Journal of Saffron Research
Vol. 13, No. 1, p. 124-140, 2025
10.22077/jsr.2025.9887.1284

University of Birjand

Original Article

Sustainable Optimization of Saffron Production through Zone-Specific Management of Soil Chemical Properties in Arid Regions: A Case Study of Gonabad

Javad Momeni Damaneh[1], Ehsan Tamassoki[2]*
1- PhD of Natural Resource Engineering-Desertification, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.
2- PhD of Watershed Management Science and Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

*Corresponding author: *ehsantamasoki@yahoo.com*

Received: 02 August 2025, **Revised**: 10 September 2025, **Accepted**: 30 September 2025

Extended Abstract

Introduction: Saffron (*Crocus sativus* L.), a perennial plant from the Iridaceae family, is among the world's most valuable agricultural products. It holds a prominent place in Iranian agriculture, particularly in Khorasan Razavi, where Iran dominates global production with over 90% of the world's supply. Gonabad County is a key production hub. Known as "red gold," saffron's value comes from the dried stigmas of its flowers, which contain bioactive compounds with antioxidant, anti-inflammatory, and antidepressant properties. However, cultivating saffron in arid and semi-arid regions presents significant challenges, including low rainfall (less than 200 mm annually), high temperatures (up to 40°C), low humidity, and low-fertility soils. These conditions often lead to yields below 5 kg/ha and compromised quality. Soil quality is a critical factor influencing saffron performance, directly affecting corm growth, flower production, and stigma quality. Key chemical properties of the soil, such as electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR), organic matter (OM), and pH, are pivotal for plant health. High soil salinity (EC > 4 dS/m) and sodicity (SAR > 13) cause osmotic stress, reducing water and nutrient uptake and disrupting physiological processes. In arid regions, saline water irrigation and high evaporation exacerbate salt accumulation. Conversely, balanced nutrient management and organic amendments can improve soil structure and increase water retention, significantly boosting saffron yield. Studies in Khorasan Razavi have shown a strong positive correlation (r=0.75) between the organic matter content and saffron yield.

Climatic factors and irrigation management closely interact with soil properties, affecting saffron phenology. Precise irrigation scheduling during critical growth stages can mitigate the effects of salinity and alkalinity. Advances in precision agriculture, such as geospatial tools for zoning and real-time soil sensors, enable targeted management, optimizing water and fertilizer use and potentially increasing yields by 20% . Planting techniques and field management also play a crucial role. High planting

Copyright © 2025 by the authors
Published by University of Birjand. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

density (150-200 corms/m²) and a planting depth of 15-20 cm can enhance yields by protecting corms from heat and drought stress. Corm requirements for planting vary from 1.5 to 10 tons/ha. Soil quality, particularly organic matter and salinity, profoundly impacts saffron growth. Organic matter levels above 1.5% strongly correlate (r=0.80) with higher saffron yields. High sodicity (SAR > 15) harms corm health and reduces stigma quality, underscoring the need for precise soil chemical management .

Gonabad County, with 150 mm annual rainfall, dedicates 3,400 hectares to saffron cultivation. This study aims to assess soil chemical properties in three distinct Gonabad zones (Central, Kakhk-Kalat, Paskalut) and their impact on saffron growth and yield. The goal is to develop a scientific framework for region-specific management strategies. It is hypothesized that significant differences exist in soil chemical properties among the zones and that high salinity and sodicity negatively correlate with saffron performance. This research, utilizing integrated field data and statistical modeling, seeks to improve saffron production in Gonabad and serve as a model for similar arid regions.

Materials and Methods: The study was conducted in Gonabad County. Three zones (Central, Kakhk-Kalat, Paskalut) were selected based on soil and water variations. Soil samples were analyzed for nitrogen, potassium, calcium, magnesium, bicarbonate, lime, gypsum, SAR, EC, organic matter, and pH. Geospatial tools facilitated zoning and sampling. Statistical analyses, including one-way ANOVA and Tukey's test, assessed differences in soil properties across zones, with Pearson correlation evaluating parameter relationships.

Results and Discussion: Analysis revealed significant differences ($p<0.01$) in soil EC, SAR, calcium, and magnesium across zones, with Paskalut showing the highest values (EC=5.44 mS/cm, SAR=7.29). These conditions correlate with reduced saffron yield. Paskalut had elevated sodium, calcium, and magnesium, indicating severe salinity and sodicity challenges. Conversely, pH, organic matter, and potassium showed no significant differences ($p>0.05$). Strong positive correlations ($p<0.01$) were found between EC and calcium (r=0.943), magnesium (r=0.950), and SAR (r=0.474 with sodium). Zone-specific strategies, like gypsum application in Paskalut and organic amendments in Central and Kakhk-Kalat, are critical. Precision agriculture tools can mitigate salinity and improve saffron yield.

Conclusion: This study emphasizes zone-specific soil management to enhance saffron productivity in Gonabad. Paskalut requires urgent interventions for high salinity and sodicity, including gypsum application and improved drainage. In Central and Kakhk-Kalat, increasing organic matter can boost soil fertility and saffron yield. An integrated governance framework, leveraging precision agriculture, is essential for sustainable saffron production and natural resource conservation in arid regions.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements: The authors thank the local agricultural authorities and farmers of Gonabad for their cooperation in fieldwork and data collection.

Keywords: Gonabad, Natural Resource Management, Saffron, Salinity, Soil Chemical Properties.

نشریه پژوهش‌های زعفران (دو فصلنامه)
جلد سیزدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۴
شماره صفحه: ۱۴۰ – ۱۲۴
10.22077/jsr.2025.9887.1284

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی پایدار تولید زعفران از طریق مدیریت تفکیک‌شده ویژگی‌های شیمیایی خاک در مناطق خشک: مطالعه موردی گناباد

جواد مومنی دمنه[۱]، احسان تمسکی[۲*]
دانش آموختهٔ دکتری منهدسی منابع طبیعی- بیابان‌زدایی، دانشگاه هرمزگان، ایران.
دانش آموختهٔ دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان، ایران.

* نویسنده مسئول: *ehsantamasoki@yahoo.com*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی استراتژیک مدیریت جامع منابع خاک و بررسی تأثیر ویژگی‌های شیمیایی خاک بر کشت زعفران در شهرستان گناباد انجام شد. مطالعه حاضر ویژگی‌های شیمیایی خاک را در سه منطقه متمایز (مرکزی، کاخک-کلات، و پسکلوت) با استفاده از تجزیه واریانس یک‌طرفه و تحلیل همبستگی پیرسون بررسی کرد. نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، و غلظت کاتیون‌های کلسیم و منیزیم تفاوت‌های معنی‌داری ($p<0.01$) بین منطقه‌ها دارند، با بالاترین مقادیر در منطقه پسکلوت (EC= ۵/۴۴ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر، SAR=۷/۲۹). این شرایط با کاهش عملکرد زعفران به دلیل فشار اسمزی و اختلال در جذب عناصر غذایی همراه است. در مقابل، اسیدیته (pH)، درصد اشباع، ماده آلی، و محتوای پتاسیم تفاوت معنی‌داری نشان ندادند ($p>۰/۰۵$)، که امکان مدیریت یکپارچه این پارامترها را فراهم می‌کند. تحلیل همبستگی روابط قوی ($p < 0.01$) بین شوری و کاتیون‌های کلسیم ($r= ۰/۹۴۳$)، منیزیم ($r= ۰/۹۵۰$)، و سدیم ($r= ۰/۴۷۴$ با SAR) را تأیید کرد. این یافته‌ها بر ضرورت مدیریت تفکیک‌شده برای هر منطقه، به‌ویژه کنترل شوری و سدیمی بودن خاک در پسکلوت و تقویت ماده آلی در منطقه‌های مرکزی و کاخک-کلات، تأکید دارد. این پژوهش چارچوبی علمی برای سیاست‌گذاری هدفمند و پایدار ارائه می‌دهد که می‌تواند بهره‌وری زعفران و پایداری منابع طبیعی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: زعفران، شوری، گناباد، مدیریت منابع طبیعی، ویژگی‌های شیمیایی خاک.

Copyright © 2025 by the authors
Published by University of Birjand. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مقدمه

زعفران (*Crocus sativus* L.)، گیاهی چندساله از خانواده Iridaceae، به‌عنوان یکی از ارزشمندترین محصولات کشاورزی جهان شناخته می‌شود که به دلیل خواص اقتصادی، غذایی، دارویی و فرهنگی خود، جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی ایران، به‌ویژه در استان خراسان رضوی، دارد (Momeni Damaneh et al., 2023). ایران با تولید بیش از ۹۰ درصد زعفران جهان (حدود ۴۳۰ تن در سال ۲۰۲۳)، بزرگ‌ترین تولیدکننده این محصول است و شهرستان گناباد به‌عنوان یکی از مراکز کلیدی، سهمی قابل‌توجه در این تولید ایفا می‌کند (FAO, 2023). این گیاه که به «طلای سرخ» معروف است، از کلاله‌های خشک‌شده گل‌ها به‌عنوان ادویه‌ای گران‌بها استفاده می‌شود و حاوی ترکیبات زیست کنش‌ور مانند کروسین، پیکروکروسین و سافرانال است که خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و ضدافسردگی دارند (Rezaei et al., 2023). با این حال، کشت زعفران در مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش‌های متعددی مواجه است، از جمله کمبود بارندگی (کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در سال)، دماهای بالا (تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد در تابستان)، رطوبت پایین، خاک‌های کم‌حاصل با بافت سبک و فقدان تناوب زراعی مناسب، که اغلب منجر به کاهش عملکرد (کمتر از ۵ کیلوگرم در هکتار) و کیفیت محصول می‌شود (Ahmadi et al., 2021; Koocheki et al., 2014).

کیفیت خاک به عنوان یکی از عوامل بسیار تاثیرگذار بر عملکرد زعفران، تأثیر مستقیمی بر رشد کورم (پداژه)، تولید گل و کیفیت کلاله دارد. ویژگی‌های شیمیایی خاک، شامل هدایت الکتریکی (EC، نشان‌دهنده هدایت الکتریکی)، نسبت جذب سدیم (SAR، شاخص سدیمی بودن)، ماده آلی (OM، کمتر از ۱ درصد در بسیاری از خاک‌های خشک)، pH (معمولاً قلیایی، بین ۷.۵ تا ۸.۵)، و دسترسی به عناصر غذایی مانند نیتروژن، پتاسیم، کلسیم و منیزیم، نقش کلیدی در سلامت گیاه ایفا می‌کنند (Ghaffari et al., 2020; Cardone et al., 2020). مطالعات نشان داده‌اند که شوری خاک (EC > ۴ dS/m) و SAR بالا (> ۱۳) می‌توانند با ایجاد فشار اسمزی، کاهش جذب آب و مواد غذایی، و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز و تقسیم سلولی، عملکرد کلاله را تا ۵۰ درصد کاهش دهند (Rezaei et al., 2023; Azizi-Zohan et al., 2018).

تنش شوری، به ویژه ناشی از تجمع یون سدیم(Na^+) ، یکی از مهم‌ترین عوامل بازدارنده رشد و عملکرد گیاهان در سراسر جهان است. تأثیرات مخرب سدیم بر گیاه از دو طریق اصلی اعمال می‌شود :تنش اسمزی و سمیت یونی؛ در مرحله اولیه مواجهه گیاه با شوری بالا، تنش اسمزی رخ می‌دهد. افزایش غلظت نمک در محلول خاک، پتانسیل آب محیط اطراف ریشه را کاهش می‌دهد. این امر موجب می‌شود که گیاه برای جذب آب با مشکل مواجه شده و دچار یک خشکی فیزیولوژیکی شود، که در نهایت به کاهش رشد و پژمردگی منجر می‌گردد. در صورت ادامه این وضعیت، سمیت یونی آغاز می‌شود. با ورود یون‌های سدیم به سلول‌های گیاهی، تعادل یونی به هم می‌خورد. یون سدیم از لحاظ الکتروشیمیایی و اندازه هیدراته، شباهت زیادی به یون پتاسیم (K^+) دارد و با آن برای جذب از طریق پروتئین‌های ناقل رقابت می‌کند. تجمع بیش از حد سدیم در سیتوپلاسم سلول باعث اختلال در فرآیندهای حیاتی وابسته به پتاسیم می‌شود و به آسیب به غشای سلولی، نشت الکترولیت‌ها و کاهش فتوسنتز می‌انجامد. در نهایت، این سمیت منجر به آسیب به بافت برگ و علائمی مانند سوختگی یا کلروز (زرد شدن) در برگ‌های مسن می‌شود(Munns & Tester, 2008).

برای مثال، در مناطق خشک ایران، افزایش شوری خاک ناشی از آبیاری با آب‌های شور و تبخیر بالا، منجر به تجمع نمک‌های محلول و کاهش اندازه کورم می‌شود (Shahandeh, 1989). در مقابل، مدیریت متعادل عناصر غذایی و کاربرد کودهای آلی می‌تواند ساختار خاک را بهبود بخشیده، ظرفیت نگهداری آب را تا ۲۰ درصد افزایش دهد و عملکرد زعفران را در خاک‌های نیمه‌خشک تقویت کند (Jahanban et al., 2022; Behdani et al., 2005). مطالعه‌ای در چهار شهر خراسان رضوی (بیرجند، قاین، گناباد و تربت‌حیدریه) نشان داد که کاربرد کودهای آلی و معدنی به‌طور معنی‌داری ($p<0.05$) عملکرد زعفران را در مزارع با سنین مختلف افزایش می‌دهد، با همبستگی مثبت بین ماده آلی و عملکرد (Behdani et al., 2005) ($r=0.75$). شرفخانه و همکاران (2025) جهت بررسی

تأثیر شوری خاک و آب بر عملکرد زعفران، نرم‌افزار AquaCrop در مزرعه‌ای در دانشگاه فردوسی مشهد واسنجی شد تا تغییرات شوری خاک را برای زعفران دوساله شبیه‌سازی کند. نتایج نشان داد این نرم‌افزار دقت بالایی دارد. مدل‌سازی‌ها حاکی از آن است که افزایش شوری آب آبیاری و شوری اولیه خاک، باعث کاهش قابل توجه وزن بنه دختری می‌شود؛ به طور مثال، افزایش شوری آب از ۱ به ۴ دسی‌زیمنس بر متر در خاک با شوری اولیه ۲، کاهش ۲۳ درصدی وزن بنه‌ها را به دنبال دارد. علاوه بر این، استفاده از خاک‌پوش آلی با پوشش ۱۰۰ درصد در شرایط شوری بالا، عملکرد بنه دختری را تا ۴۶ درصد بهبود می‌بخشد. این یافته‌ها راهکارهای مؤثری برای مدیریت شوری و افزایش بهره‌وری زعفران ارائه می‌دهند (Sharafkhane et al., 2025). در خوزستان، شوری فزاینده خاک و آب، تهدیدی جدی برای کشاورزی است. این تحقیق با بررسی سیستم زهکشی و حوضچه‌های تبخیری، نشان می‌دهد که زهکشی نامناسب آب‌های زیرزمینی شور و تبخیر بالا، به تجمع نمک‌ها و کاهش حاصلخیزی خاک منجر شده است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت جریان خروجی آب‌های شور چهار برابر بیشتر از ظرفیت ورودی حوضچه‌ها است. این عدم تعادل عمدتاً به دلیل زهکشی ناکارآمد و تبادل مکرر آب در استخرهای پرورش ماهی است. این مطالعه بر ضرورت بهبود مدیریت شوری، اصلاح طرح‌های زهکشی و نظارت دقیق‌تر بر فعالیت‌های شیلات برای تضمین پایداری منابع آب در منطقه تأکید می‌کند (Mao et al., 2025).

عوامل اقلیمی و مدیریت آبیاری نیز در تعامل نزدیک با ویژگی‌های خاک قرار دارند و بر فنولوژی زعفران تأثیر می‌گذارند. گل‌دهی زعفران معمولاً با کاهش دما به حدود ۱۵-۱۲ درجه سانتی‌گراد و ۲ تا ۳ هفته پس از اولین آبیاری پاییزه آغاز می‌شود، اما تغییرات آب و هوایی مانند افزایش دما می‌تواند این دوره را کوتاه کند (Alizadeh et al., 2009; Fallahi et al., 2022). در مناطق خشک، رژیم‌های آبیاری نامناسب می‌تواند شوری خاک را تشدید کند، اما برنامه‌ریزی دقیق آبیاری، به‌ویژه در مراحل حساس رشد مانند گل‌دهی و تشکیل کورم، می‌تواند اثرات منفی شوری و قلیائیت را تا ۳۰ درصد کاهش دهد (Mousavi & Karami, 2021). پیشرفت‌های اخیر در کشاورزی دقیق، از جمله استفاده از ابزارهای ژئوپاتیال مانند ArcGIS برای پهنه‌بندی اراضی بر اساس کیفیت خاک و آب، و حسگرهای خاک برای پایش real-time EC و pH، امکان مدیریت هدفمند و کارآمدتر کشت زعفران را فراهم کرده است (Hosseini et al., 2024). این فناوری‌ها به شناسایی مناطق با چالش‌های خاص، مانند شوری بالا در خاک‌های رسوبی، کمک کرده و تخصیص بهینه منابع آبی و کودی را تسهیل می‌کنند، که می‌تواند عملکرد را تا ۲۰ درصد افزایش دهد (Fallahi et al., 2022).

روش‌های کاشت و مدیریت مزرعه نیز تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد زعفران در شرایط خشک دارند. تحقیقات نشان می‌دهد که تراکم کاشت بالا (۲۰۰-۱۵۰ کورم در متر مربع) و عمق کاشت ۲۰-۱۵ سانتی‌متر می‌تواند عملکرد را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (تا ۵.۸ کیلوگرم در هکتار در سال سوم)، زیرا عمق بیشتر کاشت از تنش‌های حرارتی و خشکی محافظت می‌کند (Naderi Darbaghshahi et al., 2008). مقدار بنه موردنیاز برای کاشت زعفران بین ۱.۵ تا ۱۰ تن در هکتار متغیر است، که وابسته به اندازه کورم (بهینه: ۸- ۱۲ گرم) و شرایط خاک است (Behnia, 1991; Sadeghi, 1993; Ghalavand & Abdollahian, 1994). از سوی دیگر، کیفیت خاک، به‌ویژه از نظر ماده آلی و شوری، تأثیر عمیقی بر رشد زعفران دارد. مطالعات متعدد، از جمله در مراکش و ایران، همبستگی مثبت و بالایی بین ماده آلی خاک (OM >1.5 درصد) و عملکرد زعفران را گزارش کرده‌اند (r=0.80)، زیرا ماده آلی ساختار خاک را بهبود می‌بخشد و دسترسی به عناصر غذایی را افزایش می‌دهد (Shahandeh, 1989; Munshi, 1994; Negbi, 1999; Pinamonti, 1998; Aghhavani-Shajari et al., 2021). همچنین، (Shariati et al.2025) به اثرات مخرب سدیمی بودن خاک (SAR >15) بر سلامت کورم، کاهش کیفیت کلاله (کاهش محتوای کروسین تا ۲۵ درصد) و افزایش حساسیت به بیماری‌ها اشاره کرده‌اند، که این موضوع اهمیت مدیریت دقیق ویژگی‌های شیمیایی خاک را نشان می‌دهد. در پژوهشی که نبی‌پور و توکلی کاخکی (Nabipour & Tavakkoli-kakhki, 2024) انجام دادند، اثر تراکم کاشت و مدیریت پوشش بر عملکرد زعفران در گناباد بررسی

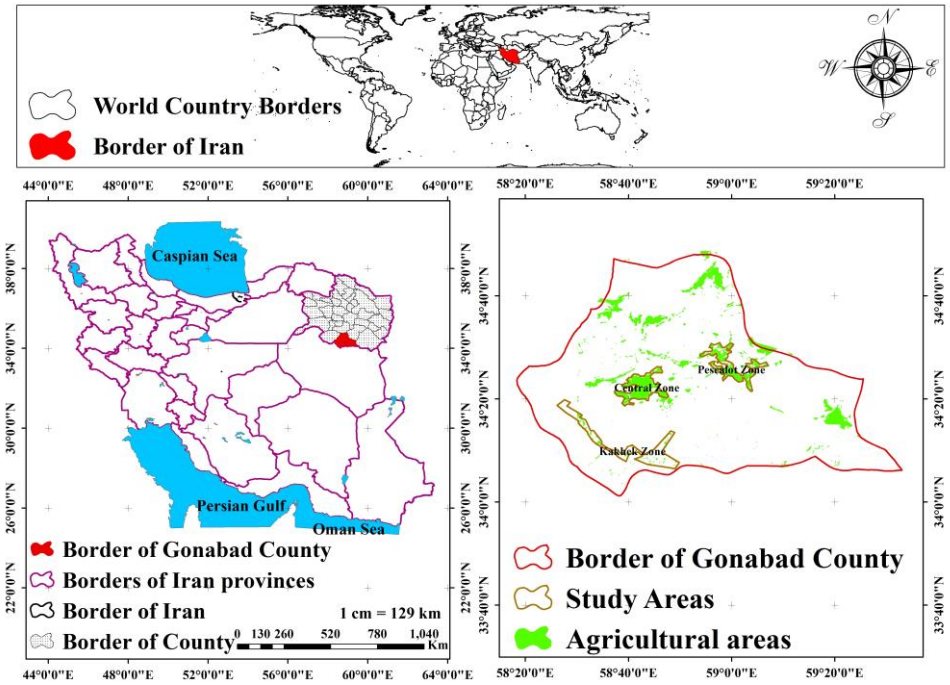
شد. نتایج نشان داد که تراکم ۱۲۰ بنه در مترمربع به همراه استفاده از پوشش‌هایی مانند کلش جو، به‌طور معنی‌داری موجب افزایش عملکرد کلاله شد. در مطالعه‌ای دیگر، هاتفی فرجیان (Hatefi Farajian et al., 2023) با تحلیل پرسشنامه‌های زعفران‌کاران استان‌های خراسان دریافتند که عواملی مانند سطح زیر کشت و وزن بنه‌های مادری تأثیر مستقیمی بر عملکرد خشک کلاله دارند. به‌طور مشابه، پژوهش امینی‌غفرد و همکاران (Aminifard et al., 2023) نیز تأثیر مثبت و معنادار کاربرد توأم سولفات پتاسیم (۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) و عصاره جلبک دریایی را در افزایش رشد رویشی و عملکرد زعفران در منطقه سرایان به‌ثبت رساند.

شهرستان گناباد، واقع در جنوب خراسان رضوی با میانگین بارندگی ۱۵۰ میلی‌متر در سال و خاک‌های عمدتاً آبرفتی با بافت لومی-رسی، به‌عنوان یکی از مراکز کلیدی تولید زعفران (۳۴۰۰ هکتار سطح زیر کشت)، نیازمند رویکردهای کشاورزی پایدار و متناسب با شرایط محلی است. با وجود تحقیقات گسترده، شکاف‌های دانشی در مورد تعامل پیچیده بین ویژگی‌های شیمیایی خاک (مانند EC، SAR و OM) و عملکرد زعفران در منطقه‌های مختلف این منطقه همچنان باقی است. جهت بررسی دقیق‌تر شرایط متفاوت آب و خاک در شهرستان گناباد، منطقه مورد مطالعه بر اساس نظرات کارشناسان، جهاد کشاورزی و صندوق بیمه محصولات کشاورزی، به سه منطقه مجزا شامل منطقه‌های مرکزی (گناباد)، کاخک و کلات، و پسکلوت تقسیم‌بندی شد. این پژوهش با هدف بررسی دقیق ویژگی‌های شیمیایی خاک در هر سه منطقه متمایز و ارزیابی تأثیر مستقیم آن‌ها بر رشد و عملکرد زعفران انجام شده است. هدف اصلی این تحقیق ارائه یک چارچوب علمی جامع برای توسعه راهکارهای مدیریتی منطقه‌محور است که به صورت بهینه، بهره‌وری زعفران را در این مناطق افزایش دهد. همچنین، این رویکرد به دنبال تضمین پایداری منابع طبیعی ارزشمند در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک است که برای کشاورزی زعفران حیاتی هستند. تمامی پارامترهای شیمیایی و فیزیکی خاک به صورت مستقل در هر یک از این منطقه‌ها مورد تحلیل و بررسی دقیق قرار گرفته‌اند تا درک کاملی از تأثیرات محیطی بر تولید این محصول گران‌بها حاصل شود. این رویکرد پژوهشی، امکان ارائه راهکارهای عملی و مؤثر متناسب با شرایط هر منطقه را فراهم می‌آورد و به بهبود کشاورزی پایدار زعفران در بلندمدت کمک می‌کند. فرض می‌شود که تفاوت‌های معنی‌داری در ویژگی‌های شیمیایی خاک (مانند EC، SAR، کلسیم و منیزیم) بین سه منطقه گناباد وجود دارد ($p < 0.01$)، سطوح بالای شوری (EC) و سدیمی بودن (SAR) با عملکرد زعفران همبستگی منفی قوی دارد ($r < -0.70$)، و مدیریت تفکیک‌شده خاک (مانند اصلاح شوری در منطقه پسکلوت) می‌تواند عملکرد زعفران را تا ۲۰-۱۵ درصد افزایش دهد. با یکپارچه‌سازی داده‌های میدانی، تحلیل‌های آزمایشگاهی (مانند روش Kjeldahl برای نیتروژن و Walkley-Black برای ماده آلی) و مدل‌سازی آماری (ANOVA و همبستگی پیرسون)، این پژوهش نه‌تنها به بهبود تولید زعفران در گناباد کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد (Koocheki et al., 2014; Cardone et al., 2020; Lage & Cantrell, 2009).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان گناباد، واقع در استان خراسان رضوی، با وسعتی معادل ۵۷۶۷ کیلومتر مربع، ۴.۹۵ درصد از کل مساحت استان را به خود اختصاص داده است. این منطقه با ارتفاع متوسط ۱۱۵۰ متر از سطح دریا، در گستره طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). شهر گناباد در فاصله ۲۸۵ کیلومتری جنوب مرکز استان قرار دارد و کل اراضی کشاورزی آن، شامل ۲۰۸۵۴ هکتار زمین آبی و دیم، نقش مهمی در اقتصاد محلی ایفا می‌کند. از این میزان، ۳۴۰۰ هکتار (معادل ۱۶ درصد) به کشت زعفران اختصاص دارد که نشان‌دهنده اهمیت این محصول در کشاورزی منطقه است.



شکل۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Geographic location of the study area

روش پژوهش

در این پژوهش، به منظور دستیابی به اهداف از پیش تعیین‌شده، از روش‌های علمی و استاندارد برای تحلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه، شهرستان گناباد، بر اساس تفاوت‌های چشمگیر در شرایط آب و خاک به سه منطقه مجزا شامل منطقه مرکزی (گناباد)، منطقه کاخک و کلات، و منطقه پسکلوت تقسیم‌بندی گردید. تمامی پارامترها به صورت مستقل در هر منطقه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. برای تعیین دقیق محدوده‌های جغرافیایی اراضی و شبکه‌بندی منطقه به منظور نمونه‌برداری، از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8 و Google Earth بهره گرفته شد(Sadeghi et al., 2016). در این پژوهش، به منظور بررسی جامع شرایط خاک در شهرستان گناباد، نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک و تصادفی از مزارع زیر کشت زعفران انجام شد. از هر یک از سه منطقه مورد مطالعه، ۱۶ نمونه خاک در اردیبهشت‌ماه جمع‌آوری گردید که در مجموع ۴۸ نمونه را شامل می‌شود. برای افزایش دقت نتایج، نمونه‌ها صرفاً از مزارعی با سن نسبتاً یکسان (۳ تا ۵ سال) برداشت شدند. پس از جمع‌آوری نمونه‌های خاک از هر منطقه، آن‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و در شرایط دمای اتاق خشک شدند. سپس، نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند تا ذرات بزرگتر و بقایای گیاهی حذف گردند. نمونه‌های آماده‌سازی شده برای انجام آزمون‌های فیزیکوشیمیایی در ظروف مناسب نگهداری شدند.

روش‌های تجزیه و تحلیل ویژگی‌های خاک

برای اندازه‌گیری محتوای نیتروژن کل، از روش کجلدال[1] استفاده شد. این روش استاندارد شامل سه مرحله هضم، تقطیر و تیتراسیون است. در مرحله هضم، نمونه خاک با اسید سولفوریک غلیظ (H_2SO_4) و کاتالیزورهای مناسب حرارت داده می‌شود تا نیتروژن آلی و آمونیومی به سولفات آمونیوم $(NH_4)_2SO_4$ تبدیل شود. سپس در مرحله تقطیر، با افزودن محلول سدیم هیدروکسید(NaOH) ، آمونیاک (NH_3) آزاد می‌گردد. آمونیاک آزاد شده توسط بخار آب به داخل محلول اسید بوریک انتقال یافته و با محلول استاندارد اسید کلریدریک (HCl) تیتر می‌شود تا مقدار نیتروژن کل محاسبه شود.

رابطه ۱:

$$N = ((Vsample - Vblank) \times NHCl \times 14.007 \times 100) / Wsample$$

[1] Kjeldahl Method

برای اندازه‌گیری غلظت یون‌های پتاسیم، کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات، آهک و گچ در عصاره اشباع خاک، از روش تیتراسیون استفاده گردید (Marg & Hauz, 1999). برای تعیین کلسیم و منیزیم از تیتراسیون با محلول استاندارد EDTA استفاده شد و غلظت بی‌کربنات نیز با استفاده از تیتراسیون با اسید سولفوریک استاندارد و شناساگر مناسب تعیین شد. پس از تعیین غلظت سدیم، کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر(meq/L) ، نسبت جذب سدیم (SAR)نیز با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

رابطه ۲:

$$SAR = Na^{+} / ((Ca^{+} + Mg^{+}) / 2) * 0.5$$

شوری خاک با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (Klute et al., 1986)تعیین شد. عصاره اشباع به نسبت خاک به آب ۱:۱ تهیه و پس از هم زدن و ته‌نشین شدن، هدایت الکتریکی آن با واحد دسی‌زیمنس بر متر (dS/m)اندازه‌گیری شد. همچنین برای اندازه‌گیری ماده آلی، از روش واکلی و بلک (Walkley-Black Method)استفاده گردید(Klute et al., 1986). این روش بر اساس اکسیداسیون کربن آلی خاک با محلول استاندارد دی‌کرومات پتاسیم(K2Cr2O7)در محیط اسیدی انجام می‌شود. دی‌کرومات پتاسیم مازاد که مصرف نشده، با تیتراسیون توسط محلول استاندارد سولفات آهن ($FeSO_4$) اندازه‌گیری شد و از طریق مقدار دی‌کرومات مصرف شده، مقدار کربن آلی و سپس ماده آلی محاسبه گردید. برای تبدیل درصد کربن آلی به درصد ماده آلی، از ضریب تبدیل تقریبی ۷۲۴.۱ استفاده شد.

رابطه ۳:

$$\%OM = \%C * 1.724$$

درصد آب اشباع‌شونده با روش بار ثابت (Klute et al., 1986) تعیین گردید. در این روش، به یک مقدار مشخصی از نمونه خاک خشک، آب به صورت قطره‌ای اضافه شد تا زمانی که خاک به حالت اشباع کامل برسد. حالت اشباع هنگامی است که سطح خاک براق شده و آب شروع به بالا آمدن از سطح کند. وزن آب اضافه شده اندازه‌گیری و درصد آب اشباع‌شونده نسبت به وزن خشک خاک محاسبه شد.

رابطه ۴:

$$SWP(\%) = (\text{وزن آب} / \text{وزن خاک خشک}) * 100$$

در نهایت، اسیدیته خاک با تهیه یک خمیر اشباع از نمونه خاک و اندازه‌گیری pH آن توسط دستگاه pH متر انجام گرفت.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۶ انجام گرفت. تجزیه واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) برای بررسی تفاوت معنی‌دار میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده در سه منطقه جغرافیایی استفاده شد تا مشخص شود آیا تفاوت‌های مشاهده‌شده بین گروه‌ها معنی‌دار است یا خیر. این روش با بررسی نسبت واریانس بین‌گروهی به درون‌گروهی، وجود تفاوت کلی را ارزیابی می‌کند. در صورت تأیید تفاوت معنی‌دار ($p<0.05$)، آزمون تعقیبی توکی (Tukey's HSD) برای مقایسه جفت‌به‌جفت میانگین‌ها و شناسایی منطقه‌های متفاوت به کار رفت. این آزمون با کنترل نرخ خطای نوع اول، امکان مقایسه دقیق و قابل اعتماد گروه‌ها را فراهم می‌کند (Montgomery & Runger, 2019; Tukey, 1949). در نهایت داده‌های عملکرد زعفران (kg/ha) و ۱۲ پارامتر خاک (pH، EC، SP، SAR، Ca، Mg، Na، K، HCO_3، $CaCO_3$، Gyp، OC) از سه منطقه جمع‌آوری شد. تحلیل با استفاده از همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی ساده در نرم‌افزار آماری انجام شد

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس عناصر و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در مناطق کشت زعفران شهرستان گناباد، اطلاعات ارزشمندی را در مورد تفاوت‌های معنی‌دار بین این مناطق ارائه می‌دهد. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، منابع تغییرات شامل اثرات «مناطق کشت زعفران» و «خطای آزمایش» هستند. در این میان، نتایج F-value و

معنی‌داری آماری (P-value) نشان‌دهنده وجود یا عدم وجود تفاوت‌های معنی‌دار در میانگین ویژگی‌های خاک بین مناطق مختلف است.

بر اساس این داده‌ها، چهار ویژگی خاک از جمله شوری (EC)، نسبت جذب سدیم(SAR) ، کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) تفاوت‌های آماری معنی‌داری را در سطح ۱ درصد ($p < 0.01$) بین مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهند. این یافته به وضوح تأیید می‌کند که شرایط خاک در منطقه‌های مختلف کشت زعفران در شهرستان گناباد از نظر این چهار پارامتر کلیدی، ناهمگون است. بالاترین F-value که مربوط به شوری (۷۰/۸۰) است، نشان‌دهنده بیشترین میزان تفاوت بین میانگین شوری خاک در این مناطق است. این مسئله حاکی از آن است که شوری خاک، به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رشد و عملکرد گیاه، در مناطق مختلف زعفران‌کاری گناباد به شدت متفاوت است و نیازمند راهکارهای مدیریتی اختصاصی در هر منطقه است. نسبت جذب سدیم نیز با F-value معادل ۱۱/۱۲ و معنی‌داری بسیار بالا، اهمیت وجود تفاوت در این پارامتر را تأیید می‌کند. این ناهماهنگی در میزان سدیم قابل جذب، می‌تواند بر خصوصیات فیزیکی خاک، نفوذپذیری آب و در نهایت جذب عناصر غذایی توسط گیاه زعفران تأثیر منفی بگذارد.

در مقابل، نتایج تجزیه واریانس برای سایر ویژگی‌ها مانند اسیدیته (pH)، درصد اشباع، نیتروژن، پتاسیم، بی‌کربنات، آهک، گچ و ماده آلی تفاوت معنی‌داری (ns) را در سطح آماری مورد بررسی نشان نمی‌دهد. این بدان معناست که از نظر این ویژگی‌ها، میانگین شرایط خاک در مناطق مختلف کشت زعفران شهرستان گناباد، همگن و مشابه یکدیگر است. هرچند که ممکن است مقادیر مطلق این پارامترها در هر منطقه متفاوت باشد، اما این تفاوت‌ها از نظر آماری در سطح کلان، معنی‌دار تلقی نمی‌شوند. به عنوان مثال، میانگین مربعات (MS) اسیدیته ۰/۰۴ و F-value آن ۰/۹۵ است که با توجه به عدم معنی‌داری، می‌توان نتیجه گرفت که مدیریت pH خاک در این مناطق با چالش‌های مشابهی مواجه است و نیازی به اتخاذ سیاست‌های متفاوت و کاملاً مجزا از یکدیگر نیست. همین امر در خصوص ماده آلی، پتاسیم و درصد اشباع نیز صادق است. با این حال، باید توجه داشت که همگن بودن این پارامترها به معنای عدم نیاز به بهبود نیست؛ بلکه نشان‌دهنده این واقعیت است که راهبردهای مدیریتی برای افزایش این عناصر یا بهبود این شرایط، می‌توانند به صورت یکپارچه و در مقیاس وسیع‌تری اعمال شوند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عملکرد زعفران در سه منطقه مورد مطالعه در شهرستان گناباد به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است. منطقه کاخک و کلات با میانگین عملکرد ۵/۹۸ کیلوگرم در هکتار، بالاترین تولید را به خود اختصاص داده است. پس از آن، منطقه مرکزی (گناباد) با تولید متوسط ۴/۲۶ کیلوگرم در هکتار و منطقه پسکلوت با ۲/۰۹ کیلوگرم در هکتار قرار دارند. این تفاوت‌های معنی‌دار آماری در عملکرد، مستقیماً با اختلاف در پارامترهای شیمیایی خاک در هر منطقه مرتبط است، که بر اهمیت ویژگی‌های محلی خاک در تعیین میزان تولید زعفران تأکید می‌کند.

در مجموع، تجزیه و تحلیل واریانس نشان می‌دهد که مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و متفاوت در مناطق کشت زعفران شهرستان گناباد، متغیرهای مرتبط با شوری و وضعیت کاتیون‌های خاک (کلسیم، منیزیم و به ویژه سدیم) هستند. این نتایج ضرورت تمرکز بر مدیریت آب و خاک از منظر کنترل شوری و کاهش اثرات سدیم را برجسته می‌سازد. در مقابل، مدیریت سایر پارامترها می‌تواند با رویکردی یکسان در تمامی مناطق صورت گیرد. این یافته‌ها مبنایی علمی برای تدوین راهکارهای مدیریتی دقیق و هدفمند جهت افزایش عملکرد و پایداری تولید زعفران در این شهرستان فراهم می‌آورد (جدول۱).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین عناصر خاک در سه منطقه اصلی کشت زعفران شهرستان گناباد، الگوهای متفاوتی را در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک آشکار می‌سازد که برای مدیریت هدفمند و پایدار این محصول ارزشمند حیاتی است. بر اساس داده‌های جدول، مناطق مورد مطالعه از نظر چندین پارامتر کلیدی تفاوت‌های آماری معنی‌داری دارند که با حروف متفاوت در هر ستون مشخص می‌شود. به طور برجسته، شوری (EC) یکی از مهم‌ترین این پارامترهاست که روند افزایشی قابل توجهی را از منطقه ۱ تا منطقه ۳ نشان می‌دهد. میانگین شوری از ۲/۵۹ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر در منطقه ۱ به ۳/۹۰ در منطقه ۲ و در نهایت به ۵/۶۶ در منطقه ۳ افزایش می‌یابد.

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس عناصر خاک مناطق کشت زعفران شهرستان گناباد

Table 1. Results of the analysis of variance for soil elements in saffron cultivation areas of Gonabad County

منابع تغییرات Sources of changes	عناصرخاک مناطق کشت زعفران گناباد Soil elements of the saffron growing areas of Gonabad	درجه آزادی Degree of freedom		خطا Error	F	معنی داری Significance
		2		9	-	-
میانگین مربعات squares	اسیدیته pH		0.04 ns	0.04	0.95	0.42
	شوری EC		10.59	0.15	70.80	0.00
	درصد اشباع SP		27.34 ns	7.28	3.76	0.07
	نسبت جذب سدیم SAR		2.20	0.20	11.12	0.00
	کلسیم Ca		134.73	0.47	284.97	0.00
	منیزیم Mg		72.84	0.45	162.37	0.00
	نیتروژن N		174.83	1.92	91.28	0.00
	پتاسیم K		0.02 ns	0.01	3.52	0.07
	کربنات بیکربنات Hco_3		7.46	0.58	12.79	0.00
	آهک $caco_3$		1.08 ns	1.01	1.07	0.38
	گچ Gyp		0.03 ns	0.01	3.56	0.07
	ماده آلی OC		0.00 ns	0.00	1.87	0.21

معنی‌داری در سطح ۱ درصد، ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار

Significance at the 1% level, ns no significant difference

این روند فزاینده حاکی از آن است که منطقه ۳ با چالش جدی‌تری در زمینه شوری خاک مواجه است که می‌تواند عملکرد و کیفیت زعفران را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. در همین راستا، نسبت جذب سدیم (SAR) نیز الگوی مشابهی را دنبال می‌کند و از ۶/۱۰ در منطقه ۱ به ۷/۳۰ در منطقه ۲ و ۷/۷۹ در منطقه ۳ می‌رسد، که نشان‌دهنده افزایش خطر سدیمی شدن خاک و تخریب ساختار آن در مناطق انتهایی‌تر است. این یافته‌ها مستقیماً با افزایش غلظت یون‌های سدیم (Na)همخوانی دارد، به‌گونه‌ای که میانگین آن از ۱۶/۶۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در منطقه ۱ به ۲۶/۸۳ در منطقه ۳ افزایش می‌یابد. این همبستگی قوی بین شوری، سدیم و نسبت جذب سدیم، بر پیچیدگی‌های مدیریتی در منطقه ۳ تأکید می‌کند و ضرورت اتخاذ راهبردهای خاص برای کنترل شوری و اصلاح خاک را برجسته می‌سازد. به علاوه، یون‌های کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) نیز با افزایش قابل ملاحظه‌ای در منطقه ۳ نسبت به دو منطقه دیگر، تفاوت‌های معنی‌داری را نشان می‌دهند. میانگین کلسیم از ۸/۳۰ در منطقه ۱ به ۱۷/۲۰ در منطقه ۳ و میانگین منیزیم از۳/۱۸ به ۱۰/۷۰ افزایش یافته است. این تغییرات چشمگیر در ترکیب کاتیونی خاک، اگرچه ممکن است نشان‌دهنده وجود منابع آهک و گچ باشد، اما به همراه مقادیر بالای سدیم و شوری، می‌تواند بر تعادل غذایی گیاه و جذب عناصر ضروری توسط زعفران تأثیر بگذارد.

در مقابل، برخی از ویژگی‌های خاک تفاوت معنی‌داری را بین منطقه‌ها نشان نمی‌دهند. به عنوان مثال، اسیدیته (pH) با میانگین‌هایی نزدیک به هم (۸/۹۴ تا ۸/۳۲) در هر سه منطقه، وضعیت قلیایی مشابهی را نشان می‌دهد که مدیریت آن می‌تواند با یک رویکرد یکپارچه صورت گیرد. همچنین، درصد اشباع (SP) با مقادیر نزدیک به ۳۶-۳۷ درصد، بیانگر ظرفیت نگهداری آب مشابه در خاک‌های این مناطق است که نشان می‌دهد تفاوت‌های عملکردی به احتمال زیاد

تحت تأثیر سایر پارامترهای شیمیایی قرار دارد تا ویژگی‌های فیزیکی. ماده آلی(OC) ، آهک ($CaCO_3$) و گچ (Gyp) نیز با میانگین‌های نسبتاً نزدیک به یکدیگر و با توجه به حروف مشابه (که نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است)، یکنواختی نسبی را در این پارامترها نشان می‌دهند. پتاسیم (K) نیز با مقادیری در محدوده ۰/۱۹۲ تا ۰/۲۱۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، تفاوت معنی‌داری را بین مناطق مورد مطالعه ندارد، که بیانگر همگنی نسبی در توزیع این عنصر حیاتی است. این یافته‌های متضاد (تفاوت‌های معنی‌دار در شوری و سدیم در مقابل یکنواختی در pH و ماده آلی)، این نتیجه‌گیری را تقویت می‌کند که راهبردهای مدیریتی در شهرستان گناباد باید بر اساس اولویت‌بندی چالش‌ها طراحی شوند. به این معنی که در منطقه ۳، تمرکز اصلی باید بر کاهش شوری و سدیم باشد، در حالی که در منطقه‌های ۱ و ۲، می‌توان بر افزایش ماده آلی یا بهبود مدیریت پتاسیم با رویکردی یکسان در هر سه منطقه تمرکز کرد. این رویکرد دوگانه و هدفمند، امکان استفاده بهینه از منابع و افزایش بهره‌وری تولید زعفران را در کل شهرستان فراهم می‌آورد (جدول ۲).

نتایج حاصل از جدول ضرایب همبستگی پیرسون بین پارامترهای مختلف خاک در مناطق کشت زعفران شهرستان گناباد، روابط متقابل و پیچیده‌ای را میان این عوامل آشکار می‌سازد که فهم آن‌ها برای تدوین راهکارهای مدیریتی اثربخش ضروری است. این ماتریس نشان می‌دهد که بسیاری از ویژگی‌های خاک به یکدیگر وابسته هستند و تغییر در یک عامل می‌تواند بر عوامل دیگر تأثیرگذار باشد. به طور مشخص، شوری (EC) قوی‌ترین و گسترده‌ترین همبستگی‌ها را با سایر پارامترها نشان می‌دهد. شوری با غلظت کلسیم(Ca) ، منیزیم(Mg) ، پتاسیم(K) ، بی‌کربنات (HCO_3) و به‌ویژه نسبت جذب سدیم (SAR) همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) دارد. این امر مطابق با اصول شیمی خاک است و تأیید می‌کند که افزایش شوری در این مناطق عمدتاً ناشی از بالا بودن غلظت نمک‌های محلول این کاتیون‌ها و آنیون‌هاست. بنابراین، هرگونه راهبرد مدیریتی برای کاهش شوری باید بر کنترل منابع این یون‌ها و بهبود زهکشی تمرکز کند. به علاوه، همان‌طور که انتظار می‌رود، نسبت جذب سدیم (SAR) همبستگی مثبت و معنی‌داری با غلظت سدیم (Na) نشان می‌دهد که به دلیل ماهیت محاسباتی این شاخص، منطقی است. این همبستگی قوی، تأکیدی بر این واقعیت است که میزان سدیم قابل جذب، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده سدیمی بودن خاک در این مناطق است و مدیریت آن باید در اولویت قرار گیرد. از سوی دیگر، روابط بین اسیدیته (pH) و سایر پارامترها عمدتاً ضعیف و غیرمعنی‌دار است. به عنوان مثال، همبستگی pH با شوری (۰/۱۵-) یا با کلسیم (۰/۱۸-) ناچیز و فاقد اعتبار آماری است. این یافته حائز اهمیت است، چرا که نشان می‌دهد تغییرات در شوری یا غلظت کاتیون‌ها، تأثیر خطی و قابل پیش‌بینی بر اسیدیته خاک ندارد و برای تنظیم pH خاک، ممکن است به راهکارهای مجزایی نیاز باشد. همچنین، ماده آلی (OC) نیز همبستگی‌های بسیار ضعیفی با سایر عوامل دارد. به عنوان مثال، همبستگی آن با شوری (۰/۰۵) یا با کلسیم (۰/۳۶-) غیرمعنی‌دار است.

جدول ۲. مقایسه میانگین عناصر خاک مناطق کشت زعفران شهرستان گناباد

Table 2. Comparison of means for soil elements in saffron cultivation areas of Gonabad County

مناطق کشت زعفران Saffron cultivation areas	میانگین مربعات Mean squares											
	اسیدیته pH	شوری EC	درصد اشباع SP	نسبت جذب سدیم SAR	کلسیم Ca	منیزیم Mg	نیتروژن N	پتاسیم K	کربنات بیکربنات HCO_3	آهک $CaCO_3$	گچ Gyp	ماده آلی OC
منطقه ۱ Zone 1	8.0875[a]	2.585[b]	36.175[a]	6.01[b]	8.275[b]	3.175[b]	14.6[b]	0.185[a]	5.3[b]	19.5[a]	1.1925[a]	0.135[a]
منطقه ۲ Zone 2	8.2675[a]	2.665[b]	41.225[a]	7.3[a]	6.625[c]	3.45[b]	16.35[b]	0.175[a]	4.55[b]	20.425[a]	1.15[a]	0.125[a]
منطقه ۳ Zone 3	8.115[a]	5.4425[a]	37.525[a]	7.2875[a]	17.4[a]	10.7[a]	26.825[a]	0.3125[a]	7.2[a]	20.375[a]	1.0175[a]	0.155[a]

حروف مشابه در هر ستون، نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد در بین میانگین تیمارهاست

Similar letters in each column indicate no significant difference among the mean treatments at the 5% probability level.

این نتیجه‌گیری بیانگر این است که مدیریت ماده آلی در خاک، به صورت مستقل از مدیریت شوری و سدیم عمل می‌کند و بهبود یکی لزوماً به بهبود دیگری منجر نخواهد شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که یک رویکرد مدیریتی موفق برای زعفران‌کاری در گناباد باید یکپارچه باشد، اما در عین حال بر اساس اولویت‌بندی علمی صورت پذیرد. به این معنی که با توجه به همبستگی‌های قوی، راهکارهایی که به بهبود شوری، نسبت جذب سدیم، و غلظت کاتیون‌های اصلی می‌پردازند، می‌توانند به‌طور هم‌زمان بر چندین مشکل تأثیر بگذارند؛ در حالی که برای بهبود پارامترهایی نظیر اسیدیته و ماده آلی، راهبردهای اختصاصی و مستقل مورد نیاز است. در نهایت، این ماتریس همبستگی، ابزار ارزشمندی برای درک عمیق‌تر از دینامیک خاک در این منطقه و طراحی برنامه‌های مدیریتی هدفمند برای افزایش پایداری و بهره‌وری تولید زعفران فراهم می‌آورد (جدول ۳).

تغییرات پارامترهای خاک در سه منطقه تأثیر قابل توجهی بر عملکرد زعفران داشت. منطقه ۲ با بالاترین عملکرد (۵/۹۸ kg/ha) خاک سبک‌تر، قلیایی‌تر و کم‌شورتر داشت که با همبستگی‌های مثبت(r=۰) pH ، SP(r=۰/۶۶) و Gyp(r=۰/۷۷) و رگرسیون خطی(R^2=۰/۴۴-۰/۵۹) همخوانی دارد و شرایط بهینه برای زعفران را نشان می‌دهد. در مقابل، منطقه ۳ با پایین‌ترین عملکرد (۲.۰۹ کیلوگرم در هکتار) شوری و مواد آلی بالاتری داشت که با همبستگی‌های منفی قوی EC، Ca، Mg، Na، K، HCO_3 و OC (۰/۹۹- - r= - ۰/۸۳ و ۰/۹۸ -R^2=۰/۶۹) مرتبط است و احتمالاً به دلیل استرس اسمزی و کاهش جذب مواد مغذی ایجاد شده است. منطقه ۱ با عملکرد متوسط (۴.۲۶ کیلوگرم در هکتار) شرایط متوسطی داشت. SAR و $CaCO_3$ (R^2≈0 ،r≈0) هم تأثیر ناچیزی داشتند (جدول۴).

جدول ۳. ضرایب همبستگی ساده (پیرسون) مقدار پارامترهای مختلف عناصر خاک مناطق کشت زعفران شهرستان گناباد

Table 3. Pearson's simple correlation coefficients for various soil parameters in saffron-growing areas of Gonabad County

	اسیدیته pH	شوری EC	درصد اشباع SP	نسبت جذب سدیم SAR	کلسیم Ca	منیزیم Mg	نیتروژن N	پتاسیم K	کربنات بیکربنات Hco3	آهک caco3	گچ Gyp	ماده آلی OC
اسیدیته pH	1											
شوری EC	-0.015	1										
درصد اشباع SP	0.605	-0.035	1									
نسبت جذب سدیم SAR	0.362	0.474	0.630	1								
کلسیم Ca	-0.181	0.943	-0.296	0.272	1							
منیزیم Mg	-0.140	0.950	-0.192	0.446	0.965	1						
نیتروژن N	-0.085	0.949	-0.059	0.584	0.923	0.982	1					
پتاسیم K	0.040	0.634	-0.400	0.121	0.720	0.665	0.616	1				
کربنات بیکربنات HCO_3	0.148	0.879	-0.177	0.175	0.860	0.830	0.774	0.639	1			
آهک $caco_3$	0.811	0.273	0.485	0.400	0.192	0.217	0.224	0.333	0.400	1		
گچ Gyp	0.461	-0.561	0.235	-0.441	-0.564	-0.684	-0.684	-0.290	-0.316	0.169	1	
ماده آلی OC	-0.577	0.502	-0.105	0.222	0.482	0.435	0.490	0.091	0.178	-0.526	-0.416	1

همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنادار است

The correlation is significant at the 0.01 level.

همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنادار است

The correlation is significant at the 0.05 level.

جدول ۴. همبستگی و اثر پارامترهای خاک بر عملکرد زعفران در سه منطقه

Table 3. Correlation and effect of soil parameters on saffron yield across three regions

عناصر Parameter	منطقه ۱ (عملکرد: ۴.۲۶) Region 1 (Yield: 4.26)	منطقه ۲ (عملکرد: ۵.۹۸) Region 2 (Yield: 5.98)	منطقه ۳ (عملکرد: ۲.۰۹) Region 3 (Yield: 2.09)	همبستگی Correlation (r)	R^2	اثر تغییرات Effect of Changes
PH	8.09	8.27	8.12	0.74	0.55	افزایش در منطقه ۲، بهبود عملکرد Increase in Region 2, improved yield
EC	2.59	2.67	5.44	-0.89	0.79	افزایش در منطقه ۳، کاهش عملکرد Increase in Region 3, reduced yield
SP	36.18	41.23	37.53	0.66	0.44	افزایش در منطقه ۲، بهبود عملکرد Increase in Region 2, improved yield
SAR	6.01	7.30	7.29	-0.06	0.00	اثر ناچیز Negligible effect
Ca	8.28	6.63	17.40	-0.95	0.90	افزایش در منطقه ۳، کاهش عملکرد Increase in Region 3, reduced yield
Mg	3.18	3.45	10.70	-0.88	0.77	افزایش در منطقه ۳، کاهش عملکرد Increase in Region 3, reduced yield
Na	14.60	16.35	26.83	-0.83	0.69	افزایش در منطقه ۳، کاهش عملکرد Increase in Region 3, reduced yield
K	0.19	0.18	0.31	-0.92	0.84	افزایش در منطقه ۳، کاهش عملکرد Increase in Region 3, reduced yield
HCO_3	5.30	4.55	7.20	-0.98	0.97	افزایش در منطقه ۳، کاهش عملکرد Increase in Region 3, reduced yield
$CaCO_3$	19.50	20.43	20.38	-0.02	0.00	ثر ناچیز Negligible effect
Gyp	1.19	1.15	1.02	0.77	0.59	افزایش در مناطق ۱ و ۲، بهبود عملکرد Increase in Regions 1 & 2, improved yield
OC	0.14	0.13	0.16	-0.99	0.98	افزایش در منطقه ۳، کاهش عملکرد Increase in Region 3, reduced yield

نتایج این پژوهش با بررسی ویژگی‌های شیمیایی خاک در سه منطقه متمایز شهرستان گناباد (مرکزی، کاخک-کلات، و پسکلوت) نشان داد که شوری خاک (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، و غلظت کاتیون‌های کلسیم و منیزیم از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر عملکرد زعفران هستند. این یافته‌ها با مطالعات قبلی همخوانی دارد، به‌ویژه با گزارش‌های رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2023) که نشان دادند شوری بیش‌ازحد خاک و SAR بالا می‌توانند با ایجاد فشار اسمزی و اختلال در جذب مواد غذایی، عملکرد کلاله زعفران را کاهش دهند. در منطقه پسکلوت، با میانگین شوری ۵/۴۴ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و ۷/۲۹SAR ، این چالش‌ها به‌وضوح برجسته هستند، که با نتایج شاهنده (Shahandeh, 1989) در مورد تأثیر منفی شوری خاک بر رشد زعفران در گناباد هم‌راستا است. این شرایط نامطلوب در منطقه پسکلوت احتمالاً به دلیل تجمع نمک‌های محلول ناشی از آبیاری با آب‌های شور و زهکشی ضعیف است، که ضرورت مداخلات فوری برای مدیریت خاک و آب را نشان می‌دهد.

تحلیل همبستگی پیرسون در این مطالعه روابط قوی و معنی‌دار ($p< 0.01$) بین شوری و کاتیون‌های کلسیم ($r= 0.943$)، منیزیم ($r= ۰/۹۵۰$) و سدیم ($r= ۰/۴۷۴$

با SAR) را تأیید کرد. این نتایج با یافته‌های(Ghaffari et al. 2020) مطابقت دارد، که نشان دادند افزایش غلظت کاتیون‌های اصلی در خاک‌های شور می‌تواند تعادل غذایی گیاه را مختل کند. این وابستگی متقابل، پیچیدگی مدیریت خاک در مناطق خشک را نشان می‌دهد، زیرا اصلاح یک پارامتر (مانند شوری) می‌تواند بر سایر ویژگی‌های خاک تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، استفاده از گچ کشاورزی برای کاهش SAR، همان‌طور که در مطالعات جهانبان و همکاران (Jahanban et al., 2022) پیشنهاد شده، می‌تواند به بهبود نفوذپذیری خاک و کاهش اثرات منفی سدیم کمک کند. بااین‌حال، این مداخله باید با احتیاط انجام شود، زیرا افزایش کلسیم ممکن است بر تعادل سایر کاتیون‌ها تأثیر بگذارد، همان‌طور که در این مطالعه با همبستگی بالای کلسیم و منیزیم (r= ۰/۹۶۵) مشاهده شد.

در مقابل، پارامترهایی مانند اسیدیته (pH)، درصد اشباع، ماده آلی، و پتاسیم تفاوت معنی‌داری بین منطقه‌ها نشان ندادند (<۰/۰۵p)، که با یافته‌های مونشی (Munshi, 1994) و پینامونتی (Pinamonti, 1998) هم‌خوانی دارد. این مطالعات نشان دادند که ماده آلی خاک، اگرچه برای بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب حیاتی است، ممکن است در مناطق خشک به دلیل تجزیه سریع، تفاوت‌های منطقه‌ای قابل‌توجهی ایجاد نکند. این یکنواختی نسبی امکان طراحی راهبردهای یکپارچه برای بهبود ماده آلی در کل شهرستان گناباد را فراهم می‌کند. برای مثال، کاربرد کودهای آلی و کمپوست، همان‌طور که بهدانی و همکاران (Behdani et al., 2005) و جهانبان و همکاران (Jahanban et al., 2022) گزارش کردند، می‌تواند به افزایش ماده آلی و بهبود عملکرد زعفران در منطقه‌های مرکزی و کاخک-کلات کمک کند، جایی که شوری خاک چالش کمتری ایجاد می‌کند.

مدیریت آبیاری، به‌عنوان یکی دیگر از عوامل کلیدی، نقش مهمی در کاهش اثرات شوری و بهبود عملکرد زعفران ایفا می‌کند. موسوی و کرمی (Mousavi & Karami, 2021) نشان دادند که برنامه‌ریزی دقیق آبیاری، به‌ویژه در مرحله گل‌دهی، می‌تواند اثرات منفی شوری را کاهش دهد. این یافته با نتایج علیزاده و همکاران (Alizadeh et al., 2009) هم‌راستا است، که زمان‌بندی بهینه آبیاری را برای بهبود گل‌دهی زعفران در مناطق خشک پیشنهاد کردند. در منطقه پسکلوت، استفاده از فناوری‌های آبیاری کم‌آب‌بر، مانند آبیاری قطره‌ای، می‌تواند به کاهش تجمع نمک در خاک کمک کند. علاوه بر این، پهنه‌بندی مبتنی بر GIS، همان‌طور که حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2024) پیشنهاد کردند، امکان شناسایی دقیق مناطق با شوری بالا و تخصیص منابع آبی بهینه را فراهم می‌کند، که برای مدیریت هدفمند منطقه پسکلوت حیاتی است.

از منظر تکنیک‌های کاشت، نتایج نادری درباغشاهی و همکاران (Naderi Darbaghshahi et al., 2008) نشان داد که تراکم کاشت بالا و عمق کاشت ۲۰ سانتی‌متر می‌تواند عملکرد زعفران را بهبود بخشد. این یافته برای منطقه‌های مرکزی و کاخک-کلات، که شرایط خاک مناسب‌تری دارند، قابل‌اجرا است. بااین‌حال، در منطقه پسکلوت، چالش‌های شوری و سدیمی بودن خاک ممکن است اثربخشی این روش‌ها را محدود کند، مگر اینکه با اقدامات اصلاحی خاک ترکیب شوند. مطالعه کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2014) نیز تأکید کرد که ترکیب تناوب زراعی با محصولات کم‌آب‌بر و استفاده از کودهای زیستی می‌تواند پایداری تولید زعفران را در مناطق خشک افزایش دهد، که برای گناباد نیز قابل‌کاربرد است.

از منظر حکمرانی و مدیریت منابع طبیعی، این پژوهش بر ضرورت یک چارچوب یکپارچه و داده‌محور تأکید دارد. شوری و سدیمی بودن خاک در منطقه پسکلوت نیازمند سیاست‌های فوری، از جمله سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های زهکشی و تنظیم مقررات برای کنترل کیفیت آب آبیاری است. مطالعه عزیزی زهان و همکاران (Azizi-Zohan et al., 2018) نشان داد که مدیریت دقیق منابع آب می‌تواند اثرات شوری را در مناطق خشک کاهش دهد، که برای منطقه پسکلوت بسیار مرتبط است. در منطقه‌های مرکزی و کاخک-کلات، سیاست‌های تشویقی مانند یارانه برای کودهای آلی و برنامه‌های آموزشی برای کشاورزان، همان‌طور که بهدانی و همکاران (Behdani et al., 2020) پیشنهاد کردند، می‌تواند به بهبود خاک و افزایش عملکرد کمک کند. تقویت همکاری بین نهادهای محلی، مراکز تحقیقاتی، و کشاورزان برای انتقال فناوری‌های نوین، مانند سیستم‌های آبیاری هوشمند و اصلاح‌کننده‌های زیستی، ضروری است.

علاوه بر این، استفاده از رویکردهای کشاورزی دقیق، مانند حسگرهای خاک و تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ، می‌تواند به پایش مستمر کیفیت خاک و بهینه‌سازی مدیریت منابع کمک کند. مطالعه فلاحی و همکاران (Fallahi et al., 2022) نشان داد که این فناوری‌ها می‌توانند بهره‌وری زعفران را در مناطق نیمه‌خشک تا ۲۰ درصد افزایش دهند. این رویکرد، همراه با ایجاد پایگاه‌های داده منطقه‌ای برای پایش شاخص‌های خاک و آب، می‌تواند تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را بهبود بخشد و پایداری بلندمدت تولید زعفران را تضمین کند. در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت تفکیک‌شده و منطقه‌محور، همراه با سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد علمی (Tamassoki et al.,2025)، کلید افزایش بهره‌وری و پایداری تولید زعفران در گناباد است. با اولویت‌بندی کاهش شوری در منطقه پسکلوت و تقویت ماده آلی در منطقه‌های مرکزی و کاخک-کلات، می‌توان معیشت کشاورزان را بهبود بخشید و اقتصاد محلی را تقویت کرد. این چارچوب نه‌تنها برای گناباد، بلکه برای سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک تولیدکننده زعفران نیز قابل‌تعمیم است، مشروط بر اینکه با شرایط محلی تطبیق داده شود.

نتیجه‌گیری

از منظر حکمرانی و مدیریت منابع طبیعی و کشاورزی، این یافته‌ها پیامدهای عمیقی برای سیاست‌گذاری هدفمند و پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارند. شوری و سدیمی بودن خاک در منطقه پسکلوت به‌عنوان یک مانع اصلی برای تولید زعفران، نیازمند مداخلات مدیریتی فوری و تخصصی است. این مداخلات شامل اصلاح خاک با استفاده از گچ کشاورزی برای کاهش SAR، بهبود سیستم‌های زهکشی برای کنترل شوری، و توسعه فناوری‌های آبیاری کم‌آب‌بر نظیر آبیاری قطره‌ای است. این اقدامات باید در چارچوب سیاست‌های کلان مدیریت منابع آب و خاک اجرا شوند تا از تخریب بلندمدت منابع طبیعی جلوگیری کرده و پایداری تولید زعفران تضمین شود. در منطقه‌های مرکزی و کاخک-کلات، که شرایط خاک مناسب‌تری دارند، تمرکز بر افزایش ماده آلی از طریق کاربرد کودهای آلی، کمپوست و تناوب زراعی می‌تواند عملکرد زعفران را بهبود بخشد. این امر مستلزم سیاست‌های تشویقی نظیر یارانه برای تولید و توزیع کودهای آلی، تسهیل دسترسی به منابع زیستی، و آموزش کشاورزان در زمینه مدیریت پایدار خاک است. مدیریت منابع طبیعی در گناباد باید بر اساس یک رویکرد تفکیک‌شده و داده‌محور طراحی شود، زیرا تفاوت‌های منطقه‌ای در ویژگی‌های خاک، امکان اعمال یک راهبرد واحد را محدود می‌کند. استفاده از ابزارهای کشاورزی دقیق، مانند پهنه‌بندی مبتنی بر GIS، می‌تواند به شناسایی دقیق نواحی پرخطر و اولویت‌بندی مداخلات کمک کند. برای مثال، در منطقه پسکلوت، سیاست‌گذاران باید بر نظارت مستمر کیفیت آب و خاک، تنظیم مقررات سخت‌گیرانه برای جلوگیری از استفاده از آب‌های شور، و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های زهکشی تمرکز کنند. در مقابل، در منطقه‌های مرکزی و کاخک-کلات، برنامه‌های آموزشی برای ترویج روش‌های کشاورزی پایدار و افزایش آگاهی کشاورزان از اهمیت ماده آلی و مدیریت نیتروژن ضروری است. این رویکرد نیازمند هماهنگی بین نهادهای محلی، از جمله سازمان جهاد کشاورزی، مراکز تحقیقاتی و تعاونی‌های کشاورزی، برای انتقال دانش و فناوری‌های نوین است. از منظر حکمرانی، تقویت همکاری بین ذی‌نفعان مختلف، از جمله کشاورزان، محققان و سیاست‌گذاران، برای ایجاد یک نظام مدیریت یکپارچه منابع طبیعی حیاتی است. این نظام باید بر اصول پایداری، بهره‌وری و انصاف مبتنی باشد و شامل مکانیزم‌هایی برای ارزیابی مستمر اثرات سیاست‌ها و مداخلات باشد. برای مثال، ایجاد پایگاه‌های داده منطقه‌ای برای پایش شاخص‌های خاک و آب، همراه با برنامه‌های مشارکتی با کشاورزان برای آزمایش روش‌های نوین مدیریت خاک، می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی کمک کند. علاوه بر این، با توجه به نقش زعفران به‌عنوان محصولی استراتژیک در اقتصاد محلی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های کشاورزی، مانند آزمایشگاه‌های تجزیه خاک و سیستم‌های آبیاری هوشمند، باید در اولویت سیاست‌گذاری قرار گیرد. در نهایت، این پژوهش بر ضرورت یک چارچوب حکمرانی یکپارچه، علمی و منطقه‌محور برای مدیریت منابع طبیعی و کشاورزی در گناباد تأکید دارد. با تمرکز بر کاهش شوری و سدیمی بودن خاک در منطقه‌های پرچالش و تقویت ماده آلی و

مدیریت نیتروژن در منطقه‌های با پتانسیل بالاتر، می‌توان بهره‌وری و پایداری تولید زعفران را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. این چارچوب نه‌تنها به بهبود معیشت کشاورزان و تقویت اقتصاد محلی کمک می‌کند، بلکه با حفاظت از منابع طبیعی، آینده تولید زعفران را در اکوسیستم‌های شکننده خشک و نیمه‌خشک تضمین می‌کند.

منابع

Aghhavani-Shajari, M., Fallahi, H. R., & Behdani, M. A. (2021). Soil organic matter and its role in saffron productivity under semi-arid conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21*(3), 1897–1908. [in persian].

Ahmadi, M., Fallahi, H. R., & Aghhavani-Shajari, M. (2021). Saffron cultivation under environmental stress: Challenges and opportunities in arid regions. *Journal of Agricultural Science and Technology, 23*(4), 789–802. [in Persian].

Alizadeh, A., Sayyari, N., Ahmadian, J., & Mohammadian, A. (2009). Determining the optimal irrigation start time for saffron cultivation in Khorasan Razavi, North, and South Provinces. Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology), 23(1), 109–118. [in Persian].

Aminifard, M. H., Khaksari Moghadam, ́., Bayat, H. and Fallahi, H. (2023). The Effect of Potassium Sulfate and Seaweed on Vegetative Growth and Yield of Saffron (*Crocus sativus* L.). Journal of Saffron Research, 11(2), 274-268. [in Persian].

Azizi-Zohan, A., Kamgar-Haghighi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2018). Water management strategies for improving saffron productivity in saline soils of semi-arid regions. *Agricultural Water Management, 209*, 145–156. [in Persian].

Behdani, M. A., Fallahi, H. R., & Jahan, M. (2020). Long-term effects of organic and inorganic fertilizers on saffron yield and corm production. *Agronomy Journal, 112*(6), 5123–5135. [in persian]

Behdani, M. A., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Rezvani Moghaddam, P. (2005). Evaluation of quantitative relationships between saffron yield and nutrient uptake: A case study in farmers' fields. *Iranian Journal of Agricultural Research, 3*(1), 33–42. [in Persian].

Behnia, M. R. (1991). Saffron cultivation. University of Tehran Press. [in Persian].

Cardone, L., Castronuovo, D., Perniola, M., Cicco, N., & Candido, V. (2020). Saffron (Crocus sativus L.) cultivation in semi-arid Mediterranean environments: Effects of soil and climatic conditions on yield and quality. *Industrial Crops and Products, 151*, 112467. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112467

Fallahi, H. R., Aghhavani-Shajari, M., & Behdani, M. A. (2022). Precision agriculture technologies for sustainable saffron production in arid environments. *Journal of Cleaner Production, 369*, 133245. [in persian]

FAO. (2023). Global saffron production statistics 2023. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/statistics/en/

Ghaffari, A., Shahidi, A., & Mousavi, S. R. (2020). Soil fertility management for sustainable saffron production in Iran. *Soil Science Annual, 71*(3), 245–253. [in Persian].

Ghalavand, A., & Abdollahian Noghabi, M. (1994). Ecological adaptation and the effect of planting distance and method on the performance of different saffron populations in Iran. Abstracts of the Second Saffron and Medicinal Plants Conference, Gonabad, November 17–18. [in Persian].

Gholami Sharafkhane, M., Ziaei, A. N., Naghedifar, S. M. and Akbari, A. (2025). Investigation of the effect of soil salinity and water quality on saffron daughter corms using crop modeling and measured data. *Water and Soil Management and Modelling, 5*(1), 317-334. [in Persian].

Hatefi Farajian, M. H., Rezvani Moghaddam, P. and Khorramdel, S. (2023). Investigating the Situation of Saffron Farmers and Agricultural Factors Effective in Saffron Yield in Khorasan Provinces. Journal of Saffron Research, 11(2), 380-362. [in Persian].

Hosseini, S. M., Rahimi, M., & Ghaffari, M. (2024). Geospatial analysis of soil variability for precision saffron farming in semi-arid regions. *Precision Agriculture, 25*(2), 678–692. https://doi.org/10.1007/s11119-023-09987-4. [in Persian].

Jahanban, L., Mousavi, S. H., & Rezaei, M. (2022). Organic amendments improve soil health and saffron yield in arid environments. *Journal of Arid Land, 14*(5), 567–579. [in Persian].

Klute, A. (Ed.). (1986). Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods (2nd ed.). American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc.

Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., & Fallahi, H. R. (2014). Effects of crop rotation and biofertilizers on saffron yield and soil sustainability in arid regions. *Agroecology and*

Sustainable Food Systems, 38(6), 678–695. [in Persian].

Lage, M., & Cantrell, C. L. (2009). Quantification of saffron (*Crocus sativus* L.) metabolites crocins, picrocrocin and safranal for quality determination of the spice grown under different irrigation water salinity levels. *Planta Medica, 75*(15), 1629–1635. https://doi.org/10.1055/s-0029-1185979

Mao, D., Riesbeck, F., Khodabakhshi, H. R., & Mahjoobi, A. (2025). The impacts of irrigation and groundwater drainage induced salinity and overflooding of evaporation ponds in Khuzestan, Iran. *Frontiers in Water, 7*, 1266089. doi: 10.3389/frwa.2025.1266089

Marg, O. P., & Hauz, K. (1999). Standard analytical procedures for water analysis. Laboratory Manual, Hydrology Project, Government of India & Government of The Netherlands.

Momeni Damaneh, J., Ahmadi, J. and Jafarpour Chekab, Z. (2023). Identification of Suitable Areas for Cultivation of Saffron (*Crocus sativus* L.) Using Artificial Intelligence-Based Models in Khorasan Razavi Province. *Journal of Saffron Research, 11*(2), 328-345. [in Persian].

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2019). Applied statistics and probability for engineers (7th ed.). Wiley.

Mousavi, S. R., & Karami, A. (2021). Optimizing irrigation strategies for saffron under saline soil conditions. *Irrigation Science, 39*(4), 453–465. [in Persian].

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. Annu. Rev. *Plant Biol., 59*(1), 651-681. doi:10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

Munshi, A. M. (1994). Effect of N and K on the floral yield and corm production in saffron under conditions. *Indian Arecanut and Spices Journal, 18*, 24–44.

Nabipour, Z. and Tavakkoli-kakhki, H. (2024). Studying the Effect of Density and Covering on Corm Behavior and Economic Yield of Saffron (Crocus.sativus) (Case Study: Gonabad). Journal of Saffron Research, 12(2), 346-361. [in Persian].

Naderi Darbaghshahi, M., Khajeh Bashi, S. M., Bani Taba, S. A., & Dehdashti, S. M. (2008). Effect of planting method, density, and depth on yield and exploitation period of saffron fields in Isfahan region. *Seed and Plant, 24*(4), 643–657. [in Persian].

Negbi, M. (1999). Saffron cultivation: Past, present, and future prospects. In M. Negbi (Ed.), Saffron: Crocus sativus L. (pp. 1–18). Harwood Academic Publishers. [in Persian].

Pinamonti, F. (1998). Compost mulch effects on soil fertility, nutritional status, and performance of grapevine. *Nutrient Cycling in Agroecosystems, 51*, 239–248. https://doi.org/10.1023/A:1009750716866

Rezaei, M., Ghaffari, A., & Jahanban, L. (2023). Soil salinity and sodicity effects on saffron physiological performance and yield. *Plant and Soil, 486*(1–2), 321–335. [in Persian].

Sadeghi, B. (1993). Effect of corm weight on saffron flowering. Publications of the Scientific and Industrial Research Organization of Iran, Khorasan Center. [in Persian].

Sadeghi, S. H., Ghasemieh, H., Moemeni Damaneh,. J. and Mosavi, S. H. (2016). Irrigation and municipal water quality zoning by GIS. Irrigation and Water Engineering, 6(4), 128-137. [in Persian].

Shahandeh, H. (1989). Evaluation of physical and chemical properties of soils under saffron cultivation in Gonabad. Publications of the Scientific and Industrial Research Organization of Iran, Khorasan Center.

Shariati, V., Behdani, M. A., & Mousavi, S. R. (2025). Soil sodicity impacts on saffron corm health and stigma quality in Khorasan Razavi. *Journal of Crop Improvement, 39*(1), 45–60. [in Persian].

Tamassoki, E. , Momeni Damaneh, J. and Tajbakhsh Fakhrabadi, S. M. (2025). Analysis of Natural Resource Governance in Iran Based on the NRGF Framework. *Water Harvesting Research, 8*(1), 141-162. doi: 10.22077/jwhr.2025.9622.1179

Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5(2), 99-14.