمینه از طریق اتم کربوکسیل اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی داده‌ها نشان می‌دهد که گروه‌های آمین و کربوکسیلات در پیوند اسیدهای آمینه با یون آهن در کمپلکس‌ها نقش دارند. داده‌های مربوط به مشخصه‌یابی آمینوکلات‌های گلیسین-آهن و متیونین-آهن در جدول ۴ نیز نشان دهنده تطابق ویژگی‌های اسپکتروسکوپی و نظری آمینوکلات‌ها با یکدیگر است. عملکرد آمینوکلات‌ها به ترتیب برای گلیسین-آهن و متیونین-آهن ۸۸ و ۸۷ درصد بود و نتایج تحلیل نشان داد که خلوص محصولات واکنش در محدوده‌ی مورد انتظار فرمول مولکولی محاسبه‌شده قرار دارد (جدول ۴). بر اساس استوکیومتری و فرمول پیشنهادی ML_2 (یک اتم آهن در محاصره دو لیگاند اسیدآمینه)، درصد نظری آهن در آمینوکلات‌های سنتزی حدود $27/1$ درصد برای گلیسین-آهن و $15/8$ درصد برای متیونین-آهن برآورد شد (با فرض ناخالصی تقریبی $\sim 5\%$ درصد مقادیر عملی به‌ترتیب $\sim 25/8$ و $\sim 15/0$ درصد در نظر گرفته شدند) (جدول ۴). این مقادیر محاسبه‌شده به‌عنوان مرجع نظری ارائه شده‌اند؛ اندازه‌گیری مستقیم درصد آهن (با تجهیزات ICP-OES/AAS) برای تأیید دقیق‌تر خلوص محصول در مطالعات آینده توصیه می‌شود.

جدول ۳- باندهای IR (cm^{-1}) انتخابی آمینوکلات‌های گلیسین-آهن $[\text{Fe}(\text{Gly})_2]$ و متیونین-آهن $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$

Table 3- Selected IR bands (cm^{-1}) of $[\text{Fe}(\text{Gly})_2]$ and $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$ aminochelates

آمینوکلات Aminochelate	$\nu(\text{NH}_2)$	$\nu(\text{C=O})$	$\nu_{\text{as}}(\text{C-O})$	$\nu(\text{C-N})$	$\nu_s(\text{COO}^-)$	$\nu(\text{Fe-O})$
گلیسین-آهن $[\text{Fe}(\text{Gly})_2]$	3342.0	1658.5	1525.2	1020.1	1386.4	460.2
متیونین-آهن $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$	3477.3	1629.5	1531.1	1168.5	1344.2	530.1

جدول ۴- ویژگی‌های ساختاری آمینوکلات‌های آهن

Table 4- Structural characteristic of iron aminochelates

آمینوکلات Aminochelate	فرمول مولکولی Molecular formula	وزن مولکولی Molecular weight	بازده Yield	بدست آمده (محاسبه شده) Found (calculated) (%)			نظری (خالص) Theoretical (pure) (%)
				C	H	N	
گلیسین-آهن $[\text{Fe}(\text{Gly})_2]$	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_4\text{Fe}$	213.50	0.188 g (88%)	22.39 (22.50)	3.91 (3.75)	13.04 (13.12)	27.1 (25.8)
متیونین-آهن $[\text{Fe}(\text{Met})_2]$	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}_2\text{Fe}$	352.26	0.306 g (87%)	34.00 (34.07)	5.73 (5.68)	7.93 (7.95)	15.8 (15.0)

pH خاک

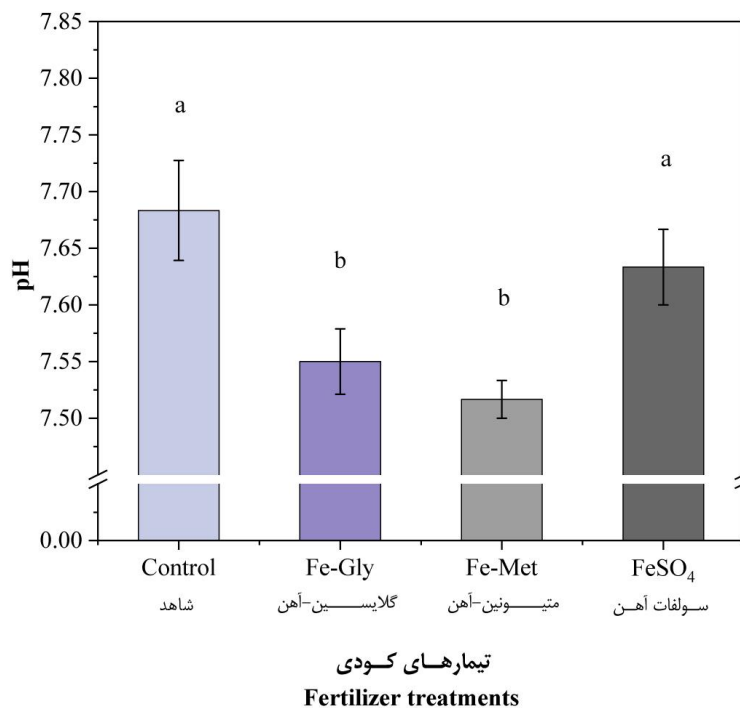
میانگین داده‌ها، کاربرد آمینوکلات‌های آهن سبب کاهش معنی‌دار pH خاک نسبت به تیمار شاهد شدند. تیمار آمینوکلات متیونین-آهن بیشترین تأثیر را بر کاهش pH خاک داشت (شکل ۱).

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر کاربرد (به‌صورت کودآبیاری) آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن بر pH خاک معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۵). مطابق با نتایج مقایسه

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر pH و غلظت آهن قابل استفاده در خاک
Table 5- ANOVA for the effect of treatments on pH and concentration of soil available Fe

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Degree of freedoms	میانگین مربعات Mean squares	
		pH	آهن قابل استفاده Available Fe
بلوک Block	2	0.01**	4.5×10^{-3} ns
تیمار Treatment	3	0.017**	1.38**
خطا Error	6	7.6×10^{-4}	3.3×10^{-3}
ضریب تغییرات C.V (%)	-	0.36	1.21

ns و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.
ns and **: non-significant and significant at $p \leq 0.01$, respectively.



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر pH خاک

حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Figure 1- Mean comparisons of the effect of treatments on soil pH

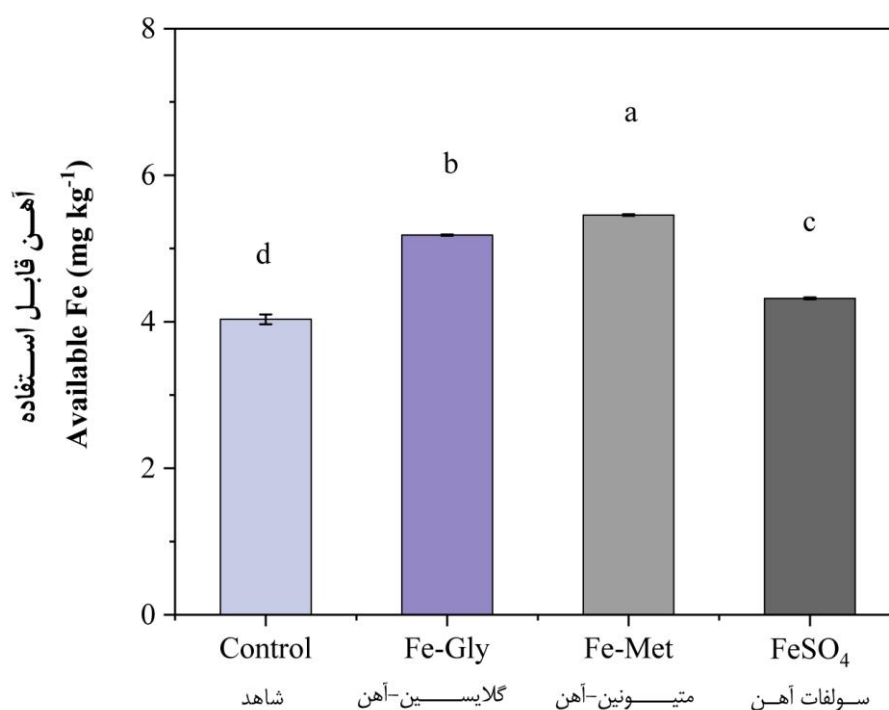
The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

آهن قابل استفاده (Available Fe)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر کاربرد آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن بر غلظت آهن قابل استفاده خاک معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۵). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد منابع مختلف آهن، سبب افزایش معنی‌دار غلظت آهن قابل استفاده خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۲). تیمارهای آمینوکلات متیونین-آهن و آمینوکلات گلیسین-آهن، به ترتیب سبب افزایش ۳۵/۲ و ۲۸/۵ درصدی غلظت آهن قابل استفاده خاک نسبت به تیمار شاهد شدند. همچنین، کود سولفات آهن نیز سبب افزایش ۷/۱ درصدی غلظت آهن قابل استفاده خاک نسبت به تیمار شاهد شد. (شکل ۲).

غلظت آهن قابل استفاده در محلول خاک از pH خاک تبعیت می‌کند (شکل ۱). با کاهش pH خاک، و تبدیل Fe^{2+} به Fe^{3+} ، آهن به فرم محلول‌تر و قابل دسترس برای گیاه تبدیل می‌شود (Lindsay Marschner, 2012 & Schwab, 1982). مطالعات نشان داده‌اند

که در شرایط اسیدی و با پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh) کمتر از ۰/۴ ولت، آهن به فرم Fe^{2+} تبدیل می‌شود که در خاک‌های کم‌عمق و خاک‌های شالیزاری رایج است (Colombo et al., 2018). بنابراین، اندازه‌گیری مستقیم Eh در خاک، طی مطالعات آینده می‌تواند به درک بهتر فرآیندهای شیمیایی و بیوشیمیایی مؤثر بر دسترسی آهن در خاک کمک کند. علاوه بر این، ویژگی‌های کلات‌کنندگی ترکیبات آلی نیز میزان حلالیت فلزات را در خاک تعیین می‌کنند (Rahman & Schoenau, 2022). حلالیت آهن در خاک به‌طور قابل توجهی با تشکیل کلات با لیگاندهای آلی افزایش یافته که ماده آلی محلول یا سایر ماکرومولکول‌های محلول را با گروه‌های عاملی کربوکسیلیک تشکیل می‌دهند (Schwertmann & Taylor, 1989). به‌طور کلی، کاهش pH خاک سبب بهبود اثربخشی لیگاندهای آلی نظیر اسیدهای آلی و یا کلات‌های اسید آمینه در تشکیل کمپلکس‌های آلی پایدار با آهن و افزایش دسترسی آن برای گیاه به‌ویژه در خاک‌های قلیایی و آهکی می‌شود (Molnár et al., 2023; Soury et al., 2018).



تیمارهای کودی

Fertilizer treatments

شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت آهن قابل استفاده در خاک

حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Figure 2- Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of soil available Fe
The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

کارایی و دقت روش عصاره‌گیری دنباله‌ای در خاک‌های آهکی ایران است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از معنی‌دار بودن تفاوت بین اثر تیمارهای کودآبیاری آمینوکلات‌های آهن بر غلظت شکل‌های آهن تبدلی، آهن متصل به ماده آلی و نیز آهن کربناتی در فاز جامد خاک بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۶).

به طور کلی نتایج جزءبندی آهن نشان داد که مقادیر اجزای آهن تبدلی و آهن متصل به ماده آلی در خاک با کاربرد آمینوکلات‌های آهن به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۷). در بین تیمارها، بیشترین میزان آهن تبدلی مربوط به تیمار آمینوکلات متیونین-آهن بود که نسبت به تیمار شاهد، افزایش ۲/۵ برابری نشان داد. پس از آن تیمار آمینوکلات گلايسين-آهن نیز به طور معنی‌دار سبب افزایش ۹۳/۵ درصدی آهن تبدلی نسبت به شاهد شد. در مقابل، تیمار سولفات آهن تفاوت معنی‌داری با شاهد در میزان آهن تبدلی نشان نداد (جدول ۷).

در مورد آهن متصل به ماده آلی، تیمار آمینوکلات متیونین-آهن بیشترین غلظت را داشت و نسبت به شاهد افزایش بیش از ۲/۵ برابری نشان داد. تیمار آمینوکلات گلايسين-آهن نیز سبب افزایش ۷۰/۸ درصدی غلظت این جزء نسبت به شاهد شده، در حالی که تیمار سولفات آهن تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت (جدول ۷). در مقابل، کاربرد تیمارهای آمینوکلات متیونین-آهن و گلايسين-آهن به ترتیب سبب کاهش ۴۳/۹ و ۳۲/۰ درصدی غلظت آهن متصل به کربنات در مقایسه با شاهد شدند، در حالی که تیمار سولفات آهن، کمترین اختلاف در غلظت آهن کربناتی (معادل ۱۰/۹ درصد کاهش) را با شاهد نشان داد (جدول ۷).

آمینوکلات‌های آهن در خاک‌های قلیایی و آهکی پایداری بالایی از خود نشان داده و قابلیت دسترسی آهن را حفظ می‌کنند، در حالی که کلات‌های مصنوعی و کودهای شیمیایی سنتی ممکن است به دلیل رقابت با یون‌های کلسیم و منیزیم کارایی خود را از دست بدهند (Mirbolook et al., 2020; Ghasemi et al., 2012).

اثر کاربرد آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن بر غلظت شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک

در این مطالعه تأثیر تیمارها بر غلظت شکل‌های شیمیایی آهن شامل: تبدلی، متصل به کربنات، متصل به اکسیدهای آهن و منگنز، متصل به ماده آلی و باقی مانده، در خاک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج به دست آمده از تعیین درصد بازیابی اشکال شیمیایی مختلف آهن در فاز جامد خاک، با استفاده از روش استخراج متوالی Tessier et al. (1979)، نشان دهنده بازه قابل توجه ۹۲/۱ تا ۹۴/۰ درصد برای تیمارهای کودآبیاری آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن بوده که حاکی از دقت روش استخراج و اندازه‌گیری شکل‌های شیمیایی آهن در این آزمایش است. بر اساس گزارش‌های تسیر و همکاران (Tessier et al., 1979) و اسپوسیتو و همکاران (Sposito et al., 1982)، درصد بازیابی آهن در روش استخراج متوالی در محدوده‌های مشابهی تأیید شده است. همچنین به منظور تقویت اعتبار استفاده از روش عصاره‌گیری دنباله‌ای تسیر در این پژوهش، می‌توان به نتایج مطالعه قریشی امیری و همکاران (Ghoreishi Amiri et al., 2020) اشاره کرد، که نشان داد بین شکل‌های مختلف آهن استخراج‌شده و آهن قابل استفاده (قابل استخراج با DTPA) همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت؛ این یافته‌ها نشان‌دهنده

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت شکل‌های شیمیایی مختلف آهن در فاز جامد خاک

Table 6- ANOVA for the effect of treatments on concentration of different Fe chemical forms in the soil solid phase

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Degree of freedoms	میانگین مربعات Mean squares				
		تبدلی Exchangeable	متصل به کربنات Carbonate-bound	متصل به اکسیدها Oxide-bound	متصل به ماده آلی Organic-bound	باقی مانده Residual
بلوک Block	2	1.0×10^{-3} ns	8.0×10^{-3} ns	14.3 ns	1.3×10^{-4} ns	11.0 ns
تیمار Treatment	3	0.25**	4.75**	1.88 ns	0.85**	0.22 ns
خطا Error	6	1.2×10^{-3}	0.03	44.2	4.4×10^{-3}	2.97
ضریب تغییرات C.V (%)	-	5.1	4.04	0.3	5.44	0.01

ns و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

ns and **: non-significant and significant at $p \leq 0.01$, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر غلظت شکل‌های شیمیایی مختلف آهن (میلی گرم بر کیلوگرم) در فاز جامد خاک
Table 7- Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of different Fe chemical forms (mg kg⁻¹) in soil solid phase

تیمارهای کودی Fertilizer treatment	تبادلی Exchangeable	متصل به کربنات Carbonate-bound	متصل به ماده آلی Organic-bound
شاهد Control	0.41 ^c	6.30 ^a	0.76 ^c
گلایسین-آهن [Fe (Gly) ₂]	0.80 ^b	4.26 ^c	1.33 ^b
متیونین-آهن [Fe (Met) ₂]	1.04 ^a	3.53 ^d	1.93 ^a
سولفات آهن FeSO ₄	0.47 ^c	5.63 ^b	0.86 ^c

حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($p \leq 0.05$).

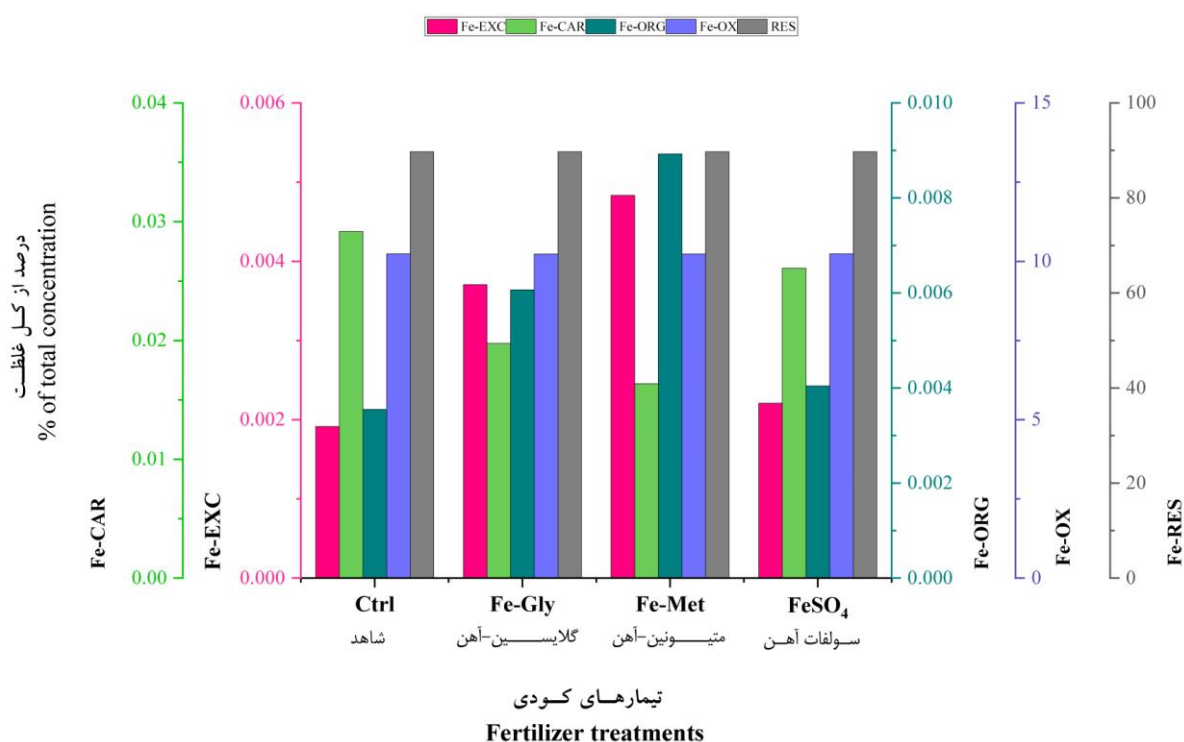
The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

در فاز محلول و جلوگیری از رسوب آن در شرایط قلیایی، زمینه تبدیل آهن از فازهای کم تحرک، به فرم‌های تبادلی و زیست‌فراهم‌تر را مهیا می‌سازند (Colombo et al., 2014; Lucena, 2003). همچنین، ساختار آمینوکلات‌ها با فراهم کردن گروه‌های عاملی مناسب (جدول ۳)، امکان تبادل سریع‌تر با سطح کلئیدهای خاک را نسبت به نمک‌های معدنی مانند سولفات آهن فراهم می‌آورد (Fernández & Ebert, 2005). برخلاف سولفات آهن که در pH بالای خاک‌های آهکی به سرعت به فرم‌های نامحلول رسوب می‌کند، آمینوکلات‌ها با تشکیل کمپلکس‌های پایدار، آهن را در فاز فعال نگه داشته و نیاز گیاه را بدون وابستگی به ذخایر کربناتی آهن برطرف می‌کنند (Lucena, 2003). مطالعه بوستانی و همکاران (Boustani et al., 2018) نشان داد که سهم آهن کربناتی در اغلب خاک‌های آهکی کم بوده اما در برخی شرایط، می‌تواند به عنوان منبع آهن برای گیاه عمل کند. در پژوهش حاضر نیز، کاهش این جزء در تیمارهای آمینوکلات آهن حاکی از مصرف و یا تبدیل این ذخایر به فرم‌های زیست‌فراهم‌تر می‌باشد. نتایج به دست آمده با یافته‌های فیلگوریاس و همکاران (Filgueiras et al., 2002) و پاشاپور و همکاران (Pashapour et al., 2016) نیز مطابقت دارد؛ که اظهار داشتند آهن کربناتی بخشی محدود از آهن کل خاک را شامل می‌شود، اما در شرایط مناسب، به‌ویژه در حضور کلات‌های آلی و اسیدهای آزادشده در ریزوسفر، قابلیت ورود به چرخه جذب گیاهی را پیدا می‌کند. همچنین، ترکیبات آلی و ترشحات ریشه‌ای با تشکیل کلات‌های آهن دار، نه تنها دسترسی گیاه به آهن را افزایش می‌دهند، بلکه از تشکیل رسوبات غیرقابل جذب نیز جلوگیری می‌کنند (Jones et al., 2003). این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهد که آمینوکلات‌های آهن نسبت به نمک‌های معدنی مانند سولفات آهن، در بهره‌برداری مؤثرتر از منابع کربناتی خاک عملکرد بهتری داشته و می‌توانند سبب بازتوزیع آهن از فرم‌های نیمه‌فعال به فرم‌های فعال شوند.

با این وجود، نتایج این مطالعه نشان داد که کاربرد منابع مختلف آهن، اعم از آمینوکلات‌ها و سولفات آهن، تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن در دو بخش متصل به اکسیدهای آهن و منگنز و بخش باقیمانده نداشت (جدول ۶)، که می‌تواند ناشی از ماهیت پایدار و کم تحرک این شکل‌های آهن در خاک‌های آهکی (Cornell & Schwertmann, 2003; Colombo et al., 2014) و نیز عدم ایجاد شرایط اسیدی و احیایی شدید و یا فعالیت میکروبی بسیار بالا طی بازه زمانی کوتاه مدت این آزمایش باشد.

افزایش غلظت آهن تبادلی به دنبال کاربرد آمینوکلات‌های آهن، می‌تواند نشان‌دهنده توان بالای این منابع در فعال‌سازی آهن غیرقابل دسترس و افزایش سهم آن در فاز تبادلی خاک باشد. در pH بالاتر از ۷/۵، آهن عمدتاً به شکل‌هایی مانند اکسیدهای آهن (III) وجود دارد که برای ریشه‌های گیاه قابل دسترس نیستند (Loeppert & Inskeep, 1996). همچنین در خاک‌های آهکی، آهن اغلب به صورت کربنات آهن یا فسفات آهن رسوب می‌کند. کاهش pH سبب افزایش انحلال این رسوبات شده و در نتیجه فراهمی زیستی آهن را افزایش می‌دهد (Marschner, 2012). به نظر می‌رسد کاهش pH خاک به دنبال کاربرد آمینوکلات‌های آهن (شکل ۱) سبب افزایش حلالیت و تحرک آهن شده و آن را از بخش‌های با حلالیت کمتر (متصل به کربنات‌ها) به اشکال محلول‌تر (آهن تبادلی و قابل دسترس) تغییر می‌دهد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، افزایش غلظت آهن تبادلی در تیمارهای آمینوکلات متیونین-آهن و گلایسین-آهن با افزایش غلظت آهن قابل استفاده خاک (شکل ۲) هم راستا بود. شامبهاوی و همکاران (Shambhavi et al., 2016) نیز دریافتند که بین آهن به فرم تبادلی و آهن قابل استخراج با DTPA (قابل دسترس) همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد.

از سوی دیگر، افزایش سهم آهن تبادلی در تیمارهای آمینوکلات آهن را می‌توان به توان کلات‌کنندگی بالای لیگاند‌های آمینه، به‌ویژه متیونین، نسبت داد. این ترکیبات با ایجاد کمپلکس‌های پایدار با آهن



شکل ۳- نمودار توزیع شکل‌های شیمیایی مختلف آهن در فاز جامد خاک
Figure 3- Distribution diagram of the different Fe chemical forms in soil solid phase

توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در خاک مورد مطالعه

با توجه به نتایج حاصل از بررسی درصد توزیع نسبی شکل‌های شیمیایی مختلف آهن در خاک مورد مطالعه (شکل ۳) ترتیب فراوانی شکل‌های شیمیایی آهن در خاک اولیه پیش از اعمال تیمارها به‌صورت زیر بود:

تبادلی > متصل به ماده آلی > کربناتی > متصل به اکسیدهای آهن و منگنز > باقیمانده

با اعمال تیمارهای کودی، ترتیب شکل‌های شیمیایی آهن تغییر نکرد با این تفاوت که، درصد مقادیر همه اجزای آهن در خاک (به استثنای اکسیدهای آهن و منگنز و شکل باقیمانده) با کاربرد منابع آهن، به‌ویژه آمینوکلات‌های متیونین-آهن و گلیسین-آهن به‌طور معنی‌داری تغییر کرد. به‌طور میانگین آهن به فرم تبادلی حدود ۰/۰۰۳ درصد، متصل به ماده آلی ۰/۰۰۵ درصد و متصل به کربنات‌ها ۰/۰۲ درصد، متصل به اکسیدهای آهن و منگنز ۱۰/۲ درصد و باقیمانده ۸۹/۷ درصد مجموع شکل‌های اندازه‌گیری شده را تشکیل دادند (شکل ۳).

در تیمار شاهد، غالبیت نسبی با آهن کربناتی بود و دو فرم تبادلی و آلی سهم بسیار اندکی از آهن خاک را به خود اختصاص دادند. این الگو نشان‌دهنده ویژگی معمول خاک‌های آهکی است که در آن، pH

بالا و مقادیر بالای کربنات کلسیم موجب رسوب آهن و تثبیت آن در فرم کربناتی می‌شود (Boustani et al., 2018). با کاربرد آمینوکلات متیونین-آهن، سهم نسبی آهن تبادلی و آلی به شکل محسوسی افزایش یافت و در مقابل، آهن کربناتی کاهش معنی‌داری نشان داد. استفاده از آمینوکلات گلیسین-آهن نیز الگوی مشابهی نشان داد، هرچند تغییرات آن در مقایسه با متیونین-آهن کمتر بود. این نتایج نشان می‌دهد که کلات‌های آمینه با تسهیل پایداری آهن در فاز محلول، کاهش pH موضعی در ریزوسفر و آزادسازی آهن از ساختارهای کربناتی، موجب انتقال آهن از فرم‌های کم‌دسترس به فرم‌های فعال‌تر قابل جذب (تبادلی و آلی) شده‌اند (Lucena, 2003; Colombo et al., 2014). مقایسه نسبت آهن آلی به آهن کربناتی در تیمارهای مختلف نیز بیانگر آن است که آمینوکلات‌ها موجب افزایش معنی‌دار این نسبت شده‌اند؛ پدیده‌ای که می‌تواند ناشی از نقش حفاظتی ترکیبات آلی محلول در نگه‌داشت آهن در فرم کلاته‌شده و جلوگیری از رسوب آن باشد. این یافته با گزارش پردو و همکاران (Perdue et al., 1976) هم‌راستا است که بر اهمیت آهن کمپلکس‌شده با مواد آلی، به‌ویژه در حضور کربن آلی محلول، به‌عنوان منبع مهم آهن قابل استفاده در خاک‌های قلیایی تأکید داشته‌اند. در مقابل، تیمار سولفات آهن به دلیل ناپایداری در pH بالا و عدم توانایی در تشکیل کمپلکس‌های پایدار (Lindsay & Schwab, 1982)،

به‌ترتیب سبب افزایش ۲ و ۱/۲ درصدی میزان آهن برگ در مقایسه با تیمار شاهد شدند. با این وجود، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای آمینوکلات متیونین-آهن و گلايسين-آهن در افزایش غلظت آهن برگ وجود نداشت. در مقابل، کاربرد کود سولفات آهن تأثیری معنی‌داری بر افزایش غلظت آهن برگ نسبت به تیمار شاهد نداشت (شکل ۴).

تأثیر محسوسی بر پویایی اشکال آهن نداشت و آهن به‌طور عمده در فرم کربناتی باقی ماند.

غلظت آهن برگ

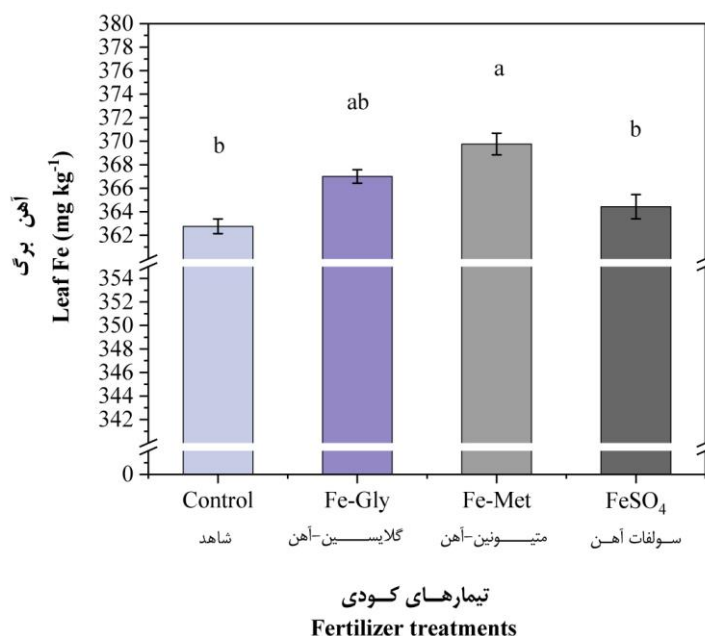
نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر کاربرد تیمارهای کودی مختلف بر غلظت آهن در برگ گیاه معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۸). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های متیونین-آهن و گلايسين-آهن،

جدول ۸- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت آهن برگ و دانه و جذب آهن دانه گیاه

Table 8- ANOVA for the effect of treatments on leaf and seed Fe concentration, and seed Fe uptake

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Degree of freedoms	میانگین مربعات Mean squares		
		آهن برگ Leaf Fe	آهن دانه Seed Fe	جذب آهن دانه Seed Fe uptake
بلوک Block	2	0.72 ^{ns}	3.37 ^{ns}	63.36 ^{ns}
تیمار Treatment	3	28.09 ^{**}	10.66 [*]	3057.62 ^{**}
خطا Error	6	2.38	1.27	17.99
ضریب تغییرات C.V (%)	-	0.42	3.58	4.22

^{ns}، ^{**} و ^{*} به‌ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.
^{ns}, ^{**} and ^{*}: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.



شکل ۴- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت آهن در برگ گیاه آفتابگردان

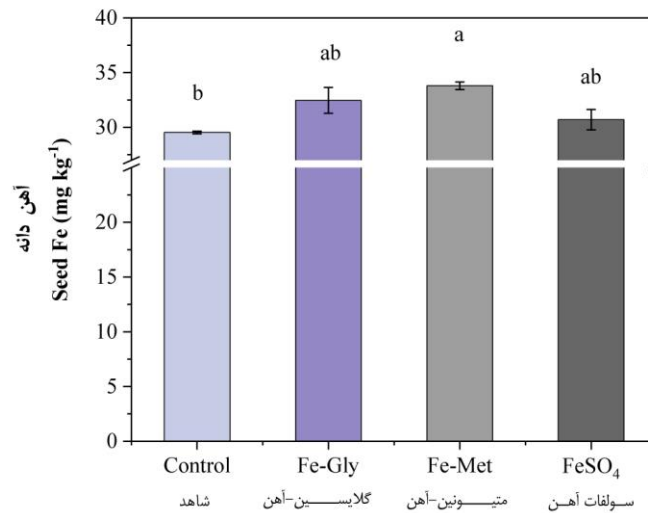
حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Figure 4- Mean comparisons of the effect of treatments on leaf Fe concentration of sunflower
The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

غلظت آهن دانه

سبب افزایش ۷/۵ درصدی غلظت آهن دانه گیاه نسبت به تیمار شاهد شد. تفاوت میزان افزایش غلظت آهن دانه بین سایر تیمارهای کودی و تیمار شاهد معنی‌دار نبود (شکل ۵).

اثر کاربرد تیمارهای کودی مختلف بر غلظت آهن در دانه (جدول ۸). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کودآبیاری آمینوکلات متیونین-آهن



تیمارهای کودی

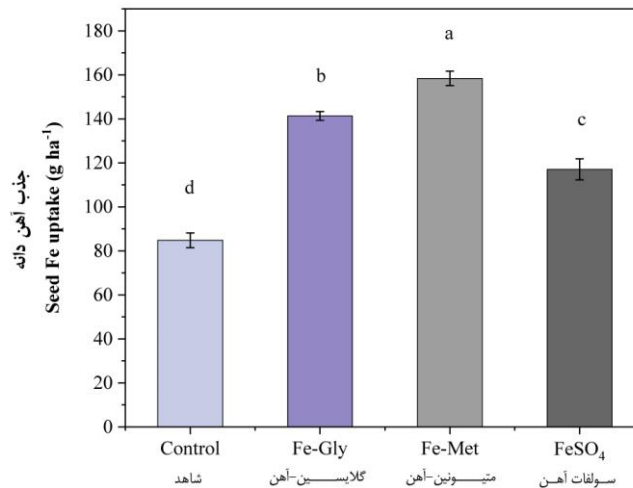
Fertilizer treatments

شکل ۵- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت آهن در دانه گیاه آفتابگردان

حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Figure 5- Mean comparisons of the effect of treatments on seed Fe concentration of sunflower

The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).



تیمارهای کودی

Fertilizer treatments

شکل ۶- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر جذب آهن در دانه گیاه

حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Figure 6- Mean comparisons of the effect of treatments on Fe uptake in plant seed

The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

جذب آهن در دانه گیاه

اثر کاربرد تیمارهای کودی مختلف بر جذب آهن در دانه آفتابگردان معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۸). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کودآبیاری آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن سبب افزایش ۳۸/۰ تا ۸۶/۷ درصد جذب آهن در دانه آفتابگردان نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین مقدار جذب آهن در دانه با میانگین ۱۵۸/۴ گرم بر هکتار در تیمار آمینوکلات متیونین-آهن و کمترین مقدار با میانگین ۸۴/۸ گرم بر هکتار مربوط به تیمار شاهد بود (شکل ۶).

اسیدهای آمینه از طریق گروه‌های عاملی کربوکسیل‌دار، کمپلکس‌های پایداری با آهن تشکیل داده و جذب و انتقال آن به برگ و دانه گیاه را تسهیل می‌کنند (جدول ۳). آمینوکلات‌های آهن با تأثیر بر مؤلفه‌های بیوشیمیایی گیاه، مانند فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم جذب و انتقال آهن در گیاه، می‌تواند سبب بهبود وضعیت تغذیه‌ای آهن گیاه و تحریک رشد آن شوند (Ghasemi et al., 2014; Bashir et al., 2018; Zaheer et al., 2020). نتایج نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های متیونین-آهن و گلیسین-آهن در افزایش غلظت آهن در دانه آفتابگردان مؤثرتر از تیمار سولفات آهن بود (شکل ۵). این امر می‌تواند به دلیل استفاده از عنصر ریز مغذی آهن به همراه اسیدهای آمینه باشد که سبب تامین غلظت بیشتری آهن در گیاه شده است (Alipour Babadi et al., 2025). طی مطالعه‌ای ظهیر و همکاران (Zaheer et al., 2020) دریافتند که کاربرد محلول پاشی آمینوکلات لیزین-آهن سبب افزایش محتوای آهن در ریشه و اندام هوایی گیاه اسفناج (*S. oleracea*) شد. اسیدهای آمینه با تولید هورمون‌ها و ترکیبات نیتروژنی با وزن مولکولی پایین، سبب تشکیل کمپلکس‌های محلول با آهن شده و فراهمی زیستی آن را افزایش می‌دهند (Souri & Hatamian, 2018). علاوه بر این، استفاده از آمینوکلات‌ها می‌تواند از طریق بهبود جذب نیتروژن در گیاه، کارایی پروتئین‌های ناقل آهن را در غشای سلولی افزایش داده و در نتیجه غلظت آهن در بافت‌های گیاهی بیشتر شود (Kutman et al., 2011). با وجود کفایت غلظت آهن برگ در تیمار شاهد (۳۶۳ میلی گرم بر کیلوگرم)، گیاهان علائم کمبود آهن از جمله رشد محدود، کلروز بین برگ‌ها و کاهش عملکرد نشان دادند. این وضعیت به "نارسایی فیزیولوژیک آهن" یا کارایی پایین آهن نسبت داده می‌شود؛ پدیده‌ای که در خاک‌های آهکی قلیایی متداول است (Abadía et al., 2011; Römheld, 2000). در این حالت، آهن جذب‌شده در برگ عمدتاً به شکل Fe(III) نامحلول در فضای آپوپلاست رسوب کرده و برای فرآیندهای متابولیکی مانند سنتز کلروفیل قابل استفاده نیست (Römheld & Marschner, 1986).

بنابراین، غلظت کل آهن شاخص مناسبی برای آهن فعال فیزیولوژیک نیست و حتی در محدوده یا فراتر از حد بحرانی، کمبود عملکردی می‌تواند رخ دهد. به نظر می‌رسد بهبود رشد و عملکرد در تیمارهای دریافت‌کننده آهن بیش از آن که به افزایش مقدار کل آهن مربوط باشد، به افزایش کارایی فیزیولوژیک و توزیع درون گیاهی آهن در نتیجه‌ی اثرات هم‌افزای آمینوکلات‌های آهن مرتبط است. همچنین کاربرد آمینوکلات آهن با توجه به قابلیت جذب بالا، می‌تواند سبب قرارگیری مستقیم و مؤثر آهن در ناحیه ریشه شود. این امر ممکن است به تحریک مکانیسم‌های جذب آهن در گیاه، از جمله فعالیت آنزیم‌های کاهنده مانند FCR، منجر شده باشد که در نهایت کارایی جذب و انتقال آهن در گیاه را افزایش می‌دهد (Curie, & Mirbolook et al., 2020; Briat, 2003). با این وجود، برای اثبات قطعی این مکانیسم، انجام آزمایش‌های تکمیلی از جمله سنجش فعالیت آنزیم FCR ریشه در پژوهش‌های آینده ضروری به نظر می‌رسد. همچنین علی‌رغم محدود بودن شواهد درباره اثرات بلندمدت بیولوژیکی کاربرد آمینوکلات‌ها، مطالعات جدید نشان می‌دهد که آمینوکلات‌های آهن با تحریک فعالیت میکروبی و آنزیمی ریزوسفر می‌توانند کاهش pH اطراف ریشه و پایداری آهن دو ظرفیتی را تقویت کنند (Mohammadnia et al., 2025)؛ این فرآیندها احتمالاً بخشی از افزایش جذب آهن مشاهده شده در این پژوهش را توضیح می‌دهد.

همبستگی بین غلظت آهن قابل استفاده خاک و غلظت آهن

در گیاه با شکل‌های شیمیایی آهن در خاک

نتایج همبستگی بین غلظت آهن در بخش‌های مختلف گیاه آفتابگردان و نیز غلظت آهن قابل استفاده در خاک با شکل‌های شیمیایی مختلف آهن در فاز جامد خاک در جدول ۹ نشان داده شده است. غلظت آهن قابل استفاده در خاک تیمار شده با کودهای آمینوکلات آهن و کود سولفات آهن، همبستگی مثبت و معنی‌دار قوی با غلظت آهن به فرم متصل شده به ماده آلی ($r = 0.84^{**}$) و تبدالی ($r = 0.87^{**}$) و نیز همبستگی منفی و معنی‌دار با غلظت آهن به فرم متصل شده به کربنات‌ها ($r = -0.89^{**}$) نشان داد. همچنین غلظت آهن در دانه نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری با شکل‌های متصل به ماده آلی ($r = 0.69^{**}$) و تبدالی ($r = 0.72^{**}$) آهن در خاک داشت. از سوی دیگر، جذب آهن دانه نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری با غلظت شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک به‌ویژه شکل تبدالی ($r = 0.82^{**}$) نشان داد (جدول ۹).

جدول ۹- ضرایب همبستگی پیرسون بین غلظت آهن در گیاه و آهن قابل استفاده خاک با شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک ($p \leq 0.05$)
 Table 9- Pearson correlation coefficients between plant Fe concentration and soil available Fe concentration with Fe chemical forms in soil solid phase ($p \leq 0.05$)

صفات Variables	آهن قابل استفاده Available Fe	آهن تبادلی Fe-EXC	آهن کربناتی Fe-CAR	آهن متصل به ماده آلی Fe-ORG	آهن دانه Seed Fe	آهن برگ Leaf Fe	جذب آهن دانه Seed Fe uptake
آهن قابل استفاده Available Fe	1						
آهن تبادلی Fe-EXC	0.87**	1					
آهن کربناتی Fe-CAR	-0.89**	-0.87**	1				
آهن متصل به ماده آلی Fe-ORG	0.84**	0.88**	-0.85**	1			
آهن دانه Seed Fe	0.73**	0.72**	-0.75**	0.69**	1		
آهن برگ Leaf Fe	0.78**	0.84**	-0.79**	0.82**	0.59*	1	
جذب آهن دانه Seed Fe uptake	0.85**	0.82**	-0.85**	0.79**	0.77**	0.76**	1

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

** and * significant at 0.01 and 0.05 probability levels, respectively.

آلی، اکسیدی و باقی‌مانده) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که مدل‌های نهایی توانستند بین ۷۱ تا ۹۱ درصد از تغییرات متغیرهای وابسته را تبیین کنند (جدول ۱۰). در مدل اول، آهن تبادلی به عنوان تنها متغیر مؤثر و معنی‌دار در پیش‌بینی غلظت آهن برگ وارد مدل شد. این جزء از آهن خاک، شکل نسبتاً محلول و قابل دسترس برای گیاه است و نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین آهن قابل جذب در ناحیه ریزوسفری دارد. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که غلظت آهن تبادلی رابطه مستقیمی با آهن قابل جذب گیاه دارد (Kabata-Pendias, Lindsay & Schwab, 1982). این مطالعات نشان دادند که در خاک‌های آهکی با غلظت بالایی از کربنات کلسیم، آهن تبادلی معمولاً سهم اندکی از کل آهن خاک را تشکیل می‌دهد؛ با این حال، همان مقدار اندک می‌تواند تعیین‌کننده وضعیت تغذیه‌ای گیاه باشد. افزایش آهن تبادلی معمولاً با افزایش زیست‌توده و غلظت آهن در برگ‌ها همراه است که این نتیجه نیز با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد.

در مدل دوم و سوم، آهن کربناتی به عنوان تنها متغیر وارد مدل شد که دارای ضریب منفی معنی‌دار با غلظت آهن دانه و جذب آهن دانه بود (جدول ۱۰). این یافته نشان می‌دهد که افزایش سهم آهن متصل به کربنات‌ها، با کاهش قابلیت جذب آهن توسط گیاه همراه بوده است.

برخی مطالعات نیز گزارش داده‌اند که بخش‌های آهن متصل به مواد آلی در خاک همبستگی مثبت و معناداری با عملکرد و جذب عناصر غذایی مختلف از جمله آهن در ذرت و گندم دارند (Shambhavi et al., 2016). این یافته‌ها نشان می‌دهد که آمینوکلات‌های آهن با حفظ پویایی آهن در خاک، دسترسی آن را برای گیاه بهبود بخشیده و با ایجاد تعادل بین اشکال شیمیایی آهن در فاز جامد (مانند قابل تبادل و آلی)، یک ذخیره پایدار از آهن را در خاک ایجاد می‌کنند. بنابراین، با توجه به وجود همبستگی بالا و مثبت بین غلظت و جذب آهن دانه آفتابگردان، با شکل‌های متصل شده به ماده آلی و تبادلی آهن، احتمالاً این شکل‌ها می‌توانند به عنوان بخشی از مخازن قابل دسترس آهن برای گیاه در نظر گرفته شوند.

بررسی رابطه رگرسیونی بین غلظت و جذب آهن در آفتابگردان با شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک

به منظور شناسایی مهم‌ترین شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک که بر غلظت و جذب آهن در آفتابگردان تأثیر معنی‌دار دارند، تحلیل رگرسیون خطی چندگانه به روش گام‌به‌گام^۱ انجام شد. در این تحلیل، غلظت آهن برگ، غلظت آهن دانه و جذب آهن دانه به عنوان متغیرهای وابسته و شکل‌های مختلف آهن خاک (تبادلی، کربناتی،

جدول ۱۰- نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره بین غلظت و جذب آهن در آفتابگردان با شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک
Table 10- Results of multiple regression analysis between plant Fe concentration and uptake with Fe chemical forms in the soil solid phase

مدل Model	متغیر پیش بین Predictor variable	ضریب برآورد (β)	خطای استاندارد (St. Error)	t- value	p- value	95% CI (Lower-Upper)	R ²	Adj.R ²
مدل ۱: غلظت آهن برگ Model1: Leaf Fe	عرض از مبدا (Intercept)	358.75	0.901	397.9	<0.0001**	356.6 – 360.8	0.880	0.868
	آهن تبادلی Fe-EXC	10.58	1.23	8.56	<0.0001**	7.83 – 13.3		
مدل ۲: غلظت آهن دانه Model2: Seed Fe	عرض از مبدا (Intercept)	39.08	1.52	25.63	<0.0001**	35.65 – 42.50	0.715	0.686
	آهن کربناتی Fe-CAR	-1.51	0.30	-5.01	0.0005**	-2.18 – -0.83		
مدل ۳: جذب آهن دانه Model3: Seed Fe uptake	عرض از مبدا (Intercept)	245.71	12.05	20.37	<0.0001**	219.15 – 272.26	0.912	0.903
	آهن کربناتی Fe-CAR	-24.38	2.38	-10.22	<0.0001**	-29.70 – -19.07		

** معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

** significant at 0.01 probability levels.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که گیاه آفتابگردان کشت شده در خاک آهکی با غلظت آهن کمتر از حد بحرانی، توان استفاده مؤثر از آهن بومی خاک را نداشت و به کاربرد کودهای آهن، به‌ویژه از طریق کودآبیاری، واکنش مثبت نشان داد. در این میان، آمینوکلات‌های متیونین-آهن و گلیسین-آهن، عملکرد مؤثرتری نسبت به کود سولفات آهن داشتند و با ایجاد تغییر در توزیع شکل‌های شیمیایی آهن خاک، به‌طور معنی‌داری موجب افزایش غلظت و جذب آهن در گیاه شدند. همچنین، بین آهن تبادلی و آهن متصل به مواد آلی با آهن قابل استفاده (استخراج‌شده با DTPA) و محتوای آهن دانه، همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد. به‌طور کلی، کاربرد آمینوکلات‌های آهن با کاهش pH خاک و تقویت شکل‌های تبادلی و آلی آهن، در بهبود فراهمی آهن نقش داشته و با کاهش وابستگی گیاه به آهن کربناتی، یک ذخیره نسبتاً پایدار و تجدیدپذیر از آهن در خاک فراهم کرد. این یافته‌ها، استفاده از آمینوکلات‌های آهن، به‌ویژه متیونین-آهن را به‌عنوان یک راهکار نوین و جایگزین مناسبی برای کودهای معدنی آهن در مدیریت تغذیه آهن گیاه آفتابگردان در خاک‌های آهکی توصیه می‌کند. با این وجود، بررسی‌های آتی که شامل مقایسه و ارزیابی مستقیم اقتصادی و زیست‌محیطی با کلات‌های مصنوعی رایج باشد، می‌تواند در تصمیم‌گیری نهایی درباره مزیت نسبی این ترکیبات نقش تعیین‌کننده داشته باشد.

شکل کربناته آهن معمولاً در خاک‌های با pH بالا و غنی از کربنات کلسیم غالب است و بخش عمده آهن در این خاک‌ها به‌صورت ترکیبات غیرمحلول مانند FeCO_3 یا $\text{Fe}(\text{OH})_3$ رسوب کرده در شرایط معمول ریزوسفر به آسانی در دسترس گیاه قرار نمی‌گیرند (Lucena, 2003; Sposito, 2008). کاهش انحلال‌پذیری آهن با افزایش pH از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک‌های آهکی است. به‌طور خاص، افزایش هر یک واحد pH، می‌تواند حلالیت یون Fe^{3+} را تا حدود ۱۰۰۰ برابر کاهش دهد (Lindsay, 1979). بنابراین، خاک‌هایی با pH بالاتر و محتوای بیشتر کربنات کلسیم، تمایل بیشتری به رسوب آهن دارند و در نتیجه، غلظت و جذب آهن در گیاه کاهش می‌یابد.

به‌طور کلی، نتایج نشان دادند که شکل‌های تبادلی و کربناتی آهن، کلیدی‌ترین شاخص‌های کنترل‌کننده وضعیت تغذیه آهن در آفتابگردان هستند. افزایش سهم آهن تبادلی با بهبود جذب آهن همراه بود، در حالی که افزایش آهن کربناتی تأثیری منفی و بازدارنده داشت. این نتایج تأکید می‌کند که مدیریت کودی آهن با استفاده از آمینوکلات‌های آهن می‌تواند در بهبود قابلیت جذب آن در خاک‌های آهکی نقش اساسی داشته باشد.

References

1. Abadía, J., Vázquez, S., Rellán-Álvarez, R., El-Jendoubi, H., Abadía, A., Alvarez-Fernández, A., & López-Millán, A.F. (2011). Towards a knowledge-based correction of iron chlorosis. *Plant physiology and biochemistry: PPB*, 49(5), 471–482. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.01.026>
2. Alipour Babadi, M., Norouzi Masir, M., Moezzi, A.A., Rahnama, A., & Taghavi, M. (2025). Iron (Fe) biofortification using Fe-aminochelates in sunflower growing in calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 188, 519–535. <https://doi.org/10.1002/jpln.12004>
3. Ashmead, S.D., Wheelwright, D.C., Ericson, C., & Pedersen, M. (2000). A composition and method for preparing amino acid chelates free of interfering ions (U.S. Patent No. WO2002030948A3). Google Patents. <https://patents.google.com/patent/WO2002030948A3>
4. Azadi, A., Baghernejad, M., Gholami, A., & Shakeri, S. (2021). Forms and distribution pattern of soil Fe (Iron) and Mn (Manganese) oxides due to long-term rice cultivation in fars Province Southern Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(16), 1894–1911. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1900226>
5. Bashir, A., Rizwan, M., Ali, S., Rehman, M.Z., Ishaque, W., Riaz, M.A., & Maqbool, A. (2018). Effect of foliar-applied iron complexed with lysine on growth and cadmium (Cd) uptake in rice under Cd stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(21), 20691–20699. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2042-y>
6. Boustani, H., Najafi Giri, M., Amin, H., & Mirsoleimani, A. (2018). Investigation of iron chemical fractions in some calcareous soils of orange (*Citrus sinensis* L.) Orchards in Darab Region, Southeast of Fars Province. *Applied Soil Research*, 6(3), 92–105. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1554951>
7. Bremner, J.M. and Mulvaney, C.S. 1982. Nitrogen-Total. In: Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. Eds., American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
8. Colombo, C., Iorio, E.D., Liu, Q., Jiang, Z., & Barrón, V. (2018). Iron Oxide Nanoparticles in Soils: Environmental and Agronomic Importance. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(1), 761. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15294>
9. Colombo, C., Palumbo, G., He, J., Pinton, R., & Cesco, S. (2014). Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 538-548. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0814-z>
10. Cornell, R.M., & Schwertmann, U. (2003). *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. 2nd ed. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527602097>
11. Curie, C., & Briat, J.F. (2003). Iron transport and signaling in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 54, 183–206. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.135018>
12. Denning, G. (2025). Sustainable intensification of agriculture: the foundation for universal food security. *npj Sustainable Agriculture*, 3(7). <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00047-3>
13. Elfaki, J.T., Gafer, M.O., Suliman, M.M., & Ali, M.E. (2016). Assessment of calcimetric and titrimetric methods for calcium carbonate estimation of five soil types in central Sudan. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 04, 120-127. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.41014>
14. Fernández, V., & Ebert, G. (2005). Foliar iron fertilization: A critical review. *Journal of Plant Nutrition*, 28(12), 2113–2124. <https://doi.org/10.1080/01904160500320954>
15. Filgueiras, A.V., Lavilla, I., & Bendicho, C. (2002). Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. *Journal of Environmental Monitoring*, 4(6), 823–857. <https://doi.org/10.1039/B207574C>
16. Ghasemi, S., Khoshgoftarmanesh, A.H., Afyuni, M., & Hadadzadeh, H. (2014). Iron (II)–amino acid chelates alleviate salt-stress induced oxidative damages on tomato grown in nutrient solution culture. *Scientia Horticulturae*, 165, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.10.037>
17. Ghasemi, S., Khoshgoftarmanesh, A.H., Hadadzadeh, H., & Jafari, M. (2012). Synthesis of iron-amino acid chelates and evaluation of their efficacy as iron source and growth stimulator for tomato in nutrient solution culture. *Journal of Plant Growth Regulation*, 31(4), 498–508. <https://doi.org/10.1007/S00344-012-9259-7>
18. Ghoreishi Amiri, S.A., Baranimotlagh, M., & Dordipour, E. (2020). Response of spinach plant (*Spinacia oleracea*) to iron chemical forms in calcareous soil treated with sewage sludge. *Agricultural Engineering*, 43(1), 103–125. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/AGEN.2020.31328.1514>
19. González, M., Hailemichael, G., Catalina, Á., & Martín, P. (2019). Combined effects of water status and iron deficiency chlorosis on grape composition in non-irrigated vineyards. *Scientia Agricola*, 76, 473–480. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0084>
20. Hossner, L.R. (1996). Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. In: Spark, D.L., Ed., Dissolution for Total Elemental Analysis, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, 49-64.

- <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c3>
21. Huang, Y.T., Cai, S.Y., Ruan, X.L., Chen, S.Y., Mei, G.F., Ruan, G.H., & Cao, D.D. (2021). Salicylic acid enhances sunflower seed germination under Zn^{2+} stress via involvement in Zn^{2+} metabolic balance and phytohormone interactions. *Scientia Horticulturae*, 275, 109702. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109702>
22. Huei-hsuan, T., & Wolfgang, S. (2020). Biotechnology - genomics; new findings on genomics from institute of plant and microbial biology summarized (pH-dependent transcriptional profile changes in iron-deficient Arabidopsis roots). *Biotech. Week*, 21, 694. <https://doi.org/10.1101/2020.05.21.109777>
23. Jacob, R.H., Afify, A.S., Shanab, S.M., & Shalaby, E.A. (2022). Chelated amino acids: biomass sources, preparation, properties, and biological activities. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 2907–2921. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02333-3>
24. Jalali, M., Beygi, M., Jalali, M., & Buss, W. (2022). Background levels of DTPA-extractable trace elements in calcareous soils and prediction of trace element availability based on common soil properties. *Journal of Geochemical Exploration*, 241, 107073. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107073>
25. Jones, D.L., Darrah, P.R., & Kochian, L.V. (2003). Critical evaluation of organic acid mediated iron uptake in plants. *Plant and Soil*, 248(1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1023/A:1022307309411>
26. Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th Edition, CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1017/s0014479711000743>
27. Kutman, U.B., Yildiz, B., & Cakmak, I. (2011). Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole seed and the endosperm fraction of wheat. *Journal of Cereal Science*, 53(1), 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.10.006>
28. Lindsay, W.L., & Schwab, A.P. (1982). The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5(4–7), 821–840. <https://doi.org/10.1080/01904168209363012>
29. Lindsay, W.L. (1979). *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley & Sons.
30. Liu, J., Chakraborty, S., Hosseinzadeh, P., Yu, Y., Tian, S., Petrik, I., Bhagi, A., & Lu, Y. (2014). Metalloproteins containing cytochrome, iron-sulfur, or copper redox centers. *Chemical Reviews*, 114, 4366–4469. <https://doi.org/10.1021/cr400479b>
31. Loeppert, R.H., & Inskeep, W.P. (1996). Iron. In *Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods* (pp. 639–664). SSSA, ASA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c23>
32. López-Rayó, S., Nadal, P., & Lucena, J.J. (2015). Reactivity and effectiveness of traditional and novel ligands for multi-micronutrient fertilization in a calcareous soil. *Frontiers in Plant Science*, 6, 752. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00752>
33. Lucena, J.J. (2003). Fe chelates for remediation of Fe chlorosis in strategy I plants. *Journal of Plant Nutrition*, 26(10-11), 1969–1984. <https://doi.org/10.1081/pln-120024257>
34. Malakouti, N., & Kianoush, A. (2001). Determination of fertilizer requirements of field and horticultural crops in Iran based on soil, water, plant testing and deficiency symptoms (2nd ed., 297 pp.). Soil and Water Research Institute, Pars Nahal Research-Services Publishing. (In Persian)
35. Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press: San Diego, CA, USA, 2011; pp. 1–651, ISBN 0123849063.
36. McConnell, L.L., Osorio, C., & Hofmann, T. (2023). The future of agriculture and food: Sustainable approaches to achieve zero hunger. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71, 13165–13167. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c05433>
37. Mirbolook, A., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Sepehr, E., Lakzian, A., & Hakimi, M. (2020). Effect of iron chelates and their application methods on iron nutrition status of bean plant (*Phaseolus vulgaris*) in a calcareous soil. *Applied Soil Research*, 8(3), 109-128. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1862206>
38. Mohammadnia, S., Haghighi, M., Mozafarian, M., & Geösel, A. (2025). Impact of mycorrhiza inoculations and iron amino chelate on growth and physiological changes of cucumber seedlings across different pH levels. *Plants (Basel, Switzerland)*, 14(3), 341. <https://doi.org/10.3390/plants14030341>
39. Molnár, Z., Solomon, W., Mutum, L., & Janda, T. (2023). Understanding the mechanisms of Fe deficiency in the rhizosphere to promote plant resilience. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(10), 1945. <https://doi.org/10.3390/plants12101945>
40. Nadal, P., García-Delgado, C., Hernández, D., López-Rayó, S., & Lucena, J.J. (2012). Evaluation of Fe-N, N'-Bis(2-hydroxybenzyl) ethylenediamine-N, N' diacetate (HBED/Fe³⁺) as Fe carrier for soybean (*Glycine max*) plants grown in calcareous soil. *Plant Soil*, 360, 349–362. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1246-z>
41. Naeem, A., Deppermann, P., & Mühling, K.H. (2023). Ammonium fertilization enhances nutrient uptake, specifically manganese and zinc, and growth of maize in unlimed and limed acidic sandy soil. *Nitrogen*, 4, 239–252. <https://doi.org/10.3390/nitrogen4020017>
42. Nikolic, M., & Pavlovic, J. (2018). Plant responses to iron deficiency and toxicity and iron use efficiency in plants. In M. A. Hossain, T. Kamiya, D. J. Burritt, L.-S. Phan Tran, & T. Fujiwara (Eds.), *Plant micronutrient use*

- efficiency (pp. 55–69). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812104-7.00004-6>
43. Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z., & Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1190768. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190768>
44. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In: Page, A.L., Ed., *Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, 403–430. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24>
45. Pashapour, N., Reyhanitabar, A., & Ostan, Sh. (2016). Study of some agronomical traits of corn (*Zea mays* L.) affected by iron fractions in soils of East Azerbaijan. *Journal of Water and Soil Knowledge*, 26(1), 205–215. (In Persian with English abstract)
46. Priyadarshini, P., Chitdeshwari, T., & Sudhalakshmi, C. (2019). Iron availability in calcareous and non-calcareous soils as influenced by various sources and levels of iron. *Madras Agricultural Journal*, 106(1), 12–24. <https://doi.org/10.29321/maj.2019.000265>
47. Perdue, E.M., Reuter, J.H., & Giesy, J.P. (1976). Association of iron and aluminum with dissolved organic matter in black waters of the Satilla River. *Environmental Science & Technology*, 10(7), 673–678. <https://doi.org/10.1021/es60118a012>
48. Rahman, N., & Schoenau, J. (2022). Bioavailability, speciation, and crop responses to copper, zinc, and boron fertilization in South-Central Saskatchewan soil. *Agronomy*, 12(8), 1837. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081837>
49. Ren, L., Yang, H., Li, J., Zhang, N., Han, Y., Zou, H., & Zhang, Y. (2025). Organic fertilizer enhances soil aggregate stability by altering greenhouse soil content of iron oxide and organic carbon. *Journal of Integrative Agriculture*, 24(1), 306–321. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.05.026>
50. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In *Soil Science Society of America book series* (pp. 417–435). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
51. Römheld, V. (2000). The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. *Journal of Plant Nutrition*, 23(11–12), 1629–1643. <https://doi.org/10.1080/01904160009382129>
52. Römheld, V., & Marschner, H. 1986. Evidence for a specific uptake system for iron phytosiderophores in roots of grasses. *Plant physiology*, 80(1), 175–180. <https://doi.org/10.1104/pp.80.1.175>
53. Santos, C.S., Leite, A., Vinhas, S., Ferreira, S., Moniz, T., & Vasconcelos, M.W. (2020). A combined physiological and biophysical approach to understand the ligand-dependent efficiency of 3-hydroxy-4-pyridinone Fe chelates. *Plant Direct*, 4(8), 1–15. Article e00256. <https://doi.org/10.1002/pld3.256>
54. Santos, C.S., Ozgur, R., Uzilday, B., Turkan, I., Roriz, M., Rangel, A.O.S.S., Carvalho, S.M.P., & Vasconcelos, M.W. (2019). Understanding the role of the antioxidant system and the tetrapyrrole cycle in iron deficiency chlorosis. *Plants*, 8, 348. <https://doi.org/10.3390/plants8090348>
55. Schwertmann, U., & Taylor, R.M. (1989). Iron Oxides. In: Dixon, J.B. and Weed S.B., Eds., *Minerals in Soil Environments*, 2nd Edition, Soil Science Society of America, Inc., Madison, 379–438. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c8>
56. Shambhavi, S., Padbhushan, R., Sharma, S.P., & Sharma, S.K. (2016). Dynamics of iron under long-term application of chemical fertilizers and amendments on maize-wheat cropping sequence. *Journal of Plant Nutrition*, 39(6), 804–819. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1143493>
57. Sourì, M.K. (2015). *Chelates and aminochelates, and their role in plant nutrition*. Agriculture Education and Extension Press.
58. Sourì, M.K., & Hatamian, M. (2018). Aminochelates in plant nutrition: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 42(1), 67–78. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549671>
59. Sourì, M. K., Naiji, M., & Aslani, M. (2018). Effect of Fe-glycine aminochelate on pod quality and iron concentrations of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under lime soil conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(2), 215–224. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421655>
60. Sposito, G. (2008). *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
61. Sposito, G., Lund, L.J., & Chang, A.C. (1982). Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Science Society of America Journal*, 46(2), 260–264. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600020009x>
62. Tessier, A., Campbell, P.G.C., & Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate traces metals. *Analytical chemistry*, 51, 844–851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>
63. Tripathi, D.K., Singh, S., Gaur, S., Singh, S., Yadav, V., Liu, S., Singh, V.P., Sharma, S., Srivastava, P., Prasad, S.M., Dubey, N.K., Chauhan, D.K., & Sahi, S. (2018). Acquisition and homeostasis of iron in higher plants and their probable role in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Environmental Science*, 5, 86. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00086>
64. Uren, N.C. (1984). Forms, reactions and availability of iron in soils. *Journal of Plant Nutrition*, 7(1–5), 165–176. <https://doi.org/10.1080/01904168409363183>

65. Walkley, A. (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63, 251-264. <https://doi.org/10.1097/00010694-194704000-00001>
66. Wei, X., Shao, M., Zhuang, J., & Horton, R. (2010). Soil iron fractionation and availability at selected landscape positions in a loessial gully region of northwestern China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56(4), 617-626. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2010.00497.x>
67. Wolf, B. (1982). A comprehensive system of leaf analyses and its use for diagnosing crop nutrient status. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 13(12), 1035-1059. <https://doi.org/10.1080/00103628209367332>
68. Xian, X. (1989). Effect of chemical forms of cadmium, zinc, and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants. *Plant and Soil*, 113(2), 257-264. <https://doi.org/10.1007/BF02280189>
69. Young, K.C., Maurice, P.A., & Hersman, L.E. (2006). Acquisition of Fe from various natural organic matter isolates by aerobic pseudomonad bacteria. *Geomicrobiology Journal*, 23(3-4), 183-188. <https://doi.org/10.1080/01490450600724167>
70. Zaheer, I.E., Ali, S., Saleem, M.H., Imran, M., Alnusairi, G.S.H., Alharbi, B.M., Riaz, M., Abbas, Z., Rizwan, M., & Soliman, M.H. (2020). Role of iron-lysine on morpho-physiological traits and combating chromium toxicity in rapeseed (*Brassica napus* L.) plants irrigated with different levels of tannery wastewater. *Plant Physiology and Biochemistry*, 155, 70-84. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.034>

Studying the Effect of Chemical and Organic Fertilizer Application on Soil Quality

R. Mirkhani ^{1*}, F. Moshiri ¹, A. Ghaffarinejad¹, H. Rezaei ¹

1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Alborz, Iran

(*- Corresponding Author Email: Rasoul_mirkhani@yahoo.com)

Received: 19 August 2025
Revised: 25 October 2025
Accepted: 03 November 2025
Available Online: 03 November 2025

How to cite this article:

Mirkhani, R., Moshiri, F., Ghaffarinejad, A., & Rezaei, H. (2025). Studying the effect of chemical and organic fertilizer application on soil quality. *Journal of Water and Soil*, 39(4), 403-416. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.95005.1494>

Introduction

Soil quality plays a very important role in crop production. Quantitative and rapid assessment of soil quality provides the possibility of timely evaluation of the effect of management methods, including fertilization management, on soil conditions. In order to study the state of soil quality, it is necessary to use characteristics that represent dynamic soil quality that are sensitive and effective to land use changes and various management practices. In order to investigate the effects of the combined use of organic and chemical fertilizers on soil quality, this research was conducted in the form of randomized complete blocks in with 9 treatments and three replications in the Alborz province.

Materials and Methods

This research was conducted in plots with an area of 200 square meters in the Alborz province. Fertilizer treatments included: 1) fallow, 2) control (without using fertilizer), 3) application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers based on soil test, 4) application of 20 tons of cow manure every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium, 5) application of 20 tons of compost every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium, 6) annual application of 20 tons of cow manure + application 75% of the recommended amount of nitrogen, 7) annual application of 20 tons of compost + application of 75% of the recommended amount of nitrogen, 8) annual application of 20 tons of cow manure, 9) annual application of 20 tons of compost. After sampling the soil at the end of each crop and measuring the properties of pH, electrical conductivity, soil organic carbon, available phosphorus and potassium, bulk density, mean weighted diameter, cumulative soil quality index (SQI) and nemero quality index (NQI) were calculated. Finally, changes in soil quality indicators due to different management practices of organic and chemical fertilizers were evaluated.

Results and Discussion

According to the results, there was a significant difference between the treatments in the studied indices in all years, which indicated the effect of different treatments on soil quality. Furthermore, no significant differences were observed between the years. In the second and third years, the highest wheat yield in the studied treatments



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.95005.1494>

was related to treatment 7 (annual application of 20 tons of waste compost + application of 75% of the recommended nitrogen amount) with values of 3833 kg/ha (first year), 6733 kg/ha (second year) and 5211 kg/ha (third year). This resulted in increases of 44%, 105%, and 131% compared to the control treatment (without fertilizer) in the first, second, and third years, respectively. The combined application treatments of organic and chemical fertilizers (4, 5, 6 and 7) had a significant increase compared to the chemical fertilizer application treatment (treatment 3) and the organic fertilizer application treatment (treatments 8 and 9). Moreover, there was no significant difference between the combined application treatments of organic and chemical fertilizers (treatments 4, 5, 6 and 7). In addition, all treatments had a significant increase compared to the control treatment (treatment 2), which indicates the effect of the combined application of organic fertilizers with chemical fertilizers in improving soil quality and wheat yield. In the third year, there was a significant correlation between yield and soil quality indices ($p < 0.01$), which indicates the effect of increasing soil quality due to increasing organic matter and chemical fertilizers on increasing wheat yield.

Conclusion

The results showed that there was a significant difference between the treatments in the studied indices, but there was no significant difference between different years. The combined application treatments of organic and chemical fertilizers significantly increased wheat yield compared to the chemical fertilizer application treatment and the organic fertilizer application treatments, while there was no significant difference between the combined application treatments of organic and chemical fertilizers. In addition, compared to the control (without fertilizer), all treatments showed a significant increase. In the third year, there was a significant correlation between wheat yield and soil quality indices.

Keywords: Compost, Cow manure, Fertilization management, Nemero quality index

بررسی اثر کاربرد کودهای شیمیایی و آلی بر کیفیت خاک

رسول میرخانی^{۱*} - فرهاد مشیری^۱ - سید علی غفاری نژاد^۱ - حامد رضایی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

چکیده

کیفیت خاک نقش بسیار مهمی در تولید محصول دارد. ارزیابی کمی و سریع کیفیت خاک امکان بررسی به موقع تأثیر روش‌های مدیریتی از جمله مدیریت کوددهی بر شرایط خاک را فراهم می‌نماید. به منظور بررسی اثرات کاربرد کودهای آلی و شیمیایی بر کیفیت خاک، این تحقیق به مدت سه سال در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در کرت‌های ۲۰۰ متر مربعی در استان البرز انجام شد. تیمارهای کودی شامل: (۱) آیش، (۲) شاهد بدون مصرف کود، (۳) کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم بر اساس آزمون خاک، (۴) کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، (۵) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، (۶) کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، (۷) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، (۸) کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی، (۹) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند بود. پس از نمونه برداری خاک در پایان کشت گندم (هر سال) و تعیین ویژگی‌های pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها اندازه‌گیری و شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی (SQI) و نمودار (NQI) محاسبه شد. نتایج نشان داد که بین تیمارها در شاخص‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری وجود داشت ولی بین ساله‌های مختلف اختلاف معنی‌دار نبود. تیمارهای کاربرد توأم کود آلی و شیمیایی موجب افزایش معنی‌داری عملکرد گندم نسبت به تیمار کاربرد کود شیمیایی و تیمارهای کاربرد کود آلی (کود گاوی و کمپوست پسماند) داشت و بین تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی نیز اختلاف معنی‌داری وجود نداشت در ضمن همه تیمارها نیز نسبت به تیمار شاهد (تیمار بدون مصرف کود) افزایش معنی‌داری داشتند. در سال سوم بین عملکرد و شاخص‌های کیفیت خاک همبستگی معنی‌داری وجود داشت.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت نمودار، کمپوست، کود دامی، مدیریت کوددهی

مقدمه

خصوص کیفیت خاک تعاریف زیادی ارائه شده که در بیشتر آن‌ها، تأکید اصلی بر توانایی خاک در انجام وظایف مورد نظر است برای مثال کارلن و همکاران (Karlen et al., 1999) و پوال اوباد و لال (de Pual Obade & Lal, 2016) کیفیت خاک را توانایی دائم یک خاک در انجام وظایف خود به عنوان یک سیستم حیاتی زنده در داخل اکوسیستم و تحت بهره‌برداری‌های متفاوت تعریف نمودند، به گونه‌ای که علاوه بر حفظ حاصلخیزی بیولوژیکی، توانایی بهبود کیفیت آب و

خاک وظایف یا کارکردهای مختلفی دارد که از آن جمله می‌توان به توانایی تولید محصول، ذخیره کربن، نگهداری آب، چرخه عناصر غذایی و تصفیه آب اشاره کرد. از این رو بسته به هدف استفاده از خاک، می‌توان کیفیت آن را مورد توجه قرار داد. از دیدگاه کشاورزی، کیفیت خاک عبارت از توانایی تولید محصول یا باروری خاک است. در

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*)- نویسنده مسئول: Email: Rasoul.mirkhani@gmail.com

در ایران به دلیل ضعف مدیریت و استفاده نادرست از اراضی کشاورزی سالانه اراضی زیادی دچار تخریب و کاهش توان تولید می‌شوند. کشت‌های طولانی مدت و مستمر همراه با عملیات زراعی نامناسب، کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک و فرآیندهای خاک‌سازی را تحت تأثیر قرار داده و موجب پسرفت خاک می‌گردند. به منظور جلوگیری از پسرفت خاک و در راستای توسعه پایدار کشاورزی، شناخت عوامل ایجادکننده پسرفت خاک الزامی است. از اهداف مدیریت بهینه و استفاده پایدار از اراضی کشاورزی، شناسایی مدیریت‌هایی است که باعث حفظ کیفیت خاک و ارتقاء کمی و کیفی تولید در طولانی مدت گردند (Van Leeuwen et al., 2015). تاکنون تحقیقات زیادی برای ارزیابی کیفیت خاک در ایران انجام گرفته است که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت می‌باشند.

کازیک و همکاران (Tkaczyk et al., 2018) در پژوهشی به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد گندم، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و عملکرد گندم را در ۴۵ مزرعه کشاورزی تحت کشت گندم واقع در جنوب شرقی لهستان طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ اندازه‌گیری و مزارع را از نظر بافت، اسیدیته و حاصلخیزی کلاس‌بندی کردند. نتایج نشان داد که کلاس بافت خاک (به ویژه مقدار سیلت و رس) و کلاس اسیدیته تأثیر مثبتی بر عملکرد گندم زمستانه داشت و فسفر و پتاسیم قابل استفاده نیز تأثیر مثبتی بر عملکرد گندم زمستانه داشتند ولی این تأثیر معنی‌دار نبود. بیشترین عملکرد گندم مربوط به مزارع با کلاس بافتی سیلت، کلاس اسیدیته بالاتر از ۷/۲، کلاس حاصلخیزی با فسفر خیلی بالا، پتاسیم و منیزیم متوسط و نیتروژن ۶۱ تا ۹۰ کیلوگرم در هکتار بود.

بیبیرزیک و همکاران (Biberdzic et al., 2020) در پژوهشی در یک خاک ورتی‌سول در غرب صربستان به بررسی تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی بر تراکم خاک و عملکرد گندم زمستانه، نشان دادند که بیشترین تراکم خاک مربوط به سیستم بی‌خاک‌ورزی و کمترین تراکم مربوط به خاک‌ورزی رایج بود. همچنین بین رطوبت خاک و عملکرد گندم همبستگی معنی‌داری ($r=0/49$) و بین تراکم خاک و عملکرد گندم نیز همبستگی معنی‌داری ($r=0/85$) وجود داشت به طوری که با افزایش رطوبت خاک، عملکرد افزایش و با افزایش تراکم خاک عملکرد گندم کاهش یافت.

لی و همکاران (Li et al., 2019) در پژوهشی در ۱۳۲ مزرعه تحت کشت گندم دیم در شمال، شمال شرق و جنوب شرق چین، ۲۶ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را اندازه‌گیری و با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA)، ماده آلی، نیتروژن کل، نیتروژن قابل هیدرولیز قلیایی^۲ و روی قابل استفاده را به عنوان

هوا و همچنین تأمین‌کننده سلامت انسان، حیوان و گیاه را دارا با شد. پاتزل و همکاران (Patzel et al., 2000) بیان داشتند که کیفیت خاک شامل مجموعه‌های متنوعی از ویژگی‌های مختلف خاک است که با توجه به پیچیدگی‌های آن‌ها در صورت مرتبط بودن با کارکردهای مورد نظر خاک می‌توانند معیار مناسبی از کیفیت خاک باشند؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که کیفیت خاک^۱ مفهومی از کارکردهای خاک است.

ارزیابی کمی کیفیت خاک با استفاده از ترکیبی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مؤثر بر کیفیت خاک انجام می‌گیرد (Toledo et al., 2013). به منظور بررسی وضعیت کیفیت خاک بایستی از ویژگی‌های معرف کیفیت پویای خاک بهره‌گیری نمود که نسبت به تغییر کاربری زمین و اعمال مدیریت‌های مختلف حساس و اثرپذیر باشند. با توجه به آن که نمی‌توان همه ویژگی‌ها را اندازه‌گیری نمود، بسته به اهداف و شرایط مطالعات پایش، اغلب حساس‌ترین آن‌ها در برابر تغییرات انتخاب می‌گردند.

ویژگی‌های شیمیایی خاک نقش مهمی در تأمین عناصر لازم برای حاصلخیزی خاک و تولید محصول دارند (Sanchez & Swaminathan, 2005). ارزیابی ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله مقدار عناصر غذایی سهم بسزایی در جلوگیری و کاهش اثرات مضر مدیریت‌های نامناسب حاصلخیزی خاک داشته (Sun et al., 2003) و ماده آلی به دلیل نقش حیاتی در فعالیت بیولوژیکی، بهبود تخلخل و کاهش جرم مخصوص ظاهری، بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و حاصلخیزی از مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک هستند. ارزیابی کمی کیفیت خاک با استفاده از مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مؤثر بر کیفیت خاک در قالب یک مدل ریاضی به صورت عددی ارائه می‌شود. که این عدد به عنوان شاخص کلی کیفیت خاک بوده و منعکس‌کننده مجموعه‌ای ویژگی‌های مورد نظر خاک می‌باشد (Qi et al., 2009). از جمله این مدل‌ها می‌توان به معادله شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده (SQIA) و وزنی (SQIW)، شاخص کیفیت نمورو^۲ (NQI) (Doran & Parkin, 1997) اشاره کرد. ارزیابی کیفیت خاک به عنوان یک ابزار در گزینش شیوه‌های مدیریتی ویژه نقش بسیار مهمی داشته و معیاری برای سنجش کشاورزی پایدار است (Van Leeuwen et al., 2015). آگاهی از وضعیت کیفیت خاک در کشاورزی و منابع طبیعی برای مدیریت بهینه اراضی و رسیدن به حداکثر بهره‌وری اقتصادی ضروری است. در کشورهای در حال توسعه به علت آسیب‌پذیری خاک‌های کشاورزی از نظر زیست‌محیطی، توجه به کیفیت خاک دارای اهمیت اقتصادی زیادی است.

گرفت. نتایج نشان داد که استراتژی‌های مدیریت عناصر غذایی به‌طور قابل توجهی بر شاخص‌های کیفیت خاک تأثیر داشت و تیمار NPKF بالاترین امتیاز کیفیت خاک را برای شاخص کیفیت فیزیکی، تغذیه‌ای و بیولوژیکی خاک و تیمار NPKP بالاترین امتیاز کیفیت خاک را برای شاخص کیفیت شیمیایی داشت.

ایسونگو همکاران (Isong et al., 2022) با استفاده از ۱۱۰ نمونه خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) در فواصل ۲-۵ کیلومتری در ایالت کراس ریور، نیجریه جمع‌آوری کردند و ۱۱ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را تعیین شد. سپس کیفیت خاک را با استفاده از مجموعه کل ویژگی‌ها (TDS) و مجموعه حداقل ویژگی‌ها (پایداری ساختمان خاک، درصد شن، مقدار کربن آلی خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) محاسبه کردند و از دو تابع امتیازدهی خطی (L) و غیرخطی (NL) برای امتیازدهی استفاده کردند نتایج نشان داد که کیفیت خاک در منطقه جنوبی بالا و در منطقه شمالی پایین بود. کلاس با کیفیت خاک بالا ($< 49\%$) و کلاس کیفیت خاک متوسط ($< 14\%$) در همه مدل‌های پیش‌بینی استفاده شده بر منطقه مورد مطالعه غالب بود.

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2020) در پژوهشی کیفیت خاک اراضی کشاورزی نظرآباد استان البرز را بررسی کردند. برای این منظور ۹۵ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) را به صورت شبکه‌بندی (1650×1650 متر) نمونه‌برداری و ۲۰ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را اندازه‌گیری کردند و کمترین ویژگی‌ها (MDS) شامل شن، جرم مخصوص ظاهری، کربنات کلسیم معادل، فسفر، نسبت جذب سدیم و بر با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) انتخاب شدند شاخص‌های کیفیت نمورو (NQI) و تجمعی ساده (IQI_a) و وزنی (IQI_w) را بررسی کردند نتایج نشان داد که بین عملکرد گندم آبی و شاخص‌های IQI_w ($r=0.68$)، IQI_a ($r=0.67$) و NQI ($r=0.62$) که با استفاده از حداقل ویژگی‌های خاک تعیین شده بود، همبستگی معنی‌دار ($p < 0.01$) بود همچنین با توجه به نتایج، شاخص IQI_w بر مبنای حداقل ویژگی‌های خاک، حدود ۸۲ درصد منطقه نظرآباد دارای کیفیت خاک خیلی خوب و خوب بود و حدود ۱۱ درصد کیفیت متوسط و حدود ۷ درصد کیفیت پایین و خیلی پایین بود.

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2021) در پژوهشی کیفیت خاک اراضی کشاورزی ساوجبلاغ استان البرز را بررسی کردند. در این مطالعه نمونه‌های خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) از ۵۰ مزرعه در منطقه ساوجبلاغ استان البرز نمونه‌برداری و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری کردند. کل متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک را استخراج و کمترین متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک را با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) انتخاب کردند و شاخص‌های کیفیت خاک شامل کیفیت تجمعی وزنی

کمترین ویژگی‌ها انتخاب و شاخص کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) را تعیین کردند. نتایج نشان داد که در سه سطح عملکرد بالا، متوسط و پایین گندم، شاخص کیفیت تجمعی به‌ترتیب برابر 0.55 ، 0.48 و 0.39 بود و شاخص کیفیت خاک با عملکرد گندم همبستگی معنی‌داری ($r=0.40$) در سطح یک درصد داشت.

نبی الهی و همکاران (Nabiollahi et al., 2017) به بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در اراضی کشاورزی تحت تأثیر هدایت الکتریکی استان کردستان در ایران پرداختند. در این پژوهش از سه مدل تعیین شاخص کیفیت خاک تجمعی (IQI_a)، شاخص کیفیت تجمعی وزنی (IQI_w) و شاخص کیفیت نمورو در ۱۵۰ نمونه خاک استفاده کردند و ۹ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را اندازه‌گیری کردند با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، هدایت الکتریکی، اسیدیته، درصد سدیم تبادل، ظرفیت تبادل کاتیونی و جرم مخصوص ظاهری را به‌عنوان حداقل داده‌ها (MDS) را تعیین کردند. نتایج مقادیر ضریب همبستگی خطی نشان داد که ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از IQI_w ($R^2=0.82$) بهتر از IQI_a ($R^2=0.78$) و IQI_n ($R^2=0.74$) بود و استفاده از مجموع کل داده‌ها نیز بهتر از مجموعه حداقل داده‌ها بود. با این حال، استفاده از شاخص IQI_w و روش مجموعه حداقل داده‌ها به‌دلیل صرفه‌جویی در زمان و هزینه برای ارزیابی کیفیت خاک توصیه کردند.

کارکج و همکاران (Karkaj et al., 2019) طی پژوهشی به منظور انتخاب شاخص کیفیت مناسب برای اکوسیستم مرتع در منطقه نیمه‌خشک آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران، با اندازه‌گیری ۱۶ ویژگی خاک با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، هفت ویژگی شامل درصد رس و سیلت، هدایت الکتریکی، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل، ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت جذب سدیم را به‌عنوان حداقل ویژگی‌ها انتخاب کردند و با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها، شاخص‌های کیفیت تجمعی وزنی، تجمعی ساده و شاخص کیفیت نمورو را تعیین کردند و با ارزیابی نسبت کارایی (ER) و شاخص حساسیت (SI) نشان دادند که شاخص کیفیت نمورو با استفاده از حداقل ویژگی‌ها با شاخص حساسیت $2/60$ و نسبت کارایی $85/71$ مناسب‌ترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک مراتع نیمه‌خشک می‌باشد.

بازاک و همکاران (Basak et al., 2022) با بررسی کیفیت خاک در سیستم کشت برنج (*Oryza sativa* L.) و گندم (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از مدل اصلاح شده چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF)، شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی، تغذیه‌ای و بیولوژیکی خاک برای استراتژی‌های مدیریت مواد مغذی مختلف، یعنی کود معدنی (NPK)، $7/5$ تن در هکتار کود دامی (NPKF)، 10 تن در هکتار کاه شلتوک (NPKP) و (NPK) 8 تن در هکتار کود سبز (NPKG) مورد تجزیه و تحلیل قرار

نمونه برداری خاک در پایان هر کشت، ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک شامل: pH، هدایت الکتریکی به وسیله EC، سنج، کربن آلی به روش والکلی بلاک (Walkley & Black, 1934)، مقادیر فسفر قابل استفاده به روش اولسن (Olsen et al., 1982) و پتاسیم قابل استفاده به روش استخراج با استات آمونیوم یک نرمال، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Aria & Mirkhani, 2005) اندازه‌گیری شد. از مجموع ویژگی‌های خاک، شاخص‌های کیفیت خاک محاسبه شد. برای تعیین شاخص‌های کیفیت خاک بعد از نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و تعیین سهم هر ویژگی، شاخص‌های کیفیت برای هر نمونه خاک با استفاده از معادله تجمعی کیفیت خاک (ساده و وزنی) (SQI) و معادله شاخص کیفیت نمورو (NQI) محاسبه شد. هر یک از مدل‌های NQI و SQI با استفاده از کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک تعیین شد.

شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده (IQI_A) (Andrews et al., 2002a, 2002b) و تجمعی وزنی (IQI_W) (Doran & Parkin, 1996; Karlen et al., 1997) به ترتیب به صورت زیر می‌باشند:

$$IQI_W = \sum_{i=1}^n S_i W_i \quad (1)$$

$$IQI_A = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{n} \quad (2)$$

که در آنها: S_i مقدار هر ویژگی خاک (امتیاز ویژگی)، W_i وزن هر ویژگی خاک و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر است.

شاخص کیفیت نمورو (NQI) از رابطه زیر به دست می‌آید (Qin & Zhao, 2000):

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ava}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (3)$$

که در آن: P_{ave} میانگین مقادیر ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک، P_{min} کمترین مقدار موجود در بین ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر برای محاسبه هر شاخص است.

با توجه به این که ویژگی‌های انتخاب شده دارای واحدهای متفاوتی هستند، به منظور این که بتوان آن‌ها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، مقادیر ویژگی‌ها به اعداد بدون واحد بین صفر تا یک تبدیل شدند. برای این منظور از تابع عضویت فازی استفاده شد (Torbert et al., 2008). با استفاده از توابع عضویت فازی، ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک به امتیازات بدون بعد صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک و محصول) تا یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک و محصول) تبدیل شدند (Yanbing et al., 2009).

(SQI_W) و تجمعی ساده (SQI_A) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) تعیین کردند. همچنین تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت را با استفاده از روش زمین‌آمار تحلیل و توزیع مکانی آن‌ها را با استفاده از روش کریجینگ معمولی تعیین کردند. نتایج نشان داد که شاخص NQI با استفاده از کل ویژگی‌ها دقت بالاتری بر اساس آماره‌های R^2 برابر با ۰/۸۵ و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE=۰/۰۱) برای تهیه نقشه کیفیت خاک داشت و قسمت وسیعی از منطقه کیفیت بالا داشت (کلاس II).

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2024) در پژوهش در ۲۰۶ گندم‌زار استان آذربایجان شرقی (دشت تبریز)، شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده (SQI_A) و تجمعی وزنی (SQI_W) و نمورو (NQI) خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متری) و عملکرد گندم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری در سطح یک درصد (p<۰/۰۱) بین عملکرد گندم و شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از حداقل ویژگی‌ها (r=۰/۶۳-۰/۶۰) و کل ویژگی‌ها (r=۰/۵۶-۰/۶۰) و همچنین بین استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها در NQI (r=۰/۸۱)، SQI_W (r=۰/۸۴) و SQI_A (r=۰/۸۸) وجود داشت. لذا هر سه شاخص مورد بررسی برای منطقه مورد مطالعه مناسب بوده و استفاده از حداقل ویژگی‌ها به دلیل همبستگی نسبتاً بالاتر و تعداد ویژگی‌ها و هزینه کمتر، مناسب‌تر از روش استفاده از کل ویژگی‌ها بود. با وجود مطالعات زیادی که در خصوص کیفیت خاک انجام شده، در خصوص تأثیر کاربرد کودهای آلی و شیمیایی بر کیفیت خاک مطالعات اندکی انجام شده است. لذا بررسی کیفیت خاک و ویژگی‌های خاک مرتبط با آن در مدیریت‌های مختلف کودی ضروری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش

این تحقیق به منظور بررسی اثرات کاربرد توأم کودهای شیمیایی و آلی بر کیفیت خاک زیر کشت گندم در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ به مدت سه سال در استان البرز انجام شد. تیمارهای کودی شامل (۱) آیش، (۲) شاهد بدون مصرف کود، (۳) کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک (۴) کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، (۵) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، (۶) کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، (۷) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، (۸) کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی و (۹) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند بود. پس از

ویژگی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد و وارد معادلات شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده (SQI_A) و وزنی (SQI_W) و نمودار (NQI) شدند و در نهایت یک مقدار به عنوان شاخص کیفیت خاک ارائه شد (Qi et al., 2009). برای تعیین حدود طبقه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک، از جدول ۲ استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک و کودهای آلی

جدول ۳ نتایج تجزیه خاک محل اجرای آزمایش را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تجزیه خاک، محل اجرای آزمایش دارای خاک قلیایی با ماده آلی پایین بوده و از نظر فسفر قابل استفاده (کم)، آهن قابل استفاده (خیلی کم) و منگنز قابل استفاده (کم) دارای کمبود می‌باشد (Moshiri et al., 2014).

جدول ۴ نتایج تجزیه کودهای آلی مورد استفاده در تیمارهای آزمایش را نشان می‌دهد.

ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک

جدول ۵ مقادیر اشتراک‌پذیری و وزن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۵، کربن آلی خاک بالاترین وزن و فسفر قابل استفاده پایین‌ترین وزن را داشتند. بنابراین منطقه مورد مطالعه از نظر کربن آلی دارای محدودیت بیشتری است. لذا، کاربرد کود دامی علاوه بر بهبود شرایط شیمیایی خاک موجب بهبود شرایط فیزیکی خاک مثل بهبود ساختمان خاک شده و موجب بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد محصول خواهد شد. امامی و همکاران (Emami et al., 2014) طی پژوهش با بررسی تأثیر مواد آلی بر مقادیر کمی کیفیت خاک نشان دادند که افزودن مواد آلی سبب بهبود کیفیت خاک شد و کلاس کیفیت خاک بین یک یا دو درجه ارتقاء داد.

جدول ۶ نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های کیفیت خاک مورد بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج در همه سال‌ها بین تکرارها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ولی بین تیمارها در شاخص‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری وجود داشت که این اختلاف در سال اول (۱۳۹۶) در سطح ۵ درصد و در سال دوم (۱۳۹۷) و سوم (۱۳۹۸) در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود که نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای مختلف بر کیفیت خاک بود. همچنین بین سال‌های مختلف اختلاف معنی‌دار نبود.

جدول ۷، وضعیت کیفیت خاک در تیمارهای مورد مطالعه را با

سه نوع منحنی نمره‌دهی “کمتر بهتر است”، “بیشتر بهتر است” و “حد بهینه” برای تبدیل مقادیر به امتیاز بدون بعد بین صفر تا یک استفاده شد. برای منحنی‌های نمره‌دهی “بیشتر بهتر است” و “کمتر بهتر است” به ترتیب با استفاده از روابط (۴) و (۵) و منحنی “حد بهینه” از تلفیق روابط (۴) و (۵) استفاده شد (MATLAB (R2015b, 2015):

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (5)$$

که در آنها: $f(x)$ امتیاز ویژگی که بین صفر و یک است، x مقدار ویژگی، a مقدار آستانه پایین ویژگی و b مقدار آستانه بالای ویژگی هستند.

جدول ۱ تابع نمره‌دهی، حد بهینه، کمینه و بیشینه محدود کننده ویژگی‌های اندازه‌گیری شده برای رشد گندم را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۱ برای ویژگی‌هایی مانند پایداری خاکدانه‌ها، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب از منحنی نمره‌دهی “بیشتر بهتر است” استفاده شد. برای ویژگی‌هایی مانند هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری، از منحنی “کمتر بهتر است” استفاده شد. برای ویژگی‌هایی مانند پدیده‌ها، از منحنی “حد بهینه” استفاده شد (Cherubin et al., 2016).

در ادامه سهم اشتراک‌پذیری^۴ هر ویژگی به روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی به وسیله نرم‌افزار SPSS ۲۴ انجام شد سپس نسبت مقدار سهم اشتراک‌پذیری هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم اشتراک‌پذیری کل ویژگی‌ها در هر مجموعه، به عنوان وزن هر

3- Optimum range

4- Communalilty

1- Less is better

2- More is better

به تیمارهای ۲، ۳، ۵ و ۷ اختلاف معنی دار داشت و در سال دوم کمترین و بیشترین مقدار کیفیت خاک به ترتیب مربوط به تیمارهای ۱ و ۴ بود و تیمار ۴ نسبت به سایر تیمارها اختلاف معنی داری داشت که نشان دهنده تأثیر معنی دار کاربرد توأم کود گاوی و شیمیایی بر کیفیت خاک می باشد که دلیل آن تأثیر کود گاوی بر بهبود ویژگی های فیزیکی و تأثیر کود شیمیایی پرمصرف به ویژه فسفر بر بهبود فسفر قابل استفاده خاک می باشد. خارج و همکاران (*Kharche et al., 2013*) در تحقیقی به منظور بررسی کودهای شیمیایی و آلی و کاه و کلس و کود سبز بر کیفیت خاک نشان دادند که کاربرد مداوم کودهای شیمیایی همراه با کودآلی بیش از کاربرد کودهای شیمیایی تنها موجب بهبود خصوصیات فیزیکی خاک شده است.

استفاده از شاخص های کیفیت نمودار (NQI)، شاخص کیفیت تجمعی ساده (SQI_a) و شاخص کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) را نشان می دهد. با توجه به نتایج، تیمارهای مورد مطالعه دارای طیف وسیعی از محدوده کیفیت خاک می باشد و محدوده کیفیت خاک در شاخص های SQI_w، SQI_a، NQI، در سال اول به ترتیب ۰/۲۷۰ - ۰/۱۸۲، ۰/۴۷۸ - ۰/۳۲۲ و ۰/۴۷۴ - ۰/۳۴۲ و در سال دوم به ترتیب ۰/۳۹۳ - ۰/۱۷۲، ۰/۶۷۰ - ۰/۳۰۵ و ۰/۶۴۰ - ۰/۳۰۳ و در سال سوم به ترتیب ۰/۲۸۵ - ۰/۱۳۸، ۰/۴۹۹ - ۰/۲۴۴ و ۰/۵۰۵ - ۰/۲۳۹ بودند. در سال اول کمترین و بیشترین مقدار کیفیت خاک در شاخص های مورد مطالعه به ترتیب مربوط به تیمارهای ۳ و ۹ بود و تیمار ۹ نسبت

جدول ۱- تابع نمره دهی، حد بهینه، کمینه و بیشینه محدود کننده ویژگی های اندازه گیری شده برای رشد گندم
Table 1- Scoring functions and upper, optimum and lower threshold values of measured properties for wheat growth

ویژگی های خاک Soil properties	بافت Texture	تابع نمره دهی Scoring function	حد کمینه محدود کننده Lower threshold values	حد بیشینه محدود کننده Upper threshold values
جرم مخصوص ظاهری (Bd) (g.cm ⁻³)	لوم Loam	Less is better	1.4	1.7
میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (MWD) (cm)		More is better	0	3.38
کربن آلی (OC) (%)		More is better	0	2
فسفر قابل استفاده (P _{ava}) (mg.kg ⁻¹)		More is better	5	15
پتاسیم قابل استفاده (K _{ava}) (mg.kg ⁻¹)		More is better	100	200

جدول ۲- طبقه بندی شاخص های کیفیت خاک (Mirkhani, 2020)

Table 2-Classification of soil quality grades					
شاخص Index	کلاس کیفیت خاک Soil quality grade				
	خیلی خوب (I) Very high	خوب (II) High	متوسط (III) Moderate	پایین (IV) Low	خیلی پایین (V) Veryhigh
	>0.417	0.365- 0.417	0.314- 0.365	0.263- 0.314	<0.263
NQI	>0.417	0.365- 0.417	0.314- 0.365	0.263- 0.314	<0.263
SQI _a	>0.649	0.580- 0.649	0.512- 0.580	0.444- 0.512	<0.444
SQI _w	>0.663	0.600- 0.663	0.521- 0.600	0.410- 0.521	<0.410

NQI: شاخص کیفیت نمودار، SQI_a: شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده و SQI_w: شاخص کیفیت خاک تجمعی وزنی

جدول ۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 3-Soil physical and chemical properties of the test site										
NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	PWP	FC	SP	CCE	OC	CEC	EC	pH	محل اجرا Test site
mg.kg ⁻¹			Weight percent				cmol.kg ⁻¹	dS.m ⁻¹	-	
1.7	17.8	8.4	16.7	36.3	12.5	0.49	13.6	1.1	8.2	
Soil Texture	Sand	Silt	Clay	Cu _{ava}	Zn _{ava}	Mn _{ava}	Fe _{ava}	K _{ava}	P _{ava}	ایستگاه تحقیقاتی کرج Karaj
-		%					mg.kg ⁻¹			
لوم	37	38	25	0.93	0.98	5.7	1.63	218	5.8	

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، CCE: کربنات کلسیم معادل، FC: رطوبت ظرفیت زراعی، PWP: رطوبت نقطه پژمردگی دائم، SP: رطوبت اشباع

جدول ۴- نتایج تجزیه کودهای آلی مورد استفاده در تیمارهای آزمایش

Table 4- Results of the analysis of organic fertilizers used in the experimental treatments

سال Year	نوع کود آلی Type of organic fertilizer	pH	EC dS.m ⁻¹	OC	N _{total}	P _{total}	K _{total}	Moisture %	Mass loss at 400°C
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	کود گاوی (cow manur)	8.6	8.3	۲۰/۲	1.35	0.78	1.12	22	41.2
	کمپوست (Compost)	6.9	8	14	1.03	0.87	0.43	20	30.7
		NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁻	Fe _{total}	Mn _{total}	Zn _{total}	Cu _{total}	Cd _{total}	Pb _{total}
		mg kg ⁻¹							
	کود گاوی (Cow manur)	77	630	3260	286	186	47	0.16	4.1
	کمپوست (Compost)	112	420	7578	420	425	22.5	1.11	133.5
سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)	نوع کود آلی Type of organic fertilizer	pH	EC dS m ⁻¹	OC	N _{total}	P _{total}	K _{total}	Moisture %	Mass loss at 400°C
	کود گاوی (Cow manur)	9.5	9.1	13.5	0.91	0.74	1.42	25	48.2
	کمپوست (Compost)	7.7	10.5	15.5	1.42	0.86	0.90	23	40.6
		NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁻	Fe _{total}	Mn _{total}	Zn _{total}	Cu _{total}	Cd _{total}	Pb _{total}
		mg kg ⁻¹							
	کود گاوی (cow manur)	112	420	3550	295	122	33	0.2	3.1
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	کود گاوی (Cow manur)	196	590	15975	530	750	40	1.24	177
	کمپوست (Compost)								
	نوع کود آلی Type of organic fertilizer	pH	EC dS.m ⁻¹	OC	N _{total}	P _{total}	K _{total}	Moisture %	Mass loss at 400°C
	کود گاوی (Cow manur)	-	12.4	22.6	1.86	1.21	1.56	20	53.8
	کمپوست (Compost)	-	9.1	21.1	1.66	0.83	0.76	18	36.6
		NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁻	Fe _{total}	Mn _{total}	Zn _{total}	Cu _{total}	Cd _{total}	Pb _{total}
		mg kg ⁻¹							
	کود گاوی (Cow manur)	-	12.4	22.6	1.86	1.21	1.56	20	53.8
	کمپوست (Compost)	-	9.1	21.1	1.66	0.83	0.76	18	36.6

جدول ۵- مقادیر وزن ویژگی‌های خاک

Table 5- Weight values of soil properties

ویژگی‌های خاک Soil properties	اشتراک‌پذیری Communality	وزن Weight
جرم مخصوص ظاهری (Bd) (g.cm ⁻³)	0.603	0.180
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) (cm)	0.732	0.218
کربن آلی % (OC)	0.780	0.233
فسفر قابل استفاده (P _{ava}) (mg.kg ⁻¹)	0.530	0.158
پتاسیم قابل استفاده (K _{ava}) (mg.kg ⁻¹)	0.708	0.211

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص‌های کیفیت خاک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد

Table 6- Results of variance analysis (mean of square) of soil quality indicators based on LSD test at 5% level

سال Year	منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean of squares		
			NQI	SQIa	SQIw
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	تکرار (Replication)	2	0.002 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.003 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.002*	0.007*	0.006*
سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)	تکرار (Replication)	2	0.001 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.001 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.015**	0.042**	0.034**
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	تکرار (Replication)	2	0.002 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.007 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.006**	0.018**	0.019**
	سال (Year)	2	0.020 ^{ns}	0.023 ^{ns}	0.002 ^{ns}

** معنی‌داری در سطح ۱٪ * معنی‌داری در سطح ۵٪ ns غیرمعنی‌دار

ns, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

جدول ۷- مقادیر شاخص های کیفیت خاک در تیمارهای آزمایشی
Table 7- Values of soil quality indices in the experimental treatments

تیمار Treatment	سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)			سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)			سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)		
	NQI	SQLa	SQLw	NQI	SQLa	SQLw	NQI	SQLa	SQLw
1	0.245 ^{abc}	0.404 ^{abcd}	0.406 ^{bcd}	0.172 ^d	0.305 ^f	0.303 ^f	0.138 ^b	0.244 ^b	0.239 ^c
2	0.217 ^{cd}	0.382 ^{cd}	0.395 ^{cd}	0.256 ^c	0.454 ^c	0.459 ^c	0.229 ^a	0.405 ^a	0.408 ^{ab}
3	0.182 ^d	0.322 ^d	0.342 ^d	0.317 ^b	0.543 ^b	0.529 ^b	0.230 ^a	0.406 ^a	0.410 ^{ab}
4	0.249 ^{abc}	0.419 ^{abc}	0.424 ^{abc}	0.393 ^a	0.670 ^a	0.640 ^a	0.270 ^a	0.476 ^a	0.478 ^{ab}
5	0.218 ^{bcd}	0.378 ^{cd}	0.384 ^{cd}	0.316 ^b	0.539 ^{bc}	0.522 ^{bc}	0.231 ^a	0.408 ^a	0.406 ^b
6	0.254 ^{abc}	0.423 ^{abc}	0.431 ^{abc}	0.293 ^{bc}	0.517 ^{bc}	0.531 ^{bc}	0.261 ^a	0.461 ^a	0.462 ^{ab}
7	0.220 ^{bcd}	0.383 ^{cd}	0.393 ^{cd}	0.303 ^{bc}	0.507 ^{bc}	0.523 ^{bc}	0.271 ^a	0.479 ^a	0.485 ^{ab}
8	0.266 ^{ab}	0.468 ^{ab}	0.474 ^{ab}	0.218 ^d	0.386 ^{df}	0.404 ^{df}	0.285 ^a	0.499 ^a	0.505 ^a
9	0.270 ^a	0.478 ^a	0.476 ^a	0.189 ^d	0.319 ^{df}	0.345 ^{df}	0.265 ^a	0.465 ^a	0.466 ^{ab}

(۱) آیش، (۲) شاهد بدون مصرف کود، (۳) کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک، (۴) کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، (۵) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، (۶) کاربرد ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، (۷) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، (۸) کاربرد ۲۰ تن کود گاوی، (۹) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند

وسیعی از عملکرد می‌باشد. با توجه به میانگین عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه، میانگین عملکرد گندم در تیمار ۷ (با مقادیر ۳۸۳۳ (سال اول)، ۶۷۳۳ (سال دوم) و ۵۲۱۱ (سال سوم) کیلوگرم در هکتار) نسبت به تیمار شاهد (بدون استفاده از کود) در سال‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۴۴، ۱۰۵ و ۱۳۱ درصد افزایش داشت. در سال اول تیمار ۵، بجز تیمار ۶، با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت و سایر تیمارها نیز با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند در سال دوم نیز تیمار ۷، بجز تیمار ۶، با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت در سال سوم نیز تیمارهای کاربرد توأم کود آلی و شیمیایی (۴، ۵، ۶ و ۷) افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار بدون مصرف کود (تیمار ۲)، تیمار کاربرد کود شیمیایی (تیمار ۳) و تیمار کاربرد کود آلی (تیمارهای ۸ و ۹) داشت و بین تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی (تیمارهای ۴، ۵، ۶ و ۷) نیز اختلاف معنی‌داری وجود نداشت در ضمن در سال سوم همه تیمارها نیز نسبت به تیمار شاهد (تیمار ۲) افزایش معنی‌داری داشتند که این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی (بدلیل تأثیر بر فعالیت‌های بیولوژیکی خاک، بهبود ساختمان خاک و نفوذپذیری به‌ویژه در سال سوم) به همراه کود شیمیایی پرمصرف فسفر به‌دلیل افزایش و بهبود فسفر قابل استفاده خاک بر افزایش عملکرد گندم می‌باشد که با نتایج دیگر پژوهگران مطابقت داشت.

در سال سوم نیز کمترین و بیشترین مقدار کیفیت خاک به ترتیب مربوط به تیمارهای ۱ و ۸ بودند البته در سال سوم همه تیمارها نسبت به تیمار ۱ افزایش معنی‌داری داشتند ولی نسبت به هم اختلاف معنی‌داری نداشتند ولی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کود گاوی بهتر بوده ولی این اختلاف نسبت به کمپوست معنی‌دار نبود و کاربرد کود شیمیایی نیز تأثیر معنی‌داری با عدم کاربرد آن نداشت. که این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تیمار کود دامی و کمپوست پسماد در بهبود کیفیت خاک می‌باشد. لی و همکاران (Li et al., 2020) با بررسی تأثیر کودهای آلی و شیمیایی بر کیفیت خاک و عملکرد کلزا در اراضی دیم منطقه نیمه گرم سیر در چین نشان دادند که ماده آلی با عملکرد کلزا ($r=0.69$) معنی‌داری در سطح یک درصد داشت و افزودن کودهای آلی نه تنها کیفیت خاک را بهبود بخشید، بلکه باعث افزایش عملکرد کلزا در مقایسه با کودهای شیمیایی شد.

عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در تیمارهای مورد بررسی

جدول ۸ مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین عملکرد گندم را نشان می‌دهد. محدوده عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه در سال‌های اول تا سوم به ترتیب ۳۸۳۳-۱۶۶۷، ۶۷۳۳-۲۳۸۳ و ۵۲۱۱-۲۲۵۶ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. لذا تیمارها مورد مطالعه دارای محدوده

جدول ۸- مقادیر عملکرد گندم در تیمارهای آزمایشی
Table 8- Wheat yield values in experimental treatments

تیمار Treatment	سال (Year)		
	First year (2017)	Second year (2018)	Third year (2019)
آیش (Fallow)	fallow	fallow	fallow
شاهد (بدون مصرف کود) Control (without using fertilizer)	2667 ^b	3283 ^{cd}	2256 ^d
کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژن، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک Application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers based on soil test	1833 ^b	3867 ^{cb}	3656 ^{cb}
کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of cow manure every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	2833 ^b	4756 ^b	5164 ^a
کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of compost every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	2833 ^{ab}	2383 ^d	4776 ^{ab}
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of cow manure + application 75% of the recommended amount of nitrogen	3833 ^a	5717 ^{ab}	5024 ^a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of compost + application of 75% of the recommended amount of nitrogen	2667 ^b	6733 ^a	5211 ^a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی Annual application of 20 tons of cow manure	1667 ^b	2689 ^d	3096 ^c

بین عملکرد گندم و شاخص کیفیت تجمعی وزنی همبستگی معنی داری ($r=0/40$) در سطح یک درصد وجود داشت. نبی الهی و همکاران (Nabiollahi et al., 2017) نیز در پژوهشی در اراضی کشاورزی تحت تأثیر شوری در استان کردستان ایران نشان دادند که بین عملکرد گندم آبی و IQI_w ($r=0/70$)، IQI_a ($r=0/71$) و NQI ($r=0/71$) با حداقل ویژگی‌ها همبستگی معنی دار ($p<0/01$) است. پاول و همکاران (Paul et al., 2020) با بررسی کیفیت خاک حوزه آبخیز Bansloi در شرق هند، همبستگی بین عملکرد گندم و ذرت با شاخص کیفیت تجمعی وزنی را به ترتیب $R^2=0/21$ و $R^2=0/09$ و با تجمعی ساده را به ترتیب $R^2=0/20$ و $R^2=0/08$ بیان کردند. لی و همکاران (Li et al., 2013) با ارزیابی کیفیت خاک شالیزارهای شهرستان یچینگ در استان جیانگشی چین بیان کردند که بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج همبستگی معنی داری ($r=0/41$) در سطح یک درصد وجود داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که بین تیمارها در شاخص‌های مورد بررسی اختلاف معنی داری وجود داشت ولی بین سال‌های مختلف اختلاف معنی دار نبود. تیمارهای کاربرد توأم کود آلی و شیمیایی موجب افزایش معنی داری عملکرد گندم نسبت به تیمار کاربرد کود شیمیایی و تیمارهای کاربرد کود آلی (کود گاوی و کمپوست) شد و بین تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی نیز اختلاف معنی داری وجود نداشت.

برای مثال برار و همکاران (Brar et al., 2015) با بررسی تأثیر استفاده از کودهای معدنی و کود آلی بر کربن آلی خاک و خواص فیزیکی خاک در تناوب گندم-ذرت در طی ۳۶ سال در دانشگاه پنجاب هند نشان دادند که کشت مداوم و استفاده توأم کودهای آلی و معدنی باعث افزایش عملکرد دانه و تولید محصول گردید. استفاده از کودهای معدنی به همراه کود آلی، بهترین گزینه برای تولید بالای محصول در تناوب ذرت و گندم بود. لیو و همکاران (Liu et al., 2017) نیز در پژوهشی بر روی گیاه روغنی *Camellia oleifera* در منطقه نیمه گرمسیری چین نشان داد که نمونه‌های خاک کشتزارهای دارای عملکرد بالا به طور معنی داری دارای مقادیر بالای مواد آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم بودند. در مقابل نمونه‌های خاک کشتزارهای دارای عملکرد پایین فاقد فسفر و پتاسیم و قابل استفاده بودند.

رابطه بین عملکرد محصول و شاخص‌های کیفیت خاک

جدول ۹ همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، در سال‌های اول و دوم بین عملکرد گندم و مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک همبستگی معنی داری وجود نداشت ولی در سال سوم بین عملکرد و شاخص‌های کیفیت خاک همبستگی معنی داری وجود داشت ($p<0/01$) که نشان‌دهنده تأثیر افزایش کیفیت خاک بر افزایش عملکرد گندم بدلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی حاصل از کاربرد کود آلی با گذشت زمان و همچنین بهبود وضعیت عناصر پرمصرف خاک بویژه فسفر قابل استفاده می‌باشد. لی و همکاران (Li et al., 2019) در پژوهشی در اراضی دیم تحت کشت گندم و ذرت نشان دادند که

جدول ۹- همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد گندم

Table 9- Correlation between soil quality indicators and wheat yield

سال Year		NQI	SQI _a	SQI _w	عملکرد گندم Wheat yield
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	NQI	1			
	SQI _a	0.99 **	1		
	SQI _w	0.97 **	0.99 **	1	
	Wheat yield	0.25	0.11	0.08	۱
سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)	NQI	1			
	SQI _a	1 **	1		
	SQI _w	0.99 **	0.99 **	1	
	Wheat yield	0.48	0.48	0.14	1
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	NQI	1			
	SQI _a	1 **	1		
	SQI _w	1 **	1 **	1	
	Wheat yield	0.74 **	0.75 **	0.74 **	1

نیز نسبت به تیمار شاهد (تیمار بدون مصرف کود) افزایش معنی‌داری داشتند. در سال سوم بین عملکرد و شاخص‌های کیفیت خاک هم‌ستگی معنی‌داری وجود داشت که نشان‌دهنده بهبود ویژگی‌های فیزیکی حاصل از کاربرد کود آلی با گذشت زمان می‌باشد.

با توجه به کمبود ماده آلی و فسفر قابل استفاده خاک اولیه، این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی بدلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی (ساختمان خاک و نفوذپذیری خاک) و شیمیایی (افزایش و بهبود فسفر قابل استفاده خاک) و تأثیر بر بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد گندم می‌باشد در ضمن همه تیمارها

References

1. Andrews, S.S., Karlen, D.L., & Mitchell, J.P. (2002b). A comparison of soil quality indices methods for vegetable production system in northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90, 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
2. Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, K.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., & Munk, D.S. (2002a). On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal*, 94, 12–23. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.0012>
3. Aria, P., & Mirkhani, R. (2005). Methods of Soil Physical Analysis, *Technical Bulletin*, Soil and Water Research Institute, Iran No:479. (In Persian)
4. Basak, N., Mandal, B., Biswas, S., Basak, P., Mitran, T., Saha, B., & Datta, A. (2022). Impact of long term nutrient management on soil quality indices in rice-wheat system of lower indo-gangetic plain. *Sustainability*, 14(11), 6533. <https://doi.org/10.3390/su14116533>
5. Biberdzic, M., Barac, S., Lalevic, D., Djikic, A., Prodanovic, D., & Rajicic, V. (2020). Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(1), 80–89. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000100080>
6. Brar, B.S., Singh, J., Singh, G., & Kaur, G. (2015). Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize–wheat rotation. *Agronomy*, 5(2), 220–238. <https://doi.org/10.3390/agronomy5020220>
7. Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L.C., Cerri, C.E.P., Tormena, C.A., & Cerri, C.C. (2016). A soil management assessment framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, 80, 215–22. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>
8. De Paul Obade, V., & Lal, R. (2016). Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma*, 265, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.023>
9. Doran, J.W., & Parkin, T.B. (1997). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *Methods for assessing soil quality*/editors, John W. Doran and Alice J. Jones; editor-in-chief SSSA, Jerry M. Bigham; managing editor, David M. Kral; associate editor, Marian K. Viney. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c2>
10. Emami, H., Astaraei, A.R., & Fotovat, A. (2014). Evaluating the effect of organic matter on soil quality score functions. *Journal of Water and Soil*, 28(3), 565–574. <https://sid.ir/paper/141916/en>
11. Isong, I.A., John, K., Okon, P.B., Ogban, P.I., & Afu, S.M. (2022). Soil quality estimation using environmental covariates and predictive models: an example from tropical soils of Nigeria. *Ecological Processes*, 11(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s13717-022-00411-y>
12. Kharche, V.K., Patil, S.R., Kulkarni, A.A., Patil, V.S., & Katkar, R.N. (2013). Long-term integrated nutrient management for enhancing soil quality and crop productivity under intensive cropping system on vertisols. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 61(4), 323–332. <https://doi.org/10.5958/0974-0228.2023.00025.7>
13. Karkaj, E., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J., & Shahbazi, F. (2019). Establishing a suitable soil quality index for semi-arid rangeland ecosystems in northwest of Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 648–658. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00065-4>
14. Karlen, D.L., Parkin, T.B., & Eash, N.S. (1996). Use of soil quality indicators to evaluate conservation reserve program sites in Iowa. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality. Methods for Assessing Soil Quality*, 49(1997), 345–355. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c21>
15. Karlen, D.L., Rosek, M.J., Gardner, J.C., Allan, D.L., Alms, M.J., Bezdicek, D.F., Flock, M., Huggins, D.R., Miller, B.S., & Staben, M.L. (1999). Conservation reserve program effects on soil quality indicators. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54(1), 439–444. <https://doi.org/10.1080/00224561.1999.12457260>
16. Li, P., Shi, K., Wang, Y., Kong, D., Liu, T., Jiao, J., & Hu, F. (2019). Soil quality assessment of wheat-maize cropping system with different productivities in China: Establishing a minimum data set. *Soil and Tillage Research*, 190, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.019>
17. Li, P., Wu, M., Kang, G., Zhu, B., Li, H., Hu, F., & Jiao, J. (2020). Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China. *Geoderma*, 373, 114416. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114416>

18. Li, P., Zhang, T., Wang, X., & Yu, D. (2013). Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 126, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011>
19. Liu, J., Wu, L., Chen, D., Li, M., & Wei, C. (2017). Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China. *Applied Soil Ecology*, 113, 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.010>
20. MATLAB R2015b. (2015). Software for technical computing and model-based design. The Math Works Ins, USA.
21. Mirkhani, R. (2020). Investigation of soil quality indices and their spatial variations in agricultural lands of Alborz province Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.1.3>
22. Mirkhani, R., Bybordi, A., Saadat, S., Rezaei, H., & Esmaeelnejad, L. (2024). Evaluation of the soil quality of the lands under irrigated wheat cultivation in Tabriz plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(12), 1981-1994. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363792.669555>
23. Mirkhani, R., Vaezi, A.R., & Rezaei, H. (2020). Investigation of the soil quality indices in irrigated wheat farms of Nazarabad region in west of Alborz province. *Water and Soil*, 34(5), 1125-1139. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i5.85526>
24. Mirkhani, R., Vaezi, A.R., & Rezaei, H. (2021). Spatial distribution of soil quality in Savojbolagh fields in Alborz province. *Applied Soil Research*, 9(2), 1-14. (In Persian with English abstract)
25. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Moradian, S. (2017). Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*, 83, 482-494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.001>
26. Moshiri, F., Shahabi, A.A., Keshavarz, P., Khoghar, Z., FeiziAsl, V., Tehrani, M.M., AsadiRahmani, H., Samawt, S., Ghaibi, M.N., Sedari, M.H., Rashidi, N., Saadat, S., & Khademi, Z. (2014). Guidelines for integrated soil fertility and plant nutrition management of wheat. *Soil and Water Research Institute (SWRI)*. 84 p.
27. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., & Dean, L.A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dept. of Agric. Circ. 939pp.
28. Patzel, N., Sticher, H., & Karlen, D.L. (2000). Soil fertility-phenomenon and concept. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(2), 129-142. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2624\(200004\)163:2%3C129::AID-JPLN129%3E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2624(200004)163:2%3C129::AID-JPLN129%3E3.0.CO;2-D)
29. Paul, G.C., Saha, S., & Ghosh, K.G. (2020). Assessing the soil quality of Bansloi river basin, eastern India using soil-quality indices (SQIs) and Random Forest machine learning technique. *Ecological Indicators*, 118, 106804. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106804>
30. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3), 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>
31. Qin, M.Z., & Zhao, J. (2000). Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. *CTA GEOGRAPHICA SINICA-CHINESE EDITION*, 55(5), 545-554.
32. Sanchez, P.A., & Swaminathan, M.S. (2005). Hunger in Africa: the link between unhealthy people and unhealthy soils. *The Lancet*, 365(9457), 442-444. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(05\)17834-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(05)17834-9)
33. Sun, B., Zhou, S., & Zhao, Q. (2003). Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 115(1), 85-99. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00078-8)
34. Tkaczyk, P., Bednarek, W., Dresler, S., & Krzyszczak, J. (2018). The effect of some soil Physicochemical properties and nitrogen fertilization on winter wheat yield. *Acta Agrophysica*, 25(1), 107-116. <https://doi.org/10.31545/aagr0009>
35. Toledo, D.M., Galantini, J., Dalurzo, H., Vazquez, S., & Bollero, G. (2013). Methods for assessing the effects of land use changes on carbon stocks of subtropical oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, 77(5), 1542-1552. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0087>
36. Torbert, H.A., Krueger, E., & Kurtener, D. (2008). Soil quality assessment using fuzzy modeling. *International Agrophysics*, 22(4), 365-370.
37. Van Leeuwen, J.P., Moraetis, D., Lair, G.J., Bloem, J., Nikolaidis, N.P., Hemerik, L., & de Ruiter, P.C. (2015). Ecological soil quality affected by land use and management on semi-arid Crete. *Soil Discussions*, 2, 187-215. <https://doi.org/10.5194/soild-2-187-2015>
38. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-37.
39. Yanbing, Q., Darilek, J.L., Biao, H., Yongcun, Z., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149, 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>

Effect of Alfalfa Cultivation and Maize-Wheat Rotation on Soil Quality in Semi-arid Agroecosystem

O. Eghbali ¹, H. Emami ^{1*}, R. Khorassani ¹

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: hemami@um.ac.ir)

Received: 04 September 2025

Revised: 08 October 2025

Accepted: 27 October 2025

Available Online: 27 October 2025

How to cite this article:

Eghbali, O., Emami, H., & Khorassani, R. (2025). Effect of alfalfa cultivation and maize-wheat rotation on soil quality in semi-arid agroecosystem. *Journal of Water and Soil*, 39(4), 417-429. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.95221.1498>

Introduction

Agronomic management is a set of field practices that not only influence plant growth and yield but also affect the soil physical, chemical, and biological properties. The selection of the crop species and cropping systems - monoculture or crop rotation, significantly affects soil attributes and plays an important role on enhancing nutrient cycling, increasing organic matter content, reducing erosion, and ultimately promoting the sustainability of agricultural ecosystems. Therefore, an appropriate cropping strategy can be regarded as a key strategy for sustainable soil management. Evaluating soil quality through physical, chemical, and fertility indicators provides a comprehensive understanding of soil status, which is essential for developing effective management strategies and long-term planning for sustainable land use. This study was performed to assess soil quality under alfalfa cultivation and compare it with a maize-wheat rotation in a single cropping season.

Materials and Methods

This study was conducted during the 2020–2021 cropping season at the research farm of Ferdowsi University of Mashhad, located in Khorasan Razavi Province, northeastern Iran. Two adjacent fields with different agronomic management systems were selected: (i) alfalfa (*Medicago sativa* L.) monoculture, which had been continuously cultivated for several years without rotation, and (ii) a maize-wheat (*Zea mays* L.–*Triticum aestivum* L.) rotation system, a typical cereal-based cropping pattern in the region. These two systems were chosen to evaluate the long-term effects of continuous legume cultivation versus crop rotation on soil quality attributes. The experimental design was a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Soil samples were collected after harvesting the crops and were taken from three depths (0–10, 10–20, and 20–30 cm). Eleven soil properties including pH, electrical conductivity (EC), calcium carbonate equivalent (CCE), total nitrogen (TN), available phosphorus (P), available potassium (K), mean weight diameter (MWD) of soil aggregates (both wet and dry methods), soil structure stability index (SI), saturated hydraulic conductivity (Ks), and organic carbon (OC) were measured. The minimum data set (MDS) was identified using principal component analysis (PCA). Subsequently, the soil quality index (SQI) was calculated based on both the total data set (TDS) and MDS.

Results and Discussion

Using MDS approach, the number of soil properties was reduced, and the most important variables were selected. Among the principal components (PCs), only those with eigenvalues greater than one were retained. For both the alfalfa and the maize-wheat rotation, four components explaining more than 80% of the total variance were selected. In the alfalfa, the selected variables included organic carbon, total nitrogen, calcium carbonate equivalent, and MWD of wet and dry sieving. In the maize-wheat rotation, the selected variables included organic



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.95221.1498>

carbon, EC, calcium carbonate equivalent, and MWD under both wet and dry sieving conditions. The observed EC in this rotation system likely reflects the influence of evaporation and fertilization practices on soil salinity. Evaluation of SQI across different soil depths and two agronomic management systems revealed that soils under the alfalfa monoculture exhibited higher quality compared to the maize-wheat rotation, particularly in the surface layer (0–10 cm). These findings emphasize the crucial role of continuous plant cover in maintaining soil organic matter, reducing surface erosion, facilitating nitrogen fixation through rhizobial symbiosis, improving soil aggregate stability, and enhancing soil biological activity in perennial systems such as alfalfa. These processes may improve nutrient availability and foster long-term soil sustainability. Soil depth significantly influenced SQI trends. The decline in SQI with increasing depth in the maize-wheat rotation reflects reduced biological activity and limited nutrient availability in the deep layers, whereas soils in the alfalfa system had relatively higher SQI values even at the deep depths, indicating the potential of deep-rooted legumes to enhance subsoil quality through extended root penetration and associated biological processes.

Conclusion

This study revealed that the alfalfa monoculture considerably enhanced soil quality compared to the maize-wheat rotation, particularly at the soil surface (0–10 cm). The most important soil properties that improved soil quality were OC, TN, CCE, and MWD. The presence of continuous plant cover, biological nitrogen fixation, and reduced tillage in the alfalfa cultivation played vital roles in increasing soil OM, reducing erosion, and improving SI. The application of MDS approach proved to be a reliable, efficient, and cost-effective method for soil quality evaluation. These findings highlight the potential of perennial legume-based systems, such as alfalfa, in enhancing soil quality and sustainability in semi-arid agroecosystems. Long-term monitoring of soil quality under alfalfa monoculture is recommended for sustainable land management.

Keywords: Agronomic management, Rotation, Soil quality index (SQI)

تأثیر کشت یونجه و تناوب ذرت-گندم بر کیفیت خاک در اکرواکوسیستم نیمه خشک

امید اقبالی^۱ ID - حجت امامی^{۱*} ID - رضا خراسانی^۱ ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

چکیده

مدیریت زراعی نقشی کلیدی در حفظ کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی دارد. این پژوهش با هدف مقایسه تأثیر کشت یونجه (سیستم تک کشتی) و ذرت-گندم (تناوب) بر کیفیت خاک در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی ۱۳۹۹-۴۰۰ انجام شد. نمونه‌های خاک از اعماق ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر پس از برداشت محصول، جمع‌آوری و ۱۱ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک (پهش، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم، نیتروژن کل، فسفر قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش‌های تر و خشک، شاخص پایداری ساختمان خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و کربن آلی) اندازه‌گیری و محاسبه شدند. مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تعیین شد و شاخص کیفیت خاک (SQI) با روش‌های مجموعه کل داده‌ها (TDS) و MDS محاسبه گردید. براساس نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای کشت یونجه و تناوب ذرت-گندم، ۴ مؤلفه با مقدار ویژه بزرگتر از یک که بیش از ۸۰ درصد واریانس کل داده‌ها را در برداشتند، انتخاب گردید که برای یونجه، کربن آلی، نیتروژن کل، کربنات کلسیم معادل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت‌های تر و خشک و در مورد تناوب ذرت-گندم، کربن آلی، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت‌های تر و خشک انتخاب شدند. نتایج نشان داد که خاک زیر کشت یونجه در مقایسه با تناوب ذرت-گندم، به‌ویژه در لایه سطحی (۰-۱۰ سانتی‌متر) کیفیت بهتری (رده کیفی II) داشت، درحالی‌که خاک در تناوب ذرت-گندم در رده‌های ضعیف‌تر (III و IV) قرار گرفت. پوشش دائمی خاک، نوع ریشه و تثبیت نیتروژن در یونجه به بهبود مواد آلی و پایداری ساختمان خاک کمک کرد، در صورتی‌که خاک‌ورزی مکرر در تناوب موجب کاهش کیفیت خاک شد. این یافته‌ها بر اهمیت کاشت گیاهان چند ساله برای مدیریت پایدار خاک و افزایش ماده آلی در مناطق نیمه خشک تأکید دارد و همچنین استفاده از MDS روشی کارآمد و جایگزین برای ارزیابی کیفیت خاک است.

واژه‌های کلیدی: تناوب، شاخص کیفیت خاک، مدیریت زراعی

مقدمه

(Shah et al., 2021)، اختلال در چرخه آفات و بیماری‌های گیاه (Zani et al., 2023)، کاهش علف‌های هرز (Otto et al., 2023) و بهبود چرخه عناصر غذایی (Jin et al., 2024) به بهبود سلامت خاک کمک می‌کند. در مقابل، سیستم تک کشتی بر پایه کشت مداوم یک گیاه استوار است که به دلیل پوشش دائمی خاک باعث بهبود پایداری خاک در درازمدت می‌شود اما کاهش تنوع عناصر غذایی را به همراه دارد (Bowles et al., 2020). شاخص کیفیت خاک^۲ ابزاری برای اندازه‌گیری و پایش سلامت

مدیریت زراعی شامل خاک‌ورزی، تناوب زراعی، مدیریت تغذیه، ماده آلی، آبیاری و سیستم‌های مالچ‌پاشی خاک است (Al-Shammary et al., 2024) که با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، در حفظ کیفیت خاک، پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی و حفاظت از محیط‌زیست نقش اساسی دارد (Sepaskhah, 2016). تناوب زراعی شامل کاشت گونه‌های مختلف گیاهان زراعی است که با افزایش مواد آلی و کاهش فرسایش خاک

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(Email: hemami@um.ac.ir)
(*) نویسنده مسئول:

خاک در طول زمان است (Dambia et al., 2024) که با بررسی ویژگی‌هایی مانند بافت، ماده آلی، پ هاش، فعالیت میکروبی و دسترسی به عناصر غذایی تصویری جامع از وضعیت خاک ارائه می‌دهد (Chaudhry et al., 2024). شاخص کیفیت خاک نه تنها وضعیت فعلی خاک را منعکس می‌کند بلکه می‌تواند اثرات بالقوه روش‌های مختلف کشاورزی بر سلامت بلندمدت خاک را نیز نشان دهد. به این ترتیب، شاخص کیفیت خاک می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مدیریت پایدار اراضی عمل کرده و به بهینه‌سازی هم‌زمان بهره‌وری کشاورزی و تعادل زیست‌محیطی کمک نماید (Cherubin et al., 2016).

انتخاب ویژگی‌هایی از خاک که به بهترین وجه وضعیت کیفیت خاک را نشان دهند، بسیار مهم است. به‌طور کلی مجموعه‌های متفاوتی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای تعیین شاخص کیفیت خاک معرفی شده‌اند که شاخص کیفیت خاک را بر اساس مجموعه کل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک^۱ تعیین می‌کنند (Emami et al., 2014; Aparicio et al., 2007). برای سهولت اندازه‌گیری شاخص کیفیت خاک، تعداد محدودتری از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک به عنوان مجموعه حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک^۲ پیشنهاد شد که ضمن داشتن همبستگی زیاد با مجموعه کل داده‌ها، موجب سهولت اندازه‌گیری شاخص کیفیت خاک و کاهش هزینه نیز می‌شود (Govaerts et al., 2006). قائمی و همکاران (Ghaemi et al., 2013). کفه و همکاران (Kafe et al., 2022) با بررسی کیفیت خاک زیرکشت تناوب گندم-ذرت و همچنین خاک زیرکشت گندم، نتیجه گرفتند استفاده از MDS برای محاسبه کیفیت خاک مانند TDS، ارزیابی دقیقی از SQI ارائه می‌دهد. سامی و همکاران (Samaei et al., 2022) با بررسی ۱۸ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی در عمق ۲۰-۵۰ سانتی‌متر خاک به عنوان TDS تعیین ۱۰ ویژگی به عنوان MDS در اراضی زیرکشت گندم و مرتع، ضمن تأیید همبستگی مثبت بین MDS و TDS با شاخص کیفیت خاک، کاهش کیفیت خاک اراضی زیر کشت گندم را در مقایسه با مرتع به دلیل کاهش کربن آلی، کاهش تعداد باکتری و فشردگی خاک گزارش کردند. دی و همکاران (De et al., 2022) اراضی کشاورزی، جنگل و تبدیلی (از جنگل به کشاورزی) را از نظر شاخص کیفیت خاک بررسی و بیان کردند که خاک‌های جنگلی به دلیل تجمع مواد آلی و عدم دخالت انسانی، بیشترین مقدار کربن آلی، پایداری خاکدانه و فعالیت میکروبی را نسبت به اراضی کشاورزی و تبدیلی داشت. بیشترین مقدار شاخص کیفیت خاک مربوط به جنگل، اراضی تبدیلی و در نهایت زمین کشاورزی بود. شخم بیش از حد، تناوب‌های زراعی فاقد حبوبات و کشت گیاهان پرمصرف از علل کاهش کیفیت خاک

زمین کشاورزی عنوان شد. صادقیان و همکاران (Sadeghian et al., 2018) با مقایسه سیستم تک کشتی گندم، تناوب گندم-ماش و مدیریت بقایا بر سلامت خاک، گزارش کردند که سیستم تک کشتی منجر به افزایش معنی‌دار پ هاش و شوری خاک شد. تناوب زراعی بر مواد آلی، تنفس میکروبی و کربن فعال خاک نسبت به سیستم تک کشتی اثر مثبت داشت. شالیکار و همکاران (Shalika et al., 2009) بیان کردند کیفیت خاک در تناوب برنج-باقلا و شبدر نسبت به سیستم تک کشتی برنج به دلیل بهبود شاخص‌های کیفیت خاک شامل ماده آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری خاک، مقدار تنفس میکروبی و میزان کربن توده زنده میکروبی افزایش نشان داد. ثروتی (Servati, 2019) بهبود کیفیت خاک زیرکشت برنج در عمق ۵۰-۰ سانتی‌متر در تناوب با خانواده بقولات (شبدر) به دلیل افزایش معنی‌دار ویژگی‌های خاک شامل ماده آلی، تنفس میکروبی، کربن توده زنده میکروبی، ظرفیت تبادل کاتیونی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت به سیستم تک کشتی برنج و تناوب برنج-گندم را گزارش نمود.

در مورد مدیریت زراعی و نقش آن بر کیفیت خاک به سهیم سیستم کاشت (تک کشت یا تناوب) گیاهان با سیستم‌های ریشه‌ای متفاوت کمتر پرداخته شده است. همچنین عمده پژوهش‌های انجام شده در مورد کیفیت خاک در لایه سطحی خاک متمرکز بوده است (عمدتاً ۰-۱۰ سانتی‌متر). در صورتی که بیشتر ویژگی‌های خاک مانند کربن آلی، پایداری خاکدانه‌ها و ... با عمق تغییر می‌کنند. بنابراین، با توجه به اهمیت گیاهان در کشاورزی پایدار و کیفیت خاک و با در نظر گرفتن عمق خاک، پژوهشی با هدف بررسی تأثیر سیستم تک کشتی یونجه و تناوب ذرت-گندم بر کیفیت خاک در عمق‌های متفاوت انجام شد.

مواد و روش‌ها

مکان پژوهش

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد (۲۳° ۴۰' ۵۹" شرقی و ۱۸° ۱۴' ۳۶" شمالی) در دو قطعه زمین مجاور هم با بافت لوم سیلتی انجام شد. اقلیم منطقه خشک و نیمه خشک با میانگین دمای سالانه ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد و بارندگی سالانه ۹۲/۴ میلی‌متر بود. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و آب آبیاری قبل از کاشت تعیین شدند (جداول ۱ و ۲).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل مطالعه

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil of study site

کربن آلی	پتاسیم قابل استفاده	فسفر قابل استفاده	نیترژن کل	هدایت الکتریکی	په‌اش	کلاس بافت خاک
OC	K	P	N	EC	pH	Soil texture class
%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	dS m ⁻¹	-	-
0.37	1.25	0.50	0.055	0.80	8.54	Silt loam

جدول ۲- برخی ویژگی‌های آب آبیاری

Table 2- Some irrigation water properties

نسبت جذب سدیم	بی‌کربنات	کربنات	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم	هدایت الکتریکی	په‌اش	منبع
SAR	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	K	Na	Mg	Ca	EC	pH	Source
-	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	dS m ⁻¹	-	-
1.50	2.60	0.10	0.12	2.92	2.96	4.64	0.72	8.1	چاه

پتاسیم قابل استفاده خاک به روش استات آمونیوم (Carter & Gregorich, 2007) اندازه‌گیری شدند.

بافت خاک به روش پدیت (Gee & Bauder, 1986) و برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک (MWD) به روش تر و خشک، از مجموعه‌ای از الک‌ها با قطرهای ۴، ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر استفاده شد (Van Bavel, 1949). خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند و پس از توزین و تصحیح شن، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر دو حالت مرطوب و خشک با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد.

$$MWD = \sum (X_i \times W_i) \quad (1)$$

در معادله (۱)، X_i میانگین قطر منافذ دو الک متوالی را نشان می‌دهد و W_i نشان‌دهنده نسبت جرمی توده خاک باقی‌مانده در هر الک به کل جرم خاک پس از اصلاح شن است. شاخص پایداری ساختمان خاک (SI) که برای ارزیابی ساختمان در خاک‌های کشت شده به کار می‌رود، بر اساس معادله ۲ و متغیرهای در صد کربن آلی (OC)، رس (Clay) و سیلت (Silt) تعیین شد (Pieri, 1992).

$$SI = \frac{1/724 \times OC}{Silt + Clay} \times 100 \quad (2)$$

مقدار SI برابر با ۵ در صد یا کمتر نشان‌دهنده تخریب ساختمان خاک ناشی از کاهش قابل توجه در مقدار کربن آلی خاک است. اگر $5 \leq SI \leq 7$ باشد، خطر بالای تخریب ساختمان خاک به دلیل محتوای کربن آلی ناکافی را نشان می‌دهد. اگر مقدار $9 \leq SI \leq 7$ باشد، نشان‌دهنده خطر نسبتاً پایین تخریب ساختمان خاک است. نهایتاً اگر مقدار SI بیش از ۹ درصد باشد، نشان‌دهنده وجود مقدار کافی کربن آلی در خاک است که پایداری ساختمان خاک را تضمین می‌کند (Reynolds et al, 2009).

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) در نمونه‌های دست نخورده (در لوله‌های پلی‌اتیلنی با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) به روش بار ثابت

طرح آزمایشی و عملیات میدانی

آزمایش در دو قطعه زمین با مدیریت زراعی متفاوت (تک‌کشتی یونجه و تناوب ذرت-گندم) با طرح آزمایشی بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. قبل از کاشت گیاهان عملیات خاک‌ورزی انجام و بستر کاشت آماده شد. گیاهان گندم (*T. aestivum* L.) و یونجه (*Medicago sativa* L.) واریته ۱۲۸۰ و یونجه (*Zea mays*) واریته ۱۳۹۹ جهت کاشت انتخاب شدند. بذر یونجه به صورت ردیفی در شهریور ۱۳۹۹ کشت شدند. گندم و ذرت نیز به صورت ردیفی کشت شدند. یونجه در شهریور ۱۳۹۹ کشت شد. ذرت در اواخر اردیبهشت ۱۳۹۹ کشت و در پاییز برداشت شد و سپس عملیات خاک‌ورزی انجام شده و گندم در اواخر مهر کشت و در اواخر خرداد ۱۴۰۰ برداشت گردید. پس از برداشت، نمونه‌های خاک از ۳ عمق ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متر از هر دو قطعه زمین و در سه تکرار برداشت شدند. شایان ذکر است که یونجه به مدت ۶ سال و ذرت و گندم نیز به مدت ۳ سال در زمین‌های مذکور کشت شده بود.

اندازه‌گیری و محاسبه برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک

ویژگی‌های خاک شامل کربنات کلسیم معادل خاک با استفاده از روش تیتراسیون برگشتی با سود (NaOH) تعیین شد (Sims, 1996). ماده آلی خاک به روش اکسایش تر (Walkley & Black, 1934) اندازه‌گیری شد. pH در گل اشباع با دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع با دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1996). فسفر قابل استفاده خاک به روش اولسن (Olsen & Sommers, 1986) و استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر، نیترژن کل خاک با کج‌لدال (Bremner & Mulvaney, 1983) و

تعیین شد. معادله (۳)، برای تعیین K_s استفاده شد (Klute & Dirksen, 1986).

$$K_s = \frac{V \times L}{\Delta H \times A \times t} \quad (3)$$

در این معادله، V ، L ، ΔH ، A و t به ترتیب نشان دهنده حجم آب خروجی از ستون خاک، ارتفاع ستون خاک، اختلاف پتانسیل هیدرولیکی دو سر ستون خاک، سطح مقطع ستون خاک و مدت زمان رسیدن به تعادل است.

تعیین شاخص کیفیت خاک شامل سه مرحله کلیدی است: (۱) تعریف یک مجموعه حداقل داده (۲) تخصیص امتیاز به هر شاخص با استفاده از توابع ریاضی (خطی یا غیرخطی) و (۳) یکپارچه سازی داده ها در یک شاخص ترکیبی (Karlen et al., 2003).

در ابتدا شاخص کیفیت خاک با استفاده از کل مجموعه داده ها^۲ در هر عمق خاک برای ۱۱ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک که به فعالیت های مدیریتی حساس بودند، محاسبه شد. سپس تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) برای شناسایی مؤلفه های اصلی (PCs) و مقادیر ویژه (EVs) به کار گرفته شد (Andrews et al., 2002; Doran & Parkin, 1994). برای هر مؤلفه با مقدار ویژه بزرگ تر از یک، متغیرهایی با بالاترین ضرایب بارگذاری انتخاب شدند و متغیرهایی که اختلاف ۱۰ درصدی با بالاترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه داشتند، به عنوان مجموعه MDS انتخاب شدند. شاخص کیفیت خاک با استفاده از مجموعه حداقل داده ها (MDS) و مجموعه کل داده ها (TDS) تعیین شدند.

برای بیان شاخص های مؤثر بر کیفیت خاک به صورت یک شاخص کلی از توابع استاندارد امتیازدهی خطی بر اساس مقادیر حداقل و حداکثر اندازه گیری شده استفاده شد. مقادیر حداقل و حداکثر متغیرها به ترتیب به عنوان حد پایین و حد بالای شاخص ها در نظر گرفته شدند. براساس این روش، ویژگی های مختلف خاک از سه نوع تابع پیروی می کنند: (۱) تابعی که در آن مقادیر بیشتر برای ویژگی های خاک باعث بهبود کیفیت خاک می شود (مانند کربن آلی) (Andrews et al., 2002; ۲) تابعی که در آن مقادیر کمتر برای ویژگی های خاک موجب افزایش کیفیت خاک می شود (مانند هدایت الکتریکی) (Doran & Parkin, 1994) و (۳) تابعی بهینه برای ویژگی هایی که مقادیر بالاتر یا پایین تر از محدوده بهینه (مانند pH)، کیفیت خاک را کاهش می دهد (Kafe et al., 2022; Fox & Metla, 2005).

برای وزن دهی به شاخص ها نسبت سهم هر شاخص به مجموع کل مقادیر سهم مجموعه های داده های کل (TDS) و حداقل (MDS) استفاده شد (Shukla et al., 2006). شاخص کیفیت یکپارچه خاک (IQI)^۳ بر اساس معادله (۴) محاسبه شد (Doran & Parkin, 1994).

(1994).

$$IQI_w = \sum_{i=1}^n w_i N_i \quad (4)$$

در رابطه ۴؛ N_i نشان دهنده امتیاز هر عامل، w_i وزن تعیین شده برای هر عامل و n تعداد معیارها را نشان می دهد. داده ها با نرم افزار SPSS (نسخه ۲۶) تحلیل و میانگین ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

یازده ویژگی فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک که به فعالیت های زراعی و مدیریتی حساس هستند به عنوان مجموعه کل داده ها (TDS) انتخاب شدند. این ویژگی ها شامل: pH، هدایت الکتریکی (EC)، کربن آلی (OC)، کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، نیتروژن کل (N)، فسفر قابل استفاده (P)، پتاسیم قابل استفاده (K)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، شاخص پایداری ساختمان خاک (SI)، میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک (MWD_{dry}) و میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت مرطوب (MWD_{wet}) هستند (جدول ۳). برای انتخاب حداقل ویژگی های مؤثر (MDS) بر کیفیت خاک از تجزیه به مؤلفه اصلی (PCA) استفاده شد.

انتخاب حداقل داده به روش PCA

نتایج تجزیه به مؤلفه های اصلی ویژگی های خاک یونجه و تناوب ذرت-گندم در **جدول ۴** و **۵** آمده است. با تعیین حداقل ویژگی های مؤثر (MDS)، تعداد ویژگی های خاک کاهش یافت و ویژگی های مؤثر انتخاب شدند. از بین PC های به دست آمده فقط آن هایی که مقدار ویژه بزرگ تر از یک داشتند، انتخاب شدند که برای یونجه و تناوب ذرت-گندم، ۴ مؤلفه که بیش از ۸۰ درصد واریانس کل داده ها را در بردارند، انتخاب شدند.

جدول ۴ تجزیه به مؤلفه های اصلی خاک زیرکشت یونجه را نشان می دهد. در مؤلفه اول ویژگی های OC و N بیشترین مقدار را داشتند که اختلاف آن ها کمتر از ۱۰ درصد بود. در مؤلفه دوم $CaCO_3$ ، مؤلفه سوم MWD_{wet} و در مؤلفه چهارم MWD_{dry} بیشترین مقادیر را داشتند که انتخاب شده و MDS نهایی یونجه را تشکیل دادند. در مورد تناوب ذرت-گندم مؤلفه اول شامل EC، OC و N بیشترین مقادیر را داشتند که اختلاف آن ها کمتر از ۱۰ درصد بود. همبستگی بین این ویژگی ها محاسبه شد تا ویژگی دارای بیشترین ضریب واریانس انتخاب شود که در نهایت N حذف شد و OC و EC انتخاب شدند. در مؤلفه دوم $CaCO_3$ ، مؤلفه سوم MWD_{dry} و در

نهایت در مؤلفه چهارم MWD_{wet} انتخاب شدند (جدول ۵).

ارزیابی وزن ها برای مجموعه کل داده ها (TDS) و حداقل داده ها (MDS)

سهم هر ویژگی حاصل از تحلیل عاملی (FA) در دو مجموعه کل داده (TDS) و مجموعه حداقل داده (MDS) برای دو مدیریت (تک کشتی گیاه یونجه و دو کشتی تناوب ذرت-گندم) در جدول ۶ و ۷ آورده شده است. در هر دو نوع مدیریت زراعی، شاخص های کربن آلی، نیتروژن کل، کربنات کلسیم و میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در حالت خشک و تر دارای بیشترین سهم و وزن نسبی در مدل MDS بودند؛ به گونه ای که بیشترین بار اطلاعاتی و نقش در تبیین کیفیت خاک را به خود اختصاص دادند. در مدل TDS نیز همین شاخص ها در کنار دیگر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مانند pH، EC، فسفر قابل استفاده و هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) وارد محاسبات شدند، اما سهم آن ها نسبت به شاخص های انتخاب شده در MDS کمتر بود.

طبقه بندی شاخص کیفیت خاک

کیفیت خاک دو مدیریت متفاوت زراعی در جدول ۹ آورده شده است. طبقه بندی کیفیت خاک براساس کلاس بندی کی و همکاران (Qi et al., 2009) ارزیابی شد (جدول ۸). طبق این طبقه بندی، درجه کیفی I نشان دهنده مناسب ترین حالت خاک برای رشد گیاه است. درجه II کیفیت مناسب خاک برای رشد گیاه را نشان می دهد، اما برخی محدودیت ها برای رشد وجود دارد. درجه III نشان دهنده محدودیت شدیدتر نسبت به درجه II است و درجه کیفی IV نشان دهنده محدودیت های شدید برای رشد گیاهان است.

جدول ۳- میانگین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک زیر کشت تناوب (ذرت-گندم) و یونجه

Table 3- Average amounts of physical and chemical properties of the soil under rotation crops (maize-wheat) and alfalfa

ویژگی خاک Soil properties	واحد Unit	یونجه Alfalfa			تناوب Rotation		
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
پهش	-	7.50	7.75	7.62	7.34	7.55	7.46
pH							
هدایت الکتریکی	dS m ⁻¹	0.41	0.60	0.83	0.95	1.40	1.35
EC							
کربن آلی	%	1.70	0.90	0.55	0.49	0.35	0.35
OC							
کربنات کلسیم	%	6.15	6.60	5.90	13.00	10.55	12.80
CaCO ₃							
نیتروژن کل	%	0.07	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
N							
فسفر قابل استفاده	mg Kg ⁻¹	5.00	2.00	2.20	8.00	7.58	7.00
P							
پتاسیم قابل استفاده	mg Kg ⁻¹	24.00	19.20	17.59	37.14	30.00	28.50
K							
هدایت هیدرولیکی اشباع	cm min ⁻¹	1.45	0.70	0.40	0.40	0.34	0.23
Ks							
شاخص پایداری ساختمان	%	1.55	0.70	0.75	1.21	0.91	0.84
SI							
میانگین وزنی قطر خاکدانه (خشک)	mm	2.00	1.51	1.25	2.24	2.15	2.52
MWD_{dry}							
میانگین وزنی قطر خاکدانه (تر)	mm	0.54	0.26	0.14	0.12	0.18	0.08
MWD_{wet}							

جدول ۴- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک زیرکشت یونجه

Table 4- Results of principal component analysis of soil properties under alfalfa cultivation

	PC1	PC2	PC3	PC4
مقدار ویژه	4.350	2.600	1.750	1.100
Eigen values				
واریانس (%)	39.545	23.636	15.909	9.999
Variance (%)				
درصد تجمعی (%)	39.545	63.181	79.090	89.089
Cumulative variance				
پ‌هاش	0.420	0.180	-0.110	0.200
pH				
هدایت الکتریکی	-0.680	-0.220	0.140	-0.100
EC				
کربن آلی	0.800	0.100	-0.050	0.050
OC				
کربنات کلسیم	0.100	0.780	0.180	-0.120
CaCO ₃				
نیتروژن کل	0.760	-0.120	0.100	0.080
N				
فسفر قابل استفاده	0.540	0.240	0.220	0.150
P				
پتاسیم قابل استفاده	-0.180	-0.600	0.100	-0.100
K				
شاخص پایداری ساختمان خاک	0.650	-0.250	-0.100	0.250
SI				
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.350	-0.420	-0.150	-0.200
Ks				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	0.400	-0.150	-0.580	-0.520
MWD _{dry}				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر	0.300	-0.180	-0.640	-0.480
MWD _{wet}				

PC: ترکیب اصلی

نیز مقدار شاخص کیفیت خاک برای خاک زیرکشت گندم را ۰/۳۰۶ و ۰/۲۶۶ (به ترتیب برای TDS و MDS) به دست آوردند (رده IV) که مهمترین دلیل آن کاهش کربن آلی خاک بیان کرد. رضائی و همکاران (Ramezani et al., 2016) کمبود مواد آلی، کاهش تخلخل تهویه‌ای، افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک و تراکم ناشی از تردد ادوات کشاورزی را در کاهش کیفیت خاک مؤثر دانستند. بر اساس نتایج رنجبر و همکاران (Ranjbar et al., 2015) هفت ویژگی خاک شامل کربنات کلسیم، آهن، روی، درصد شن، درصد کربنات کلسیم معادل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و منگنز نقش بسزایی در کیفیت خاک مزارع زیر کشت زعفران در منطقه قاین داشتند (Ranjbar et al., 2015) و کیفیت خاک‌های زیرکشت زعفران در منطقه قائن در کلاس III و IV قرار داشتند (Ranjbar et al., 2016).

نتایج ارزیابی شاخص کیفیت خاک (SQI) در عمق‌های مختلف خاک و تحت دو مدیریت زراعی متفاوت نشان داد که خاک در سیستم تک‌کشتی یونجه در مقایسه با تناوب ذرت-گندم به‌ویژه در لایه سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متر) از کیفیت بالاتری برخوردار است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص کیفیت خاک (SQI) با استفاده از روش‌های TDS و MDS نشان داد که مدیریت تک‌کشتی یونجه در مقایسه با تناوب ذرت-گندم اثرات بهتری بر بهبود کیفیت خاک داشته است. در عمق سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متر)، شاخص کیفیت خاک در مدیریت یونجه بر اساس هر دو روش محاسبه در رده II (کیفیت خوب) قرار گرفت، در حالی که کیفیت خاک در همین عمق در تناوب ذرت-گندم در روش TDS در رده III و در روش MDS در رده IV (ضعیف) طبقه‌بندی شد. سمایی و همکاران (Samaei et al., 2022)

جدول ۵- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک تناوب ذرت-گندم
Table 5- Results of principal component analysis of soil properties under maize-wheat rotation

	PC1	PC2	PC3	PC4
مقدار ویژه	4.050	2.800	1.650	1.200
Eigen values				
واریانس (%)	36.818	25.455	15.000	10.909
Variance (%)				
درصد تجمعی (%)	36.818	62.273	77.273	88.182
Cumulative variance				
پ‌هاش	0.500	0.150	-0.100	0.120
pH				
هدایت الکتریکی	-0.740	-0.100	0.120	-0.080
EC				
کربن آلی	0.720	0.200	-0.100	0.040
OC				
کربنات کلسیم	0.180	0.750	0.120	-0.200
CaCO ₃				
نیتروژن کل	0.700	-0.180	0.080	0.100
N				
فسفر قابل استفاده	0.480	0.300	0.280	0.120
P				
پتاسیم قابل استفاده	-0.140	-0.570	0.350	0.100
K				
شاخص پایداری ساختمان خاک	0.620	-0.300	-0.150	0.220
SI				
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.300	-0.480	-0.220	-0.150
Ks				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	0.420	-0.100	-0.600	-0.480
MWD _{dry}				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر	0.380	-0.120	-0.580	-0.500
MWD _{wet}				

PC: مؤلفه اصلی

سطحی خاک متمرکزند. در زمین‌های زراعی با افزایش عمق، مقادیر عناصر غذایی پرمصرف کاهش می‌یابد که علت آن را به جذب توسط گیاهان، آبشویی و فرسایش نسبت می‌دهند (Malo et al., 2005). در تناوب ذرت-گندم کاهش شدیدتر شاخص کیفیت در اعماق متفاوت بیانگر حساسیت بیشتر خاک زیرکشت نسبت به کاهش کیفیت خاک در غیاب مدیریت‌های حفاظتی مؤثر است. مقایسه بین مدل‌های TDS و MDS نشان داد که اگرچه مدل TDS به دلیل استفاده از داده‌های بیشتر دارای جزئیات بیشتری است اما مدل MDS با بهره‌گیری از حداقل شاخص‌های کلیدی (OC, N, CaCO₃، MWD_{dry} و MWD_{wet})، قادر به ارائه نتایجی با دقت قابل قبول است. براساس محاسبه شاخص کیفیت خاک به دو روش TDS و MDS مشخص شد که نوع مدیریت زراعی نقش مؤثری بر سطح کیفیت خاک دارد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که حفظ پوشش گیاهی چندساله و عدم برهم‌زدن مکرر خاک، کلید حفظ و ارتقاء کیفیت خاک در اراضی زراعی مناطق نیمه خشک محسوب می‌شود.

این نتایج بیانگر نقش مؤثر پوشش دائمی گیاهی و بازگشت بقایای گیاهی در حفظ مواد آلی، کاهش فرسایش سطحی، تثبیت نیتروژن توسط باکتری‌های ریزوبیومی، بهبود پایداری خاکدانه‌ها و افزایش فعالیت‌های زیستی خاک در سیستم‌های تک‌کشتی گیاهان چندساله مانند یونجه است (Qi et al., 2023; Yang et al., 2019). درمقابل، کیفیت خاک در تناوب ذرت-گندم در محدوده کیفیت ضعیف برای TDS و MDS قرار گرفت، که این کاهش کیفیت خاک را می‌توان به عملیات خاک‌ورزی بیشتر، برداشت بقایای گیاهی و مواد آلی کمتر در این نظام زراعی نسبت داد که سبب تضعیف ساختمان خاک و کاهش فعالیت‌های میکروبی در خاک می‌شود. همچنین نوسان در ساختمان خاک با تغییرات رطوبتی ناشی از تنوع کشت می‌تواند منجر به تضعیف ویژگی‌های فیزیکی خاک گردد (Ghaemi et al., 2013).

با افزایش عمق، کاهش تدریجی در مقادیر شاخص کیفیت خاک مشاهده شد که روندی طبیعی و مورد انتظار است، زیرا فرآیندهای بیولوژیکی، تجمع مواد آلی و تأثیرات مدیریتی بیشتر در لایه‌های

جدول ۶- تخمین سهم و ارزش هر شاخص کیفیت خاک با استفاده از روش‌های کل داده و حداقل داده در کشت یونجه
 Table 6- Estimated communality and weight values of each soil quality indicator in TDS and MDS in alfalfa

	TDS		MDS	
	سهم Communality	وزن Loading	سهم Communality	وزن Loading
پ‌هاش	0.682	0.067	-	-
pH				
هدایت الکتریکی	0.548	0.054	-	-
EC				
کربن آلی	0.755	0.074	0.768	0.209
OC				
کربنات کلسیم	0.625	0.061	0.642	0.175
CaCO ₃				
نیتروژن کل	0.665	0.065	0.677	0.184
N				
فسفر قابل استفاده	0.574	0.056	-	-
p				
پتاسیم قابل استفاده	0.532	0.052	-	-
K				
شاخص پایداری ساختمان خاک	0.595	0.059	-	-
SI				
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.580	0.057	-	-
ks				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	0.635	0.063	0.641	0.174
MWD _{dry}				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر	0.532	0.052	0.536	0.146
MWD _{wet}				

جدول ۷- تخمین سهم و ارزش هر شاخص کیفیت خاک با استفاده از روش‌های کل داده و حداقل داده در تناوب ذرت-گندم
 Table 7- Estimated communality and weight values of each soil quality indicator in TDS and MDS in maize-wheat rotation

	TDS		MDS	
	سهم Communality	وزن Loading	سهم Communality	وزن Loading
پ‌هاش	0.702	0.069	-	-
pH				
هدایت الکتریکی	0.573	0.056	-	-
EC				
کربن آلی	0.782	0.077	0.790	0.212
OC				
کربنات کلسیم	0.648	0.064	0.658	0.176
CaCO ₃				
نیتروژن کل	0.698	0.069	0.682	0.183
N				
فسفر قابل استفاده	0.589	0.058	-	-
p				
پتاسیم قابل استفاده	0.519	0.051	-	-
K				
شاخص پایداری ساختمان خاک	0.612	0.060	-	-
SI				
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.588	0.058	-	-
ks				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	0.661	0.065	0.665	0.178
MWD _{dry}				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر	0.541	0.053	0.543	0.146
MWD _{wet}				

جدول ۸- معیارهای تقسیم‌بندی درجه کیفیت خاک در روش‌های مختلف
Table 8- Criteria for soil quality grade divisions in different methods

مدل شاخص کیفیت خاک	روش	درجه کیفی خاک			
Soil quality index model	Indicator method	Soil quality grade			
		I	II	III	IV
IQI	TDS	$IQI_{TDS} \geq 0.76$	$0.76 > IQI_{TDS} \geq 0.66$	$0.66 > IQI_{TDS} \geq 0.56$	$0.56 > IQI_{TDS}$
	MDS	$IQI_{MDS} \geq 0.78$	$0.78 > IQI_{MDS} \geq 0.68$	$0.68 > IQI_{MDS} \geq 0.58$	$0.58 > IQI_{MDS}$

جدول ۹- طبقه‌بندی کیفیت خاک برای مدیریت تک کشتی (یونجه) و تناوب (ذرت-گندم)

Table 9- Classification of soil quality in monoculture (alfalfa) and rotation (maize-wheat) management

	عمق خاک Soil depth (cm)	MDS	درجه کیفیت خاک	
			TDS	درجه کیفیت خاک Soil quality grade
تک کشتی (یونجه) Monoculture (alfalfa)	0-10	0.763	0.728	II
	10-20	0.606	0.598	III
	20-30	0.545	0.538	IV
	0-10	0.541	0.589	III
تناوب ذرت-گندم Rotation (maize-wheat)	10-20	0.470	0.497	IV
	20-30	0.435	0.463	IV

نتیجه‌گیری

فرسایش، و بهبود پایداری خاک کمک کرد درحالی که خاک‌ورزی مکرر و برداشت بقایای گیاهی در تناوب ذرت-گندم به کاهش کیفیت خاک منجر شد.

نتایج این پژوهش بر اهمیت انتخاب سیستم‌های زراعی پایدار برای حفظ سلامت خاک در مناطق نیمه‌خشک تأکید دارد. کاشت یونجه به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود کیفیت خاک و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک ایران پیشنهاد می‌شود. استفاده از مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) نیز به‌عنوان روشی کارآمد و کم‌هزینه برای ارزیابی کیفیت خاک می‌تواند در مدیریت دقیق اراضی کشاورزی به کار گرفته شود. این یافته‌ها راهنمایی برای کشاورزان و سیاست‌گذاران در راستای ارتقای مدیریت پایدار خاک و دستیابی به اهداف امنیت غذایی و حفاظت محیط‌زیست ارائه می‌دهد.

این مطالعه نشان داد که مدیریت زراعی با سیستم تک‌کشتی یونجه در مقایسه با تناوب ذرت-گندم، به‌ویژه در لایه سطحی خاک (۰-۱۰ سانتی‌متر)، کیفیت خاک را به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد. شاخص کیفیت خاک (SQI) در سیستم تک‌کشتی یونجه، با استفاده از مجموعه کل داده‌ها (TDS) و همچنین مجموعه حداقل داده‌ها (MDS)، در رده کیفی خوب (II) قرار گرفت، در حالی که تناوب ذرت-گندم در رده‌های ضعیف‌تر (III و IV) طبقه‌بندی شد. ویژگی‌های کلیدی مانند کربن آلی، نیتروژن کل، کربنات کلسیم، و پایداری خاکدانه‌ها (MWD_{dry} و MWD_{wet}) نقش اصلی در تبیین کیفیت خاک داشتند. پوشش دائمی گیاهی، تثبیت نیتروژن توسط ریزوبیوم‌ها و کاهش خاک‌ورزی در سیستم یونجه، به حفظ مواد آلی، کاهش

References

- Al-Shammery, A.A.G., Al-Shihmani, L.S.S., Fernandez-Galvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impact on soil attributes. *Journal of Environmental Management*, 364, 121487, 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121487>
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., & Mitchell, J.P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in north California. *Agriculture Ecosystems, Environment*, 90(1), 25-45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Aparicio, V., & Costa, J.L. (2007). Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research*, 96, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.05.006>
- Bowles, T.M., Mooshammer, M., Socolar, Y., Calderon, F., Cavigelli, M.A., Culman, S.W., Deen, W., Drury, C.F., Garcia, A.G., Gaudin, A.C.M., Harkcom, W.S., Lehman, R.M., Osborne, Sh.L., Robertson, G.Ph., Salerno, J., Schmer, M.R., Srstock, J., & Grandy, A.S. (2020). Long-term evidence shows that crop-rotation diversification increases agricultural resilience to adverse growing conditions in north America. *One Earth*, 2(3), 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>
- Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1983). Nitrogen-total. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and*

- microbiological properties*, 9, 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
6. Carter, M.R., & Gregorich, E.G. (Eds.). (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
 7. Chaudhry, H., Vasava, H.B., Chen, S., Saurette, D., Beri, A., Gillespie, A., & Biswas, A. (2024). Evaluation the soil quality index using three methods to assess soil fertility. *Sensors*, 24(3), 864. <https://doi.org/10.3390/s24030864>
 8. Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Cerri, C.E.P., Franco, A.L.C., Tormena, C.A., Davies, C.A., & Cerri, C.C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *Plos ONE*, 11(3), e0150860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
 9. Dambia, W.A.F., Gathenya, J.M., Raude, J.M., & Home, P.G. (2024). Soil quality index (SQI) for evaluating the sustainability status of Kakia-Esamburmbur catchment under three different land use types in Narok county, Kenya. *Heliyon*, 10(5), e25611. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25611>
 10. De, P., Deb, S., Deb, D., Chakraborty, S., Santra, P., Dutta, P., Hoque, A., & Choudhury, A. (2022). Soil quality under different land uses in eastern India: evaluation by using soil indicators and quality index. *Plos One*, 17(9), 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275062>
 11. Doran, J.W., & Parkin, T.B. (1994). Defining, assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds), *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA, pp. 3-21. Special Publication. Number 35. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35>
 12. Emami, H., Astaraei, A.R., & Fotovat, A. (2014). Evaluating the effect of organic matter on soil quality score functions. *Journal of Water and Soil*, 28(3), 565-574. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.22840>
 13. Fox, G.A., & Metla, R. (2005). Soil property analysis using principal components analysis, soil line, regression models. *Soil Science Society of America Journal*, 69(6), 1782-1788. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0362>
 14. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Methods of Soil Analysis, part 1, physical and mineralogical methods. *Soil Science Society of America, American Society of Agronomy*. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
 15. Ghaemi, M., Astaraei, A.R., Sanaeinejad, S.H., Nassiri Mahalati, M., & Emami, H. (2013). Chemical quality assessment of wheat-maize cultivated soil by using soil quality models in an agricultural region of southeast Mashhad. *Journal of Soil Research*, 27(4), 463-473. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.4067/s0718-95162014005000077>
 16. Govaerts, B., Sayre, K.D., & Deckers, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil & Tillage Research*, 87, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.005>
 17. Jin, X., Yang, X., Peng, S., Ma, E., Zhang, H., Lin, X., Wang, Y., & Li, J. (2024). Cropping rotation improved the bacterial diversity and N-cycling genes in tobacco fields through a 19-year long-term experiment. *Applied Soil Ecology*, 193, 105165. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105165>
 18. Kafe, F., Dalalian, M.R., Rezapour, S., Sabbaghtazeh, E., & Rafieyan, O. (2022). Determination of minimum data set to evaluate soil quality in piranshahr region wheat fields. *Applied Soil Research*, 11(4), 30-42. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30466/ASR.2024.121443>
 19. Karlen, D.L., Andrews, S.S., Doran, J.W., & Wienhold, B.J. (2003). Soil quality: human kind's foundation for survival. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(4), 171-179. <https://doi.org/10.1080/00224561.2003.12457524>
 20. Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 687-734. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>
 21. Malo, D.D., Schummacher, T.E., & Doolittle, J.J. (2005). Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern Great Plain. *Soil & Tillage Research*, 81, 277-291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.015>
 22. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1986). Phosphorous. *Methods of Soil Analysis. Part 2*, Soil Science Society of American Journal. Madison, WI. Pp. 403-427. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (Eds).
 23. Otto, S., Masin, R., Nikolic, N., Berti, A., & Zanin, G. (2023). Effect of 20-years crop rotation and different strategies of fertilization on weed seedbank. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 354, 108580. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108580>
 24. Pieri, C.J.M.G. (1992). Fertility of soils: a future for farming in the west African Savannah. *Springer Science & Business Media*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84320-4>
 25. Qi, J., Fu, D., Wang, X., Zhang, F., & Ma, Ch. (2023). The effect of alfalfa cultivation on improving physicochemical properties soil microorganisms' community structure of grey desert soil. *Nature Portfolio*, 13, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41005-8>
 26. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluation soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu province, China. *Geoderma*, 149, 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>
 27. Ramezani, F., Jafari, S., Salavati, A., & Khalili Moghaddam, B. (2016). Study the soil quality changes indicators using nemro and integrated quality index models in some Khuzestan's soils. *Journal of Water and Soil*, 29(6), 1629-1639. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.35514>
 28. Ranjbar, A., Emami, H., Karimi, A.R., & Khorassani, R. (2015). Determining the most important soil properties

- affecting the yield of saffron in the Ghayenat area. *Journal of Water and Soil*, 29(3), 673-682. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.31230>
29. Ranjbar, A., Emami, H., Khorasani, R., & Karimi Karouyeh, A.R. (2016). Soil quality assessments in some Iranian saffron field. *Journal of Agricultural Science, Technology*, 18(3), 865-878. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.16807073.2016.18.3.4.6>
 30. Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., & Yang, X.M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
 31. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. *Method of soil analysis*, parss: chemical methods. Madison. Wisconsin, USA. 417-436. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
 32. Sadeghian, A., Sayyad, Gh.A., Farokhian Firouzi, A., & Norouzi Masir, M. (2018). Effect of agronomic management on some chemical and biological indicators of soil health. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(3), 269-280. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14281.2905>
 33. Samaei, F., Emami, H., & Lakzian, A. (2022). Assessing soil quality of pasture, agriculture land uses in shandiz county, northwestern Iran. *Ecological Indicators*, 139, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108974>
 34. Sepaskhah, A.R. (2016). A menu of solutions to the food security challenge in Iran. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 1(1), 23-34. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22047/srjasnr.2016.110527>
 35. Servati, M. (2019). Selection of the most suitable crop rotation in aras river margin, based on assessing soil qualitative indicators. *Water and Soil Science*, 28(4), 155-165. (In Persian with English abstract)
 36. Shah, K.K., Mondi, B., Pandey, H.P., Sabedi, A., Aryal, G., Pandey, M., & Shrestha, J. (2021). Diversified crop rotation: An approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*, 2021, 8924087: 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/8924087>
 37. Shalika, O.H., Ayoubi, Sh., Khormali, F., & Ghorbani Nasrabadi, R. (2009). Assessmen of soil quality indicators in different rice rotation sstems in dasht-sar district, Amol, Mazandaran province. *Journal of Agriculture Science Natural Resource*, 15(6), 64-74.
 38. Shukla, M.K., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determing soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research*, 87(2), 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
 39. Sims, J.T. (1996). Lime requirement. *Methods of Soil Analysis*: part 3: Chemical methods, 5, 491-515. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c17>
 40. Van Bavel, C.H.M. (1949). Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Proceedings. Soil Science Society of America Journal*, 14, 20-23. <https://doi.org/10.2136/sssaj1950.036159950014000c0005x>
 41. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
 42. Yang, H., An, F., Yang, F., & Wang, Zh. (2019). The impact of irrigation on yield of alfalfa and soil chemical properties of saline-sodic soils. *PeerJournal*, 7, e7148. <https://doi.org/10.7717/peerj.7148>
 43. Zani, C.F., Barneze, A.S., Soratto, R.P., & Francis, R.P. (2023). The effect of crop rotations on soil. In: Goss, M.J., Oliver, M. (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment*, second ed. *Academic Press, Oxford*, 3, 125-134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00145-2>

Contents

An Attitude to the Status of Resources and Uses of Tajan River Basin	329
M. Akbari, M. Farhadzadeh, P. Maleki	
Optimization of Fertilizer Use in Sugar Beet Fields in Khorasan Razavi Province Using the Compositional Nutrient Diagnosis (CND) Method: Results of a Two-Year Study	349
J. Ghaderi, Sh. Fathi, M. Forouhar, K. Khalkhal	
Spatial Relationships between Soil Quality and Site Quality in the Zagros Forests: From Statistical Analysis to Spatial Prediction	361
N. Pordel, J. Hosseinzadeh, M. Heydari, R. Omidipour	
Effect of Fe Aminochelates and FeSO₄ Fertigation on the Distribution of Fe Chemical Fractions in the Soil Solid Phase and Fe Concentration in Sunflower	381
M. Alipour Babadi, M. Norouzi Masir, A. Moezzi, A. Rahnama Ghahfarokhi, M. Taghavi Zahedkolaei	
Studying the Effect of Chemical and Organic Fertilizer Application on Soil Quality	403
R. Mirkhani, F. Moshiri, A. Ghaffarinejad, H. Rezaei	
Effect of Alfalfa Cultivation and Maize-Wheat Rotation on Soil Quality in Semi-arid Agroecosystem	417
O. Eghbali, H. Emami, R. Khorassani	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 39

No. 4

Sep.-Oct. 2025

Published by: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Manager in Charge: Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editor in Chief: Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Ferdowsi University of Mashhad
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Griffith University
Khorassani, R.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).



Vol. 39 No. 4

2025

Journal of **Water and Soil** (Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

An Attitude to the Status of Resources and Uses of Tajan River Basin	329
M. Akbari, M. Farhadzadeh, P. Maleki	
Optimization of Fertilizer Use in Sugar Beet Fields in Khorasan Razavi Province Using the Compositional Nutrient Diagnosis (CND) Method: Results of a Two-Year Study	349
J. Ghaderi, Sh. Fathi, M. Forouhar, K. Khalkhal	
Spatial Relationships between Soil Quality and Site Quality in the Zagros Forests: From Statistical Analysis to Spatial Prediction	361
N. Pordel, J. Hosseinzadeh, M. Heydari, R. Omidipour	
Effect of Fe Aminochelates and FeSO₄ Fertigation on the Distribution of Fe Chemical Fractions in the Soil Solid Phase and Fe Concentration in Sunflower	381
M. Alipour Babadi, M. Norouzi Masir, A. Moezzi, A. Rahnama Ghahfarokhi, M. Taghavi Zahedkolaei	
Studying the Effect of Chemical and Organic Fertilizer Application on Soil Quality	403
R. Mirkhani, F. Moshiri, A. Ghaffarinejad, H. Rezaei	
Effect of Alfalfa Cultivation and Maize-Wheat Rotation on Soil Quality in Semi-arid Agroecosystem.....	417
O. Eghbali, H. Emami, R. Khorassani	