

آب و خاک

نشریه

(علوم و صنایع کشاورزی)



جلد ۳۹ شماره ۵

سال ۱۴۰۴

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

شماره پیاپی ۱۰۳

عنوان مقالات

- مقایسه اثر آبیاری قطره‌ای پیوسته و پالسی بر عملکرد، اجزای عملکرد و پارامترهای کیفی کینوای علوفه‌ای در شرایط تنش شوری و آبی ۴۳۳
حلیمه پیری - جلال غریبوند نوترکی - پرویز حقیقت جو
- تأثیر کاربرد کود میلورم و محلول پاشی لیگنوسولفونات روی بر عملکرد و برخی ویژگی‌های دانه گیاه ماش سبز (*Vigna radiata*) ۴۵۱
نیلوفر میرزابابایی - اکبر حسنی - محمد بابا اکبری ساری - احمد گلچین
- مطالعه غلظت استات آمونیوم بر پتاسیم عصاره‌گیری شده در تعدادی از خاک‌های آهکی ۴۶۷
مرضیه براتی - علیرضا حسین پور - محمد حسن صالحی - اعظم جعفری
- استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در برآورد فرسایش خاک با مدل RUSLE در بخشی از اراضی مرکز ایران ۴۸۱
محمد سجاد قوامی - شمس الله ایوبی
- بهره‌وری آب ارقام تجاری گندم نان در اقلیم گرم و خشک جنوب ۵۰۱
منصور معیری - سید محمود طیب غفاری - محسن اسماعیل زاده مقدم
- کاهش مصرف کود فسفر و افزایش عملکرد کنگد با به‌کارگیری رقم مناسب در خاک‌های آهکی جنوب فارس ۵۱۷
فریدون نورقلی پور - مجید رجایی

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه 1368/4/11 و درجه علمی-پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 39 شماره 5 آذر - دی سال 1404

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال 1398، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولیزاده

سر دبیر:

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، امریکا)

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 ومهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوئیان، 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. 91775-1163 - دبیرخانه نشریات علمی- نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jsa3@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 (شی شماره در سال) منتشر می‌شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 433 مقایسه اثر آبیاری قطره‌ای پیوسته و پالسی بر عملکرد، اجزای عملکرد و پارامترهای کیفی کینوای علوفه‌ای در شرایط تنش شوری و آبی
حلیمه پیری - جلال غریبوند نوترکی - پرویز حقیقت جو
- 451 تأثیر کاربرد کود میلووم و محلول پاشی لیکنوسولفونات روی بر عملکرد و برخی ویژگی‌های دانه گیاه ماش سبز (*Vigna radiata*)
نیلوفر میرزا بابایی - اکبر حسنی - محمد بابا اکبری ساری - احمد گلچین
- 467 مطالعه غلظت استات آمونیوم بر پتاسیم عصاره‌گیری شده در تعدادی از خاک‌های آهکی
مرضیه براتی - علیرضا حسین پور - محمد حسن صالحی - اعظم جعفری
- 481 استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در برآورد فرسایش خاک با مدل RUSLE در بخشی از اراضی مرکز ایران
محمد سجاد قوامی - شمس الله ایوبی
- 501 بهره‌وری آب ارقام تجاری گندم نان در اقلیم گرم و خشک جنوب
منصور معیری - سید محمود طبیب غفاری - محسن اسماعیل‌زاده مقدم
- 517 کاهش مصرف کود فسفر و افزایش عملکرد کنگد با به کارگیری رقم مناسب در خاک‌های آهکی جنوب فارس
فریدون نورقلی پور - مجید رجایی

Research Article

Vol. 39, No. 5, Dec. 2025-Jan. 2026, p. 431-448

Comparison of Continuous and Pulsed Drip Irrigation Effects on the Quantitative and Qualitative Yield of Forage Quinoa under Salinity and Water Stress Conditions

H. Piri^{1*}, J. Gharibvandnotorki¹, P. Haghighatjoo¹

1- Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

(*- Corresponding Author Email: h_piri2880@uoz.ac.ir)

Received: 18 May 2025

Revised: 01 November 2025

Accepted: 11 November 2025

Available Online: 02 November 2025

How to cite this article:Piri, H., Gharibvandnotorki, J., & Haghighatjoo, P. (2026). Comparison of continuous and pulsed drip irrigation effects on the quantitative and qualitative yield of forage Quinoa under salinity and water stress conditions. *Journal of Water and Soil*, 39(5), 431-448. (In Persian with English abstract).<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93595.1482>

Introduction

Due to Iran's geographical location and climatic conditions, the quantity and quality of water resources are considered one of the limiting factors for agriculture in this country. Droughts in the last two decades, on the one hand, and lack of attention to the optimal use and proper exploitation of water, on the other hand, have exacerbated the water crisis in Iran. For this reason, the agricultural sector has witnessed serious developments and new perspectives on the rational exploitation of water resources, limited irrigation shortages, the use of saline water resources in agriculture, changing irrigation systems, and cultivating water-intensive plants over the same period. Quinoa has been introduced as a forage crop for ensuring food security in the world, which can tolerate drought stress conditions to some extent. However, the development of its cultivation under drought stress conditions in Khuzestan Province should be based on determining the limits of irrigation water quantities and determining its tolerance to salinity.

Material and Methods

The present study was conducted to investigate the effect of different amounts of irrigation water and different levels of salinity on quantitative and qualitative parameters of quinoa. To carry out the work, quinoa was cultivated under drip and pulsed drip irrigation. The treatments studied included irrigation water quantity (I1: 60, I2: 80 and I3: 100% of field capacity), water quality (F (fresh): 0.5 and S (saline): 6 dS/m), and two irrigation managements: continuous drip (C) and pulsed drip (P). At the end of the growing season, sampling was performed to determine quantitative plant characteristics such as height, stem diameter, leaf area index, root length, root volume, fresh and dry root weight, and fresh and dry forage yield. Also, to investigate the effect of treatments on quinoa forage quality, qualitative parameters including leaf chlorophyll a and b content, leaf proline content, total digestible nutrients (TDN), crude protein (CP), Neutral detergent fiber (hemicellulose and lignin) (NDF), and Acid detergent fiber (hemicellulose-free cell wall) (ADF) percentage were measured. To investigate the distribution of salinity in the soil profile during and at the end of the growing season compared to its beginning, soil samples were taken from dug profiles in the center of all experimental plots at depths of 0-30 cm and 30-60 cm. These samples were transferred to the laboratory and saturated extraction was prepared from them. Then, the electrical conductivity of these samples was determined using an EC meter. All data collected from the experiment were entered into EXCEL 2019 software. After categorizing the data, SAS 9.1 software was used to analyze them. Data analysis of variance was performed at the 5% and 1% significance levels, and then means were compared using Duncan's multiple

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.2025.93595.1482>

range test.

Result

The results showed that the treatments of continuous drip irrigation with fresh water at 100% depth, and pulsed drip irrigation at 100% depth (first, second and, third pulses of fresh water) had the highest quantitative traits. Continuous drip irrigation with fresh water at 80% depth, and pulsed drip irrigation at 80% depth (first, second and, third pulses of fresh water) also had high quantitative traits. The highest values of plant height, stem diameter, leaf area index, fresh biomass, and dry biomass were 94 cm, 1.10 mm, 23.152 cm², 25.31420, and 14.8256 tons per hectare, respectively, which were obtained from the continuous drip irrigation treatment at 100% of the plant's water requirement using fresh water. In these treatments, the final soil salinity was close to the initial salinity at the time of the experiment, and the highest amounts of chlorophyll a and b and carotenoids were also observed. The TDN and ADF values were high in two treatments: continuous drip irrigation with fresh water and 100% depth, and pulsed drip irrigation and 100% depth (first, second and, third pulse of fresh water). However, these treatments had low soluble sugar, proline, and protein levels. Applying saline water alone or in combination with sweet pulses and water stress in treatments 2, 4, and 12- 30 increased the quality of the produced forage (due to high soluble sugar, proline, and protein). The highest water use efficiency was obtained from treatment 26, which included pulsed drip irrigation and a depth of 60% (first pulse of fresh water, second pulse of saline water, third pulse of fresh water).

Conclusion

Therefore, considering that both water use efficiency and quality are important in forage production, it is recommended to use this treatment under conditions of saline water and pulsed drip irrigation.

Keywords: Chlorophyll a and b, Crude protein, Total digestible nutrients, Water productivity

مقایسه اثر آبیاری قطره‌ای پیوسته و پالسی بر عملکرد، اجزای عملکرد و پارامترهای کیفی کینوای علوفه‌ای در شرایط تنش شوری و آبی

حلیمه پیری^{۱*} - جلال غریبوند نوترکی^۱ - پرویز حقیقت جو^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

چکیده

کینوا یکی از گیاهان زراعی علوفه‌ای برای تأمین امنیت غذایی در جهان معرفی شده است که شرایط تنش آبی و خشکی را تا حدودی می‌تواند تحمل کند. لیکن، توسعه کشت آن در شرایط تنش آبی و خشکی در استان خوزستان می‌بایست براساس تعیین حدود مقادیر آب آبیاری و تعیین تحمل آن به مقدار شوری باشد. پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف آب آبیاری و سطوح مختلف شوری بر پارامترهای کمی و کیفی گیاه کینوا، انجام شد. برای انجام کار، گیاه کینوا تحت آبیاری قطره‌ای و به صورت پالسی کشت گردید. تیمارهای مورد پژوهش شامل مقدار آب آبیاری (I1: ۶۰، I2: ۸۰ و I3: ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، کیفیت آب (F (شیرین): ۰/۵ و S (شور): ۶ دسی‌زیمنس بر متر) و دو مدیریت آبیاری قطره‌ای پیوسته (C) و قطره‌ای پالسی (P) بود. در پایان فصل رشد به منظور تعیین خصوصیات کمی گیاه همچون ارتفاع، قطر ساقه، شاخص سطح برگ، طول ریشه، حجم ریشه، وزن تر و خشک ریشه و عملکرد تر و خشک علوفه نمونه برداری انجام شد. همچنین جهت بررسی تأثیر تیمارها بر کیفیت علوفه‌ای کینوا، پارامترهای کیفی شامل مقدار کلروفیل a و b برگ، محتوای پروتئین برگ، کل مواد مغذی قابل هضم (TDN)، درصد پروتئین خام (CP)، درصد دیواره سلولی (همی سلولز و لیگنین) (NDF) و درصد دیواره سلولی عاری از همی سلولز (ADF) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد تیمارهای آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۱۰۰ درصد، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۱۰۰ درصد (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین)، آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۸۰ درصد و آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۸۰ درصد (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین) بالاترین صفات کمی را داشتند. بیشترین مقدار ارتفاع، قطر ساقه، شاخص سطح برگ، وزن علوفه تر و خشک به ترتیب ۹۴ سانتی‌متر، ۱۰/۱ میلی‌متر، ۱۵۲/۲۳ سانتی‌متر مربع، ۳۱۴۲۰/۲۵ و ۸۲۵۶/۱۴ کیلوگرم در هکتار از تیمار آبیاری قطره‌ای پیوسته با ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و آبیاری با آب شیرین به دست آمد. در این تیمارها، شوری نهایی خاک نزدیک به شوری اولیه در زمان آزمایش بود و بیشترین مقدار کلروفیل a و b و کارتنوئید نیز مشاهده گردید. مقدار TDN و ADF در دو تیمار آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۱۰۰ درصد، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۱۰۰ درصد (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین) دارای مقادیر بالایی بود. با این وجود این تیمارها میزان قند محلول، پروتئین و پروتئین پایینی داشتند. اعمال آب شور به تنهایی یا ترکیب با پالس‌های شیرین و تنش آبی در تیمارهای شماره ۲، ۴ و ۱۲ الی ۳۰ سبب افزایش کیفیت علوفه تولیدی (به دلیل قند محلول، پروتئین و پروتئین بالا) شد. بالاترین مقدار بهره‌وری مصرف آب از تیمار ۲۶ که شامل آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۶۰ درصد (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شور، پالس سوم آب شیرین) به دست آمد. همچنین با توجه به اعمال آب شور در این تیمار کیفیت علوفه نیز بالا بود. لذا با توجه به این که در تولید محصولات علوفه‌ای هم بهره‌وری مصرف آب و هم کیفیت مورد توجه است، توصیه می‌شود در شرایط استفاده از آب شور و آبیاری قطره‌ای پالسی از این تیمار استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری مصرف آب، پروتئین خام، کلروفیل a و b، کل مواد مغذی قابل هضم

۱- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

(*) - نویسنده مسئول: h_piri2880@uoz.ac.ir (Email:)

مقدمه

کینوا (*Chenopodium quinoa*) گیاهی یک‌ساله و بومی آمریکای جنوبی است که در سال‌های اخیر در سایر کشورها نظیر ایران نیز به‌عنوان یک گیاه جدید کشت می‌شود. اهمیت این گیاه زراعی از نظر آبیاری کم و ارزش غذایی آن، سبب شده است کاشت آن در ایران مورد توجه قرار گیرد (Bagheri, 2018). کینوا به‌عنوان گیاهی متحمل به شوری و خشکی می‌تواند کمک شایانی به امنیت غذایی کند و تولید مواد غذایی و کشاورزی پایدار را در شرایط اقلیمی خاص ایران فراهم سازد. برخی محققان کشت کینوا در شرایطی که تنش شوری اعمال می‌شود را پیشنهاد کرده‌اند. زیرا این گیاه پایدار به شوری سبب تولید پایدار و افزایش درآمد کشاورزان در این مناطق می‌شود (Afsharmanesh et al., 2020). علی‌رغم اینکه گیاه کینوا نسبتاً به کم‌آبی و شوری مقاوم است، لیکن مدیریت زراعی مطلوب از جمله آبیاری به موقع و کافی و کیفیت آب آبیاری رابطه مستقیمی با عملکرد مطلوب و کیفیت محصول آن دارد (Jamali & Ansari, 2020). این گیاه زراعی در مرحله جوانه‌زنی و سبز شدن شدیداً به رطوبت خاک حساس است و برای حصول عملکرد مطلوب ضروری است که حتماً سطح مزرعه در این مدت مرطوب باشد. پس از جوانه‌زنی و سبز شدن، میزان نیاز آبی براساس تعیین رطوبت خاک برای در هر منطقه باید تعیین گردد (Bagheri, 2018). پس از استقرار گیاه، می‌توان تیمارهای کم‌آبی و شوری را در زراعت این گیاه اعمال کرد. تحقیقات انجام شده در ایران نشان داده است که برخی مناطق ایران برای کشت گیاه کینوا مناسب است و در آینده جایگاه قابل توجهی در زراعت کشور خواهد داشت (Afzalinejad et al., 2019) و می‌تواند جایگزینی مناسب برای گیاه پرآبر و حساس به شوری مثل برنج شود (Telahigue et al., 2010). محققین در تحقیق خود نشان دادند کینوا در شرایط گلخانه‌ای در منطقه سیستان شوری آب آبیاری ۴ دسی‌زیمنس بر متر و کم‌آبیاری تا سطح ۷۵ درصد را تحمل می‌کند بدون آن‌که تأثیر معنی‌داری بر عملکرد آن داشته باشد (Tourajzadeh et al., 2024). علی و همکاران (Aly et al., 2018) در تحقیق خود بیان داشتند کاربرد شوری و کم‌آبی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد، ریشه و وزن اندام هوایی کینوا در شرایط اقلیمی عربستان شد. در بررسی اثر تنش کم‌آبی دوره‌ای بر عملکرد گیاه کینوا در خوزستان نتایج نشان داد که روند افزایش عملکرد به ازاء آب مصرفی تا ۳۲۰۰ متر مکعب در هکتار صعودی بود. از ۳۲۰۰ تا ۴۰۰۰ متر مکعب در هکتار مصرف آب، عملکرد تقریباً ثابت و بیشینه بود (۳۶۵ کیلوگرم در هکتار). بیشترین کارایی مصرف آب (۱/۲۲) کیلوگرم در متر مکعب) با مصرف آب حدود ۲۴۰۰ متر مکعب در هکتار به‌دست آمد. از ۲۴۰۰ تا ۳۰۰۰ متر مکعب در هکتار مصرف آب، میزان کارایی مصرف آب ۱/۱۲ کیلوگرم در متر مکعب بود. این محققان بیان کردند که مصرف بیشتر آب موجب کاهش کارایی مصرف

آب شد. با وجود اینکه تنش کم‌آبی موجب افزایش کارایی مصرف آب در کشت کینوا شد اما در مدیریت کم‌آبیاری برای دستیابی به کارایی مناسب، علاوه بر حجم آب مصرفی باید به مرحله رشد گیاه نیز توجه نمود. در نهایت، نتایج نشان داد که در شرایط اقلیم استان خوزستان، دوره رشد اولیه و میانی حساس‌ترین دوره‌های رشد کینوا نسبت به تنش کم‌آبی بودند (Meskini Vishkaei et al., 2021). محققین به بررسی اثر اختلاط آب دریا و چاه بر عملکرد گیاه کینوا پرداختند. در تحقیق پنج سطح شوری ۰/۵، ۴/۳، ۸/۰، ۱۱/۸ و ۱۵/۵ دسی‌زیمنس مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین وزن هزاردانه، عملکرد دانه و سنبله در تیمار ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. در واقع افزایش شوری سبب کاهش برخی صفات رشد و عملکرد کینوا مانند وزن تر ساقه، برگ و سنبله، عملکرد دانه و سنبله، وزن هزار دانه، تعداد شاخه فرعی و سنبله شد. با این وجود این محققان دو تیمار ۴/۳ و ۸/۰ دسی‌زیمنس بر متر را به‌عنوان تیمارهای مناسب برای زراعت کینوا معرفی کردند زیرا کاهش وزن هزار دانه در این دو تیمار به‌ترتیب ۲۲/۹ و ۲۷/۱ درصد بود (Ghorbani & Jamali, 2021).

از آن‌جا که توسعه کشت محصولات زراعی و میزان عملکرد آن به آبیاری وابسته است و با توجه به این‌که خشکی از ویژگی‌های بارز کشور ما به‌حساب می‌آید، یکی از راهکارهای مقابله با این مشکلات، اجرای تحقیقات کاربردی در زمینه استفاده از منابع آبی نامتعارف (آب شور) است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از آب شور برای آبیاری رواج دارد و هر ساله به‌علت مدیریت نامناسب آبیاری با آب شور، بین یک یا دو درصد از زمین‌های فاریاب از بین می‌روند. البته استفاده از آب‌های شور و لب‌شور، مستلزم رعایت مدیریت‌های خاص در مزرعه می‌باشد. لذا توجه به راهکارهای استفاده بهینه از منابع آب شور و تلفیق آن‌ها با آب شیرین در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Ghaedi et al., 2015). یکی از این روش‌ها آبیاری پالسی است. در این روش تیمارهای آب شور به‌صورت مقطع یا در ترکیب با تیمارهای آب شیرین می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اصول آبیاری پالسی نخستین بار توسط کارملی و پری (Karmeli & Peri, 1974) مطرح شد. تناوب یا پالس شامل یک سری چرخه‌های آبیاری است که هر چرخه شامل یک مرحله آبیاری (وصل جریان) و یک مرحله استراحت (قطع جریان) است. استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی می‌تواند توزیع رطوبت در خاک را بهبود بخشد زیرا کاربرد متناوب آب اجازه توزیع مجدد رطوبت در خاک پیش از آغاز تناوب بعدی آبیاری را می‌دهد که می‌تواند باعث تسریع حرکت افقی و رو به بالای آب در خاک گردد. از این رو، برخی نتایج نشان داده است که توزیع رطوبت در شرایط پالسی با آبیاری پیوسته متفاوت است (Levin et al., 1979; Arabfard et al., 2019)؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت در شرایط تنش‌های خشکی و شوری بتوان توزیع رطوبت مناسبی با این روش در منطقه ریشه ایجاد کرد. این عمل سبب افزایش

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در یک مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان باغملک، در شرق استان خوزستان، در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و به صورت طرح فاکتوریل در قالب بلوک کامل تصادفی در زمینی با وسعت ۱۸۰۰ متر مربع با ۳۰ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. این منطقه، در ارتفاع ۸۵۵ متری از سطح دریا قرار دارد. بیش‌ترین درجه حرارت این منطقه در تابستان‌ها به ۴۲ درجه و کم‌ترین درجه حرارت در زمستان‌ها به صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد. میزان بارش سالیانه در این منطقه به‌طور متوسط ۵۰۰ میلی‌متر است.

تیمارهای مورد پژوهش شامل مقدار آب آبیاری (I1: ۶۰، I2: ۸۰ و I3: ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کیفیت آب (F (شیرین): ۰/۵ و S (شور): ۶ دسی‌زیمنس بر متر) و دو مدیریت آبیاری قطره‌ای پیوسته (C) و قطره‌ای پالسی (P) بود. فاکتور اول مقدار آب آبیاری، فاکتور دوم کیفیت آب آبیاری و فاکتور سوم مدیریت آبیاری می‌باشد.

در ابتدای بهمن ۱۴۰۱، زمین شخم و دیسک زده شد. سپس با استفاده از دستگاه خطی‌کار، بذر کینوای علوفه‌ای در عمق ۵ سانتی‌متری خاک کاشته شد. هر کرت آزمایشی به مساحت ۱۲ متر مربع (۴ متر × ۳ متر) در نظر گرفته شد. در هر کرت پنج ردیف کینوا کشت گردید و دو کرت کناری به‌عنوان حاشیه در طول آزمایش در نظر گرفته شد. در انتهای فصل کشت، برداشت نمونه از ردیف‌های میانی صورت گرفت.

آبیاری گیاه در طول آزمایش با اجرای سیستم آبیاری قطره‌ای انجام شد. براساس تجربه محلی، دور آبیاری به‌صورت دو روز در میان و با هدف تأمین کمبود رطوبت خاک در تیمار آبیاری کامل و رساندن به حد ظرفیت زراعی خاک در نظر گرفته شد. سایر تیمارهای آبیاری بر اساس ۸۰ و ۶۰ درصد، مقدار آب آبیاری کامل صورت گرفت. اندازه‌گیری رطوبت خاک در محدوده مورد نظر برای تعیین نیاز آبی گیاه، با استفاده از دستگاه TDR 150 انجام شد. سپس مقدار عمق آب آبیاری با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (Rashki et al., 2022):

$$d = (\theta_{fc} - \theta_i) \times \Delta z \quad (1)$$

در معادله فوق d عمق آبیاری (متر)، θ_{fc} و θ_i به‌ترتیب رطوبت حجمی خاک ($m^3.m^{-3}$) در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در است. همچنین Δz ضخامت لایه خاک برحسب متر (۰/۳ متر) می‌باشد. چون آبیاری به روش پالسی در برخی تیمارها انجام می‌شد، عمق آب آبیاری براساس تیمار مورد نظر محاسبه شده و در هر نوبت آبیاری به سه بخش مساوی تقسیم گردید. سپس طی سه مرحله (با مدت زمان روشن و خاموش بودن یکسان سیستم آبیاری) در اختیار گیاه قرار گرفت

عملکرد گیاه و راندمان آبیاری می‌شود (Karimi & Karimi, 2020). المیدا و همکاران (Almeida et al., 2018) به بررسی اثر آبیاری پالسی شور بر عملکرد نخودفرنگی پرداختند. این محققان گزارش کردند که مدیریت آبیاری پالسی اثر منفی شوری آب بر عملکرد نخودفرنگی را کاهش داده و باعث افزایش بهره‌وری آب گردید (Almeida et al., 2018). مادان و همکاران (Madane et al., 2018) در تحقیقی تأثیر سطوح مختلف آبیاری قطره‌ای پالسی را بر پارامترهای رشد و عملکرد پیاز سفید مورد استفاده قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین عملکرد محصول و بهره‌وری آب مربوط به تیمار آبیاری کامل با تعداد چهار پالس بود (Madane et al., 2018). مطالعات انجام شده در خصوص آبیاری پالسی در منابع داخلی محدود است. در یکی از این منابع، با کاربرد آبیاری پالسی به بررسی عملکرد و اجزای عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای پرداخته شد. نتایج نشان داد بیش‌ترین عملکرد خشک و بهره‌وری آب با به کارگیری چهار پالس آبیاری به دست آمد. به همین دلیل این محققان پیشنهاد کردند که از این روش برای بهبود عملکرد و اجزای عملکرد گیاهان استفاده شود (Mohammadi et al., 2019). در تحقیقی دیگر به ارزیابی الگوی جبهه پیشروی رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پیوسته و پالسی پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پالسی با افزایش زمان استراحت در هر چرخه، پیاز رطوبتی پهن‌تر و جبهه پیشروی بیشتر به سمت افق حرکت می‌کند. همچنین در این سیستم با کاربردهای پیوسته و پالسی به ازای یک حجم آب مساوی در انتهای آبیاری، توزیع افقی جبهه پیشروی رطوبت در دبی‌های کم نسبت به دبی زیاد بیشتر است و بیش‌ترین عمق خیس‌شدگی در بافت سبک مربوط به دبی زیاد و در بافت سنگین مربوط به دبی کم است (Karimi & Karimi, 2019).

با توجه به کاهش بارندگی در کشور ایران و کاهش کیفیت آب آبیاری، مدیریت آبیاری به روش پالسی می‌تواند کمک شایانی به بهبود وضعیت رطوبت در خاک به خصوص در کم‌آبیاری و شوری آب آبیاری گردد. این عمل می‌تواند عملکرد و شاخص‌های عملکرد گیاهان زراعی مانند کینوا را نیز بهبود بخشد. سیستم آبیاری پالسی به‌دلیل وجود مرحله استراحت و مرحله آبیاری (به‌صورت متناوب) از لحاظ اجرایی و کاربردی کمتر مورد توجه قرار گرفته است و علی‌رغم تأثیر مثبت آبیاری پالسی بر افزایش قابلیت نگهداشت آب در خاک و اهمیت حفظ تعادل رطوبتی در خاک، تأثیر مدیریت این روش آبیاری در شرایط شوری و کم‌آبی بر گیاهان دارویی همچون کینوا مورد تحقیق قرار نگرفته است. از طرفی دیگر با توجه به این‌که گیاه کشت شده کینوای علوفه‌ای می‌باشد، باید تأثیر این تیمارها بر کیفیت علوفه نیز مورد بررسی قرار گیرد. لذا در پژوهش حاضر به بررسی اثر مدیریت مقدار، کیفیت و مدیریت آب آبیاری به روش آبیاری قطره‌ای پالسی بر پارامترهای کمی و کیفی کینوا و مقایسه آن با روش آبیاری قطره‌ای پیوسته پرداخته شد.

کرت با رعایت اثر حاشیه و حذف دو بوته از ابتدا و انتهای کرت به صورت دستی اندازه گیری شد. به منظور تعیین وزن علوفه خشک، علوفه های تر برداشت شده به مدت دو هفته در هوای آزاد قرار داده شدند و بعد از اینکه به طور کامل خشک شدند با استفاده از ترازو توزین شدند.

مقدار پروتئین از روش استون و گیفورد (Stone & Gifford, 1997)، مقدار کربوهیدرات از روش فنل-اسیدسولفوریک (Dubois et al., 1956)، مقدار پرولین از روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1973)، کلروفیل و کارتنوئید از روش های لتچندرال (Lichtenthaler & Welburn, 1983) و ارنون (Arnon, 1949)، کل مواد مغذی قابل هضم (TDN) از روش لین و همکاران (Linn & Martin, 1999)، درصد پروتئین خام (CP) از روش کجلاال (AOAC, 1990)، درصد دیواره سلولی (همی سلولز و لیگنین) (NDF) و درصد دیواره سلولی عاری از همی سلولز (ADF) با روش ون سست و همکاران (Van Soest et al., 1991) تعیین شد.

به منظور تعیین پارامترهای مربوط به ریشه، ریشه گیاه از خاک در آورده و اندازه بزرگترین ریشه به عنوان طول ریشه گیاه در نظر گرفته شد. به منظور تعیین حجم ریشه از قانون ارشمیدس استفاده گردید. بدین منظور با قرار دادن ریشه ها در استوانه های مدرج و تعیین میزان تغییر سطح آب، حجم ریشه اندازه گیری شد. وزن مرطوب ریشه ها پس از نمونه برداری با استفاده از ترازو اندازه گیری گردید. وزن خشک ریشه پس از قرار دادن نمونه ها در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت اندازه گیری شد.

شکل ۱ نمونه ای از کرت ها و آزمایش های انجام شده را نشان می دهد.

و تیمارهای کیفیت آب (S1 و S2) در هر پالس به طور چرخشی اعمال گردیدند. با توجه به بافت لوم سیلتی خاک، زهکشی به صورت طبیعی و آرام وجود داشت. حجم آب مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- حجم آب مورد استفاده در تیمارها
Table 1- Volume of the used water in treatment

تیمار	حجم آب
Treatment	Volume of water (m3.ha ⁻¹)
100	5670
75	4536
50	3402

خصوصیات منابع آب و خاک مورد استفاده به ترتیب در جدول های ۲ و ۳ نشان داده شده است. سیستم آبیاری مورد استفاده شامل لوله های آبیاری قطره ای تیپ شرکت اصفهان پلاست با فواصل قطره چکان ۲۰ سانتی متر بود که با طول ۴ متر در هر کرت استفاده گردید. برای آبیاری، آب در مخزن هایی در کنار مزرعه ذخیره شد. سپس با استفاده از پمپ، آب از درون مخازن به لوله های اصلی و پس از آن به نوارهای تیپ منتقل می گردید. مقدار آب آبیاری تمامی تیمارها تا زمان سبز شدن کامل مزرعه (مرحله شش برگ) یکسان بود. همچنین تیمار شوری تا این مرحله اعمال نگردید. آب شیرین (S1) از آب چاه موجود در مزرعه و آب شور (S2) از چاه های شهرستان مجاور تأمین شد. برای تأمین مداوم آب شور، به صورت مکرر آب از شهرستان مجاور با تانکر به مزرعه منتقل و در مخازن مجزا ذخیره می گردید.

نمونه برداری گیاهی

در پایان فصل رشد به منظور تعیین خصوصیات کمی گیاه همچون ارتفاع، قطر ساقه، شاخص سطح برگ، طول ریشه، حجم ریشه، وزن تر و خشک ریشه و عملکرد تر و خشک علوفه نمونه برداری انجام شد. همچنین جهت بررسی تأثیر تیمارها بر کیفیت علوفه ی کینوا، پارامترهای کیفی شامل مقدار کلروفیل a و b برگ، محتوای پرولین برگ، کل مواد مغذی قابل هضم (TDN)^۱، درصد پروتئین خام (CP)^۲، درصد دیواره سلولی (همی سلولز و لیگنین) (NDF)^۳ و درصد دیواره سلولی عاری از همی سلولز (ADF)^۴ اندازه گیری شد.

برای اندازه گیری صفاتی مانند ارتفاع بوته و قطر ساقه از وسایل اندازه گیری طول (خط کش و متر و کولیس) استفاده شد. شاخص سطح برگ با استفاده از دستگاه سطح سنج برگ^۵ (ΔT- Leaf Area Meter) اندازه گیری شد.

عملکرد علوفه تازه در ۳۱ خرداد ۱۴۰۲ با برداشت دو خط وسط هر

4- Acid detergent fiber

5- Leaf Area Index

1- Total digestible nutrient (TDN)

2- Crude protein

3- Neutral detergent fiber

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده

Table 2- Chemical characteristics of the used water

SAR	سدیم Sodium	منیزیم Magnesium	کلسیم Calcium	کلر Cl ⁻¹	پتاسیم Potassium	بی‌کربنات Hco ₃ ⁻¹	pH	EC (dS/m)	نمونه Samples
			meq/lit						
3.63	6.5	2.3	4.1	6.3	0.32	3.2	7.31	0.5	F
17.69	36.7	4.2	4.5	31.4	0.61	4.8	7.12	6	S

نکته: در جدول S نشان‌دهنده‌ی آب شور و F آب شیرین

Note: In this table, S represents saline water, F represents freshwater

جدول ۳- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه

Table 3- Physicochemical properties of farm soil

SAR	سدیم Sodium	منیزیم Magnesium	کلسیم Calcium	کلر Cl ⁻¹	بی‌کربنات Hco ₃ ⁻¹	کربنات CO ₃ ⁻²	pH	EC (dS/m)	بافت Texture	عمق Depth (cm)
			meq/lit							
1.5	3.8	3.2	8.2	4.5	3.0	0	8.1 9	0.76	سیلتی لوم Loam Silt	0-30



شکل ۱- مزرعه تحقیقاتی و بررسی کرت‌ها در طول آزمایش

Figure 1- Research farm and plot inspection during the experiment

$$WP = \frac{Y}{IR} \quad (2)$$

در این رابطه، WP: بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y:

بهره‌وری آب (WP)

برای محاسبه بهره‌وری آب از رابطه (۲) استفاده گردید (Payero)

(et al., 2009):

مقدار محصول برداشت شده (کیلوگرم در هکتار) و IR: مقدار آب آبیاری (متر مکعب) است.

شوری خاک

برای بررسی چگونگی توزیع شوری در پروفیل خاک در طول و انتهای فصل رشد نسبت به ابتدای آن، با حفر پروفیل در مرکز کلیه کرت‌های آزمایشی، از هر یک از پروفیل‌ها دو نمونه خاک از عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متر برداشت شد. این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و عملیات عصاره‌گیری اشباع بر روی آن‌ها انجام گردید. سپس با استفاده از دستگاه EC سنج، هدایت الکتریکی این نمونه‌ها تعیین شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

همه داده‌های برداشت شده از آزمایش، در نرم‌افزار EXCEL 2019 وارد شدند. پس از دسته‌بندی داده‌ها، برای تجزیه و تحلیل آن‌ها، از نرم‌افزار SAS 9.1 استفاده گردید. تجزیه واریانس داده‌ها در سطوح ۵ و ۱ درصد انجام گردید و پس از آن مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) صفات کمی اندازه‌گیری شده

Table 4- Results of variance analysis (mean square and degrees of freedom) of measured quantitative traits

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی Degrees of freedom	بهره‌وری آب آبیاری Irrigation water productivity (kg/m ³)	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield (kg/ha)	وزن علوفه تر Fresh forage weight (kg/ha)	شاخص سطح برگ Leaf area index (cm ²)	قطر ساقه Stem diameter (cm)	ارتفاع Height (cm)
Y	1	32.82 ^{ns}	167.75 ^{ns}	453.41 ^{ns}	32.41 ^{ns}	0.69 ^{ns}	8.47 ^{ns}
R	2	17.25 ^{ns}	126.14 ^{ns}	357.25 ^{ns}	25.43 ^{ns}	0.54 ^{ns}	3.25 ^{ns}
Y*R	2	59.38 ^{ns}	197.52 ^{ns}	561.58 ^{ns}	42.94 ^{ns}	1.05 ^{ns}	10.53 ^{ns}
I (مقدار آبیاری)	2	25.36*	486.32*	1487.54*	237.61*	2.25*	456.31*
Y*I	2	62.81 ^{ns}	271.54 ^{ns}	784.62 ^{ns}	71.58 ^{ns}	0.67 ^{ns}	12.24 ^{ns}
S (شوری آب)	1	16.52*	864.85*	1543.45*	614.37*	3.41*	357.85*
I*S	2	18.92*	721.54*	1682.74*	559.82*	3.76*	867.63*
S*Y	1	32.56 ^{ns}	962.47 ^{ns}	1854.31 ^{ns}	657.42 ^{ns}	7.86 ^{ns}	674.52 ^{ns}
I*S*Y	2	51.19 ^{ns}	201.38 ^{ns}	1546.91 ^{ns}	251.62 ^{ns}	4.27 ^{ns}	276.59 ^{ns}
Y*I(S)	4	10.42	324.41	928.69	68.05	1.15	263.41
M (روش آبیاری)	1	13.71*	261.75*	2371.29*	613.72*	1.32*	574.15**
I*M	2	15.23*	674.62*	2483.24**	782.25**	2.52*	384.26*
S*M	1	26.15*	472.86*	2849.61*	638.14**	3.16*	946.82**
Y*M	1	15.81*	326.51 ^{ns}	2345.71 ^{ns}	715.36 ^{ns}	5.48 ^{ns}	641.25 ^{ns}
I*S*M	2	18.61*	845.69*	3547.21*	753.28*	4.14*	1034.21*
I*S*M*Y	2	19.47*	829.73 ^{ns}	2684.55 ^{ns}	672.84 ^{ns}	6.35 ^{ns}	984.42 ^{ns}
Y*M(I*S)	8	10.28	376.19	1425.32	88.19	0.81	69.27
ضریب تغییرات (%)		7.45	8.41	12.56	8.29	8.54	10.42

* و ** معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد، ns عدم معنی‌داری.

*and **significance at the five percent and one percent probability levels, ns non-significance.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سال بر هیچکدام از صفات کمی گیاه کینوا اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۴). در واقع، تغییرات زمانی سبب ایجاد تغییر معنی‌دار در هیچکدام از این صفات نگردید. مقدار آبیاری بر صفات ارتفاع گیاه، قطر ساقه، شاخص سطح برگ، وزن علوفه تر، عملکرد علوفه خشک و بهره‌وری آبیاری در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. این نتایج با مشاهدات صابری و کیانی (Saberi & Kiani, 2024) مطابقت داشت. این محققان نیز اثر مقدار آب آبیاری را بر صفت وزن تر گیاه گزارش کردند. شیخی‌سندجی و همکاران (Sheikhi-Sanandji et al., 2022) گزارش کردند که مقدار آب آبیاری بر ارتفاع گیاه، وزن علوفه و بهره‌وری آب اثر معنی‌دار داشت. شوری آب آبیاری نیز بر کلیه صفات کمی اشاره شده در سطح پنج درصد اثر معنی‌دار داشت. این نتایج با مطالعات جمالی و انصاری (Jamali & Ansari, 2020) مطابقت داشت. این محققان با بررسی اثر رژیم‌های مختلف آب شور بر خصوصیات رشد کینوا نشان دادند که در نظر گرفتن تیمار شوری بر صفاتی مانند وزن تر، ارتفاع گیاه، وزن خشک، شاخص سطح برگ و بهره‌وری آب اثر معنی‌دار داشت. همچنین مطالعه مقادیر مختلف از تلفیق آب چاه شور و شیرین بر صفات کمی اشاره شده گیاه کینوا اثر معنی‌دار داشت (Jamali & Ansari, 2019).

متقابل روش آبیاری و شوری و همچنین روش آبیاری و مقدار آبیاری بر صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر متقابل کلیه منابع تغییرات (سال، مقدار آبیاری، شوری و روش آبیاری) نیز بر کلیه صفات کمی معنی‌دار شد.

نتایج تجزیه واریانس صفات کیفی گیاه کینوا در جدول ۵ نشان داده شده است. اثر سال بر هیچکدام از صفات کیفی معنی‌دار نشد. مقدار آبیاری بر پروتئین برگ، کارتنوئید، TDN، NDF، ADF، پروتئین، قندهای محلول و فیبر در سطح پنج درصد و بر کلروفیل a و b در سطح یک درصد معنی‌دار شد. مشاهدات صابری و کیانی (Saberi & Kiani, 2024) نیز نشان داد که مقدار آبیاری بر صفات کلروفیل و پروتئین کینوا اثر معنی‌دار داشت. شوری آب بر کلروفیل a و b و پروتئین در سطح یک درصد و بر سایر صفات کیفی در سطح پنج درصد اثر معنی‌دار داشت. روش آبیاری بر کلیه صفات کیفی در سطح پنج درصد اثر معنی‌دار داشت. با توجه به اثرات معنی‌دار کلیه فاکتورهای مورد بررسی بر صفات کیفی، اثرات متقابل کلیه فاکتورها نیز بر صفات کیفی معنی‌دار بود.

روش آبیاری بر ارتفاع گیاه اثر معنی‌دار در سطح یک درصد و بر سایر صفات کمی اشاره شده اثر معنی‌دار در سطح پنج درصد داشت. گرچه روش آبیاری پالسی روی گیاه کینوا تاکنون بررسی نشده است؛ ولی برخی مطالعات از تلفیق روش‌های آبیاری با آب شیرین و نامتعارف نشان داده است که کاربرد این روش بر صفاتی مانند وزن تر و خشک، ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ اثر معنی‌دار داشت (Jamali & Ansari, 2020). آبیاری قطره‌ای پالسی با توزیع یکنواخت‌تر رطوبت در ناحیه ریشه، می‌تواند از تجمع نمک در خاک جلوگیری کند و اثرات منفی شوری را کاهش دهد. این امر به‌ویژه در خاک‌های با شوری بالا اهمیت دارد (Carroll et al., 2024). آبیاری پالسی با تأمین آب به‌صورت منظم و نزدیک به نیاز گیاه، می‌تواند جذب آب و مواد مغذی را بهبود بخشد و در نتیجه رشد و توسعه گیاه را افزایش دهد (Phogat et al., 2013).

اثر متقابل سال و مقدار آبیاری اثر معنی‌داری بر صفات کمی نداشت. اثر متقابل سال و شوری آب نیز اثر معنی‌داری بر صفات کمی مورد مطالعه نشان نداد. لیکن، اثر شوری و مقدار آبیاری بر کلیه صفات معنی‌دار بود و زمانی که این دو پارامتر در کنار سال قرار گرفتند، اثر هر سه پارامتر بر صفات مورد مطالعه اثر معنی‌دار نشان داد. همچنین، اثر

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) صفات کیفی اندازه‌گیری شده

Table 5- Results of variance analysis (mean square and degrees of freedom) of measured qualitative traits

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی Degrees of freedom	فیبر Fiber	قندهای محلول Soluble sugars	پروتئین Protein	ADF	NDF	TDN	کارتنوئید Carotenoid	پروتئین برگ Proline leaf	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل a Chlorophyll a
Y	1	82.33 ^{ns}	0.75 ^{ns}	0.88 ^{ns}	29.32 ^{ns}	44.51 ^{ns}	39.38 ^{ns}	0.35 ^{ns}	71.69 ^{ns}	0.78 ^{ns}	0.56 ^{ns}
R	2	76.41 ^{ns}	0.45 ^{ns}	0.65 ^{ns}	16.31 ^{ns}	34.26 ^{ns}	21.14 ^{ns}	0.21 ^{ns}	81.26 ^{ns}	0.86 ^{ns}	0.49 ^{ns}
Y*R	2	92.69 ^{ns}	0.85 ^{ns}	1.14 ^{ns}	35.42 ^{ns}	76.85 ^{ns}	56.69 ^{ns}	0.86 ^{ns}	101.25 ^{ns}	1.16 ^{ns}	0.89 ^{ns}
I (مقدار آبیاری)	2	98.25*	35.12*	58.26*	126.95*	198.41*	157.35*	25.68*	87.54*	62.18**	63.46**
Y*I	2	34.15	9.95	9.31	13.86	18.63	16.24	3.26	23.12	8.52	5.16
S (شوری آب)	1	362.51*	32.61*	18.25**	176.28*	213.12*	241.59*	15.24*	241.25*	14.41**	19.04**
I*S	2	125.62*	18.46*	28.43**	202.49*	165.57*	198.43*	9.46*	106.78*	18.33**	12.34*
S*Y	1	285.93 ^{ns}	41.57 ^{ns}	25.54 ^{ns}	189.92 ^{ns}	210.47 ^{ns}	231.92 ^{ns}	16.84 ^{ns}	167.25 ^{ns}	12.64 ^{ns}	24.16 ^{ns}
I*S*Y	2	231.36 ^{ns}	51.82 ^{ns}	23.92 ^{ns}	203.61 ^{ns}	271.28 ^{ns}	256.23 ^{ns}	17.32 ^{ns}	175.34 ^{ns}	18.82 ^{ns}	36.45 ^{ns}
Y*I(S)	4	30.19	10.25	7.335	28.09	41.05	36.28	5.37	22.45	5.02	1.58
M (روش آبیاری)	1	75.72*	27.91*	15.42*	183.27*	214.36*	245.71*	16.52*	64.42*	11.67*	19.26*
I*M	2	64.18*	38.42*	21.34*	246.52*	268.19*	281.66*	19.31*	51.34*	17.16*	21.16*
S*M	1	58.86*	41.18*	38.12*	281.43*	284.16*	314.46*	27.08*	43.21*	28.51*	32.28*
Y*M	1	72.49 ^{ns}	30.29 ^{ns}	20.12 ^{ns}	166.41 ^{ns}	205.55 ^{ns}	184.83 ^{ns}	19.35 ^{ns}	53.76 ^{ns}	17.58 ^{ns}	11.61 ^{ns}
I*S*M	2	69.27*	20.84*	19.62*	276.49*	321.48*	362.25*	13.52*	78.69*	11.27*	15.41*
I*S*M*Y	2	82.27 ^{ns}	32.83 ^{ns}	18.43 ^{ns}	176.51 ^{ns}	185.34 ^{ns}	162.32 ^{ns}	26.47 ^{ns}	64.16 ^{ns}	26.48 ^{ns}	16.56 ^{ns}
Y*M(I)	8	16.94	12.53	9.14	78.331	52.63	69.57	6.72	19.51	6.34	8.54
ضریب تغییرات (CV) (%)	-	10.26	9.21	7.45	11.63	11.71	12.25	8.16	11.42	8.63	7.32

* و ** معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد، ns عدم معنی‌داری.

*and **significance at the five percent and one percent probability levels, ns non-significance.

داشت. در این حالت، گیاه برای همزیستی با شرایط اعمال شده، توسعه برگ‌ها و رشد را کنترل می‌کند و همین عامل سبب تغییر در صفات کمی شد. در پژوهشی گیاه کینوا تحت تیمارهای مختلف شوری (۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار NaCl) کشت شد تا واکنش‌های فیزیولوژیکی و رشدی آن بررسی شود. نتایج نشان داد شوری بالا منجر به کاهش رشد، کاهش حدود ۵۰ تا ۶۰ درصدی وزن خشک بوته، کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی، افزایش پراکسیداسیون غشا، و اختلال در تعادل یونی (Na^+ / K^+) شد. این نتایج تأیید می‌کند که اگرچه کینوا گیاهی نسبتاً مقاوم به شوری است، اما در غلظت‌های بالای NaCl (بیش از ۲۰۰ میلی‌مولار) دچار تنش شدید فیزیولوژیکی و افت عملکرد می‌شود (Derbali et al., 2023). از علل کاهش عملکرد می‌توان به کاهش هدایت مزوفیلی، کاهش فضای بین سلولی به علت ضخیم‌تر شدن دیواره‌های سلولی ناشی از شوری، و محدود شدن تبادل گازهای فتوسنتزی اشاره کرد (Razzaghi et al., 2015).

بالاترین بهره‌وری آب در تیمارهای شماره ۲۱، ۲۳ و ۲۶ مشاهده شد. این تیمارها به ترتیب آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۶۰ درصد نیاز آبی، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۶۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین) و آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۶۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شور، پالس سوم آب شیرین) بودند. علت بالا بودن بهره‌وری آب در این تیمارها به کاهش مقدار آب آبیاری و شیرین بودن آن مرتبط است. در نتیجه، حتی با اعمال آبیاری کامل با آب شور یا ترکیب آب شور و شیرین در تنش‌های آبی ۸۰ و ۶۰ درصد، بهره‌وری آب افزایش نیافت. علت بالا بودن بهره‌وری آب در تیمار شماره ۲۶، اعمال دو پالس آبیاری شیرین در نوبت‌های اول و سوم بود. این امر به افزایش قطر ساقه و در نتیجه بهبود عملکرد علوفه کمک کرد. پایین‌ترین بهره‌وری آب به تیمارهای شماره ۲، ۴، ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ اختصاص داشت. در این تیمارها، عمدتاً آبیاری کامل یا اعمال سه پالس شوری در نظر گرفته شده بود.

نتایج مقایسه میانگین صفات کیفی گیاه کینوا در جدول ۷ نشان داده شده است. در این جدول صفات کلروفیل و کارتنوئید به میزان رنگدانه‌های تولید شده در برگ اشاره دارد. قندهای محلول، پرولین و پروتئین میزان ارزش غذایی علوفه تولید شده را بیان می‌کند. صفات ADF، NDF و TDN نیز به کیفیت علوفه از نظر قابلیت هضم برای دام اشاره دارند. NDF دیواره‌ی سلولی و ADF دیواره‌ی سلولی بدون همی سلولز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پتانسیل مصرف علوفه توسط دام و قابلیت هضم می‌باشند و TDN کل مواد مغذی قابل هضم گیاه است (Piri et al., 2018).

مقایسه میانگین صفات کمی اندازه‌گیری شده در جدول ۶ نشان داده شده است. بلندترین ارتفاع گیاه در تیمارهای شماره ۱، ۳، ۱۱ و ۱۳ به دست آمد. این تیمارها به ترتیب آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۱۰۰ درصد نیاز آبی ($CI3F$)، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۱۰۰ درصد نیاز آبی ($PI3FFF$)، آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۸۰ درصد نیاز آبی ($CI2F$) و آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۸۰ درصد نیاز آبی ($PI2FFF$) بودند. علت افزایش ارتفاع گیاه در این تیمارها، عدم کاربرد تیمار شوری و دسترسی کافی به مقدار آب آبیاری بود. این نتایج با مشاهدات جمالی و همکاران (Jamali, 2019) مطابقت داشت. این محققان نیز بلندترین ارتفاع گیاه کینوا را در تیمارهای شامل آبیاری کامل با هدایت الکتریکی ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر گزارش کردند. در شرایطی که رطوبت کافی در اختیار گیاه قرار می‌گیرد، عامل محدودیت برای بسته شدن روزنه‌ها و تغییر در میزان شیره پرونده وجود ندارد. در نتیجه، گیاه بیشترین رشد را نسبت به سایر تیمارها، که دچار تنش آبی بودند، داشت. به همین دلیل، در تیمارهای ۱، ۳، ۱۱ و ۱۳، سایر صفات کمی از جمله قطر ساقه، شاخص سطح برگ، وزن علوفه تر و عملکرد علوفه خشک نیز بالاترین مقادیر را داشتند. به دلیل افزایش ارتفاع گیاه در این تیمارها، وزن تر و خشک علوفه نیز در آن‌ها افزایش یافت. البته بالا بودن شاخص سطح برگ نیز بر افزایش وزن تر و خشک علوفه مؤثر بود. گرچه به دلیل بالا بودن مصرف آب در تیمارهای اشاره شده، بهره‌وری آب آن‌ها پایین بود. در تحقیقی، اثر کم آبیاری بر رشد و عملکرد کینوا در منطقه‌ی خشک چین بررسی شد. نتایج نشان داد کاهش آبیاری تا سطح ۸۰ درصد نیاز آبی تأثیر منفی قابل توجهی بر عملکرد نداشت و حتی در برخی صفات رشد (ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، و عملکرد دانه) بهبود مشاهده شد. از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیکی نیز، گیاهان تحت کم آبی متوسط با افزایش محتوای کلروفیل، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش جزئی تبخیر-تعرق، سازگاری مناسبی نشان دادند (Awa et al., 2024).

کمترین صفات کمی، به جز بهره‌وری آب، به تیمارهای شماره ۲۲ ($CI1S$) و ۲۴ ($PI1SSS$) اختصاص داشت. این تیمارها به ترتیب آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شور و عمق ۶۰ درصد نیاز آبی و آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۶۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شور، پالس دوم آب شور، پالس سوم آب شور) بودند. این نتایج مبرهن است زیرا با کاهش مقدار آب آبیاری و افزایش شوری آن، صفات کمی تحت تأثیر همزمان دو تنش کم آبی و شوری قرار گرفتند. به همین دلیل، کلیه صفات کمی کاهش یافت. در واقع، افزایش تنش آبی به ۶۰ درصد، و اعمال تنش شوری، بیشترین اثر را بر بسته شدن روزنه‌ها و کاهش رشد گیاه کینوا

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات کمی اندازه‌گیری شده

Table 6- Comparison of the averages of measured quantitative traits

شماره تیمار Treatment number	تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	بهره‌وری آب آبیاری Irrigation water productivity (kg/m ³)	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield (kg/ha)	وزن علوفه تر Fresh forage weight (kg/ha)	شاخص سطح برگ Leaf area index (cm ²)	قطر ساقه Stem diameter (cm)	ارتفاع Height (cm)
1	FCI3	5.54c	8256.14a	31420.25a	152.23a	10.1a	94a
2	C I3S	2.17f	3126.52d	12326.54g	124.41d	6.4c	64d
3	PI3FFF	5.61c	8587.45a	31782.57a	156.42a	10.5a	95a
4	PI3SSS	2.21f	3179.41d	12578.26g	124.55d	6.4c	65d
5	PI3FFS	3.82e	5532.27bc	21705.62d	133.15c	7.1b	72c
6	PI3FSF	4.69d	6890.84b	26598.62b	1336.56bc	7.6b	77bc
7	PI3SFF	3.64e	5217.63bc	20655.18d	131.87c	6.9bc	71c
8	PI3SSF	2.91ef	4325.54c	16482.25f	123.85d	6.3c	64d
9	PI3FSS	2.79f	3864.12dc	15864.53f	122.45d	6.2c	62d
10	PI3SFS	2.84f	4120.55c	16122.48f	122.36d	6.3c	63d
11	CI2F	6.61b	7781.65a	29985.45a	148.14a	9.2a	90a
12	CI2S	2.58f	3146.35d	11743.84h	123.94d	6.3c	63d
13	PI2FFF	6.64b	8016.81a	30123.18a	148.36a	9.4a	91a
14	PI2SSS	2.47f	3112.57d	11226.57h	124.54d	6.3c	64d
15	PI2FFS	4.59d	5085.14bc	20849.38d	131.58c	6.9bc	71c
16	PI2FSF	5.61c	6347.25b	25415.37b	135.16bc	7.3b	74c
17	PI2SFF	4.37d	4957.68c	19842.76de	130.62c	6.8bc	70c
18	PI2SSF	3.53e	4002.18c	16041.52f	121.85d	6.2c	61d
19	PI2FSS	3.25e	3362.58d	14760.85fg	120.69d	6.1c	58e
20	PI2SFS	3.36e	3443.24d	15247.12f	116.47de	6.1c	60d
21	CI1F	7.89a	6945.38b	26864.63b	140.74b	8.3ab	80b
22	CI1S	3.07e	2876.51b	10467.85h	114.38e	5.8d	56e
23	PI1FFF	7.91a	6941.46b	26942.75b	142.25b	8.4ab	82b
24	PI1SSS	3.15e	3002.25d	10732.64h	113.21e	5.8d	56e
25	PI1FFS	5.35c	4275.52c	18231.71e	128.64c	6.7bc	68dc
26	PI1FSF	7.29a	6845.7b	24827.9c	134.45bc	7.1b	73c
27	PI1SFF	5.51c	4659.85c	18759.41e	130.75c	6.7bc	69dc
28	PI1SSF	4.66d	3765.63d	15869.74f	116.19dc	6.1c	60d
29	PI1FSS	3.85de	3145.63d	13127.49g	119.78d	6.1c	60d
30	PI1SFS	4.12d	3371.05d	14036.25fg	123.47d	6.3c	61d

میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means with the same letters do not differ significantly at the 5% probability level based on Duncan's test.

(به دلیل قند محلول، پرولین و پروتئین بالا) شد. تیمار شماره ۲۴، که شامل آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۶۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شور، پالس دوم آب شور، پالس سوم آب شور) بیشترین کیفیت علوفه تولیدی را داشت و علت آن اعمال تنش همزمان شوری و کم‌آبی است. از جمله عکس‌العمل‌های متابولیکی به تنش شوری، سنتز اسمولیت‌های سازگار است. این ترکیبات آلی در تنظیم اسمزی دخالت دارند و موجب حفاظت ساختمان ارگانل‌های مختلف سلول از خسارت‌های اکسیداتیو می‌شود (Jamali & Ansari, 2019). تغییرات قندهای محلول و فروکتان‌ها شاخص حساس و مناسبی برای ارزیابی تحمل به شوری و کم‌آبی می‌شود. در نتیجه افزایش در غلظت قند یکی از واکنش‌های گیاه برای تحمل این دو تنش است. همچنین، جهت تعادل یونی در واکوئل، سیتوپلاسم موادی با وزن مولکولی پایین به نام مواد سازگار

بیشترین مقدار کلروفیل a و b و کارتنوئید در تیمارهای شماره ۱، ۳، ۱۱ و ۱۳ مشاهده گردید. این تیمارها دارای بالاترین صفات کمی نیز بودند (جدول ۷). مقدار TDN و ADF در دو تیمار شماره ۱ و ۳ دارای مقادیر بالایی بود. ADF در واقع بخش فیبری با قابلیت هضم پایین است و شامل گلین و سلولز می‌باشد. به همین دلیل، تیمارهای ۱ و ۳، دارای میزان قند محلول، پرولین و پروتئین پایینی نیز هستند. در دو تیمار ۱ و ۳، آب آبیاری شیرین به مقدار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه کینوا اعمال شده است. به همین دلیل تشکیل قند محلول، پرولین و پروتئین برگ کاهش یافته است. این نتایج با مشاهدات جمالی و انصاری مطابقت داشت (Jamali & Ansari, 2019). از طرفی، اعمال آب شور به تنهایی یا ترکیب با پالس‌های شیرین و تنش آبی در تیمارهای شماره ۲، ۴ و ۱۲ الی ۳۰ سبب افزایش کیفیت علوفه تولیدی

همکاران (Piri et al., 2018) در خصوص تأثیر شوری و کم آبیاری بر کیفیت سورگوم علوفه‌ای مطابقت داشت.

نتایج تجزیه واریانس صفات ریشه در جدول ۸ نشان داده شده است. مقدار آب آبیاری بر طول، حجم، وزن تر و وزن خشک ریشه در سطح پنج درصد اثر معنی‌دار داشت. شوری آب بر این صفات نیز در سطح پنج درصد اثر معنی‌دار داشت. اثر متقابل شوری و مقدار آبیاری نیز بر صفات ریشه اثر معنی‌دار در سطح پنج درصد نشان داد. روش آبیاری بر صفات حجم، وزن تر و وزن خشک ریشه اثر معنی‌دار در سطح پنج درصد و بر طول ریشه اثر معنی‌دار در سطح یک درصد داشت. اثر متقابل روش آبیاری و مقدار آبیاری بر کلیه صفات در سطح پنج درصد و اثر متقابل روش آبیاری و شوری بر طول ریشه در سطح یک درصد اثر معنی‌دار نشان داد. با توجه به شکل‌های ۲، ۳ و ۴ تیمارهای آبیاری کامل با آب شیرین سبب رشد طولی ریشه شدند.

تولید می‌کند. این مواد در واکنش‌های بیوشیمیایی سلول اختلال ایجاد نکرده و موجب حفظ تعادل اسمزی و ادامه جذب آب، حفظ ساختارهای سلولی، ترکیبات پروتئینی و آنزیمی می‌شود. این مواد شامل پرولین و پروتئین هستند (Kafi et al., 2009). با توجه به اثرات متقابل ADF و TDN با شاخص‌های کیفی، پایین‌ترین مقدار ADF و TDN در تیمارهای ۲۸ الی ۳۰، که شامل تنش آبی ۶۰ درصد و دو پالس آبیاری با آب شور بودند، مشاهده گردید. شاخص NDF به اجزای ساختاری گیاه و به‌ویژه دیواره سلولی مربوط می‌شود. به‌طور کلی، مقادیر پایین NDF مطلوب هستند زیرا مقدار NDF با بالغ شدن خوراک افزایش می‌یابد. بنابراین، تیمارهای ۱ و ۳، بهترین شرایط را از نظر مقدار NDF داشتند. علاوه بر این دو تیمار، تیمارهای شماره ۵ الی ۱۱ نیز دارای کمترین مقدار NDF بودند. در این تیمارها، کم آبیاری اعمال نشده بود و به همین دلیل مقدار NDF بالایی داشتند. در نتیجه، اثر کم آبیاری بر مقدار NDF بیشتر از تنش شوری بود. نتایج تحقیق با نتایج پیری و

جدول ۷- مقایسه میانگین صفات کیفی اندازه‌گیری شده

Table 7- Comparison of the average of measured qualitative traits

شماره تیمار Treatment number	تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	ADF	NDF	TDN	پروتئین Protein	پرولین برگ Proline leaf	قندهای محلول Soluble sugars	کاروتنوئید Carotenoid	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل a Chlorophyll a
					(%)	(micromol/g)			(mg/g wet weight)	
1	FCI3	18.65a	7.72e	38.64a	9.41e	5.21fg	29.55d	0.98a	6.34a	12.46a
2	C I3S	6.84d	9.55d	15.52f	11.56d	13.36c	31.42dc	0.41e	2.15d	5.73d
3	PI3FFF	18.24a	7.92e	38.22a	9.56ef	5.78fg	29.75d	0.97a	6.28a	12.11a
4	PI3SSS	6.45d	9.84d	15.84f	11.47d	13.57c	31.63dc	0.42e	3.26c	5.66d
5	PI3FFS	9.72c	7.38e	22.78cd	9.74ef	6.62f	29.78d	0.73b	4.37b	8.68bc
6	PI3FSF	9.96c	7.53e	23.16c	9.75ef	6.89f	29.81d	0.79b	4.78b	8.97bc
7	PI3SFF	8.67d	7.25e	21.54d	9.86ef	7.08e	30.04d	0.61c	4.11b	7.76c
8	PI3SSF	8.29d	8.29e	21.32d	10.12e	7.19e	30.25d	0.57d	3.68c	7.23c
9	PI3FSS	7.54d	8.68e	20.46de	10.41e	7.54e	30.62d	0.48de	3.21c	6.54cd
10	PI3SFS	7.73d	8.55e	20.89de	10.27e	7.13e	30.31d	0.52d	3.58c	7.06c
11	CI2F	16.42b	8.41e	31.45b	10.36e	7.74e	30.49d	0.91a	5.74a	11.29a
12	CI2S	6.25de	13.18bc	14.69f	15.26bc	16.21b	35.18b	0.39ef	2.74d	5.14d
13	PI2FFF	16.79b	10.72d	31.57b	12.53d	7.89e	32.74c	0.89a	5.94a	11.85a
14	PI2SSS	6.47de	1.44bc	14.74f	15.54bc	16.45b	36.11b	0.38ef	2.66d	5.11d
15	PI2FFS	9.16c	9.51d	22.18cd	11.89d	6.33f	32.05c	0.68bc	4.06b	7.89c
16	PI2FSF	9.88c	9.63d	22.94cd	11.68d	6.11f	31.76dc	0.71b	4.62b	8.44bc
17	PI2SFF	8.36d	10.34d	21.65d	12.26d	6.94f	32.54c	0.57d	3.32c	7.12c
18	PI2SSF	7.35d	10.19d	20.28de	12.47d	7.85e	32.61c	0.51d	3.18c	6.52cd
19	PI2FSS	7.12d	11.58c	19.81e	13.64cd	8.27e	33.78c	0.41e	2.91dc	6.13dc
20	PI2SFS	7.26d	11.47c	20.12de	13.32cd	8.11e	33.46c	0.46de	3.08c	6.25dc
21	CI1F	10.14c	11.65c	24.32c	13.88cd	9.16d	34.12bc	0.87a	4.85b	9.51b
22	CI1S	5.69e	16.14a	12.38fg	18.12a	19.25a	38.18a	0.31f	2.31d	4.67e
23	PI1FFF	10.36c	13.54bc	24.41c	15.42bc	9.41d	35.56b	0.86a	5.07ab	9.74b
24	PI1SSS	5.61e	16.45a	12.54fg	18.61a	19.63a	39.26a	0.31f	4.19b	4.53e
25	PI1FFS	7.49d	13.26bc	20.32de	15.31bc	8.47e	35.47b	0.59d	3.15c	6.46cd
26	PI1FSF	8.52d	12.63c	21.75d	14.78c	8.02e	34.85b	0.63bc	4.04b	5.79d
27	PI1SFF	7.13d	13.56bc	20.05de	15.54bc	9.74d	35.63b	0.51d	3.01c	6.27cd
28	PI1SSF	6.57de	14.48b	15.04f	16.36b	10.86d	36.58b	0.45de	3.46c	5.81d
29	PI1FSS	6.33de	14.25b	14.71f	16.21b	10.48d	36.47b	0.35f	2.56d	4.82de
30	PI1SFS	6.49de	14.32b	14.88f	16.14b	10.25d	36.26b	0.39ef	2.87d	5.31d

منابع برای رشد و عملکرد می‌شود. وقتی همزمان با شوری، کم‌آبی نیز اعمال شود، تأثیر ترکیبی دارد (اسمزی پایین‌تر) و گیاه حتی سخت‌تر آب جذب می‌کند در نتیجه کاهش عملکرد بیشتر اتفاق می‌افتد (Maestro-Gaitán et al., 2022).

تغییرات شوری خاک در شکل ۵ نشان داده شده است. خط مقطع، نشان‌دهنده شوری اولیه خاک است که مطابق جدول (۳) برابر با ۰/۷۶ دسی‌زیمنس بر متر است. در اکثر تیمارها، پس از دو سال اجرای این پژوهش، شوری خاک در دو عمق ۳۰-۶۰ و ۳۰ سانتی‌متری نسبت به شوری اولیه خاک افزایش یافت. فقط در تیمارهای ۱، ۳، ۱۱ و ۱۳ شوری انتهایی آزمایش نزدیک به شوری اولیه بود. این تیمارها به ترتیب آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۱۰۰ درصد نیاز آبی، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۱۰۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین)، آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۸۰ درصد نیاز آبی و آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۸۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین) بود. این تیمارها بیشترین صفات کمی را نیز داشتند (جدول ۶) و یکی از علل آن عدم وجود شوری در ناحیه توسعه ریشه بود (شکل ۵).

در نتیجه، حجم ریشه نیز افزایش یافته که اثر مستقیمی بر وزن تر و خشک ریشه نیز داشت. در خصوص اثر تنش‌های آبی و شوری بر ریشه کینوا مطالعات محدودی صورت گرفته است؛ لیکن مطالعه این تیمارها روی سایر گیاهان زراعی نشان داده است که ریشه این گیاهان تا عمق حدود ۲۰ سانتی‌متر رطوبت را به سرعت جذب می‌کنند. لیکن در تیمارهای کم‌آبیاری، به علت کمبود رطوبت و جذب آن در لایه‌های سطحی، رشد ریشه به شدت کاهش می‌یابد (Kohi-Cheleh-Karan et al., 2015). سایر محققان نیز عقیده دارند که در صورتی که شرایط خاک برای کلیه تیمارها یکسان باشد، رطوبت خاک عامل مهمی در توسعه طولی و حجمی ریشه‌ها است (Wang & Zheng, 2017; Yan & Nelson, 2022; Vennam et al., 2023). در نتیجه، توسعه ریشه بر میزان جذب عناصر، در کنار تأمین رطوبت، اثرگذار است. با مقایسه نتایج به دست آمده از طول، وزن و حجم ریشه با نتایج عملکرد علوفه (جدول ۶)، این ارتباط تأیید می‌شود. افزایش نمک در خاک نیز باعث می‌شود که پتانسیل آب خاک کاهش یابد و ریشه‌ها نتوانند به راحتی آب جذب کنند. گیاه برای تنظیم اسمزی و دفع یون‌های مضر، انرژی بیشتری مصرف می‌کند (برای مثال تولید اُسمولایت‌ها، انتقال یون‌ها، بازسازی سلول‌های آسیب دیده) که در نتیجه منجر به کاهش

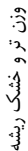
جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) صفات ریشه اندازه‌گیری شده

Table 8- Results of variance analysis (mean square and degrees of freedom) of measured root traits

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی Degrees of freedom	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	حجم ریشه Root Volume	طول ریشه Root length
Y	1	51.22 ^{ns}	41.05 ^{ns}	0.78 ^{ns}	3.17 ^{ns}
R	2	71.35 ^{ns}	32.64 ^{ns}	0.65 ^{ns}	2.45 ^{ns}
Y*R	2	64.26 ^{ns}	53.18 ^{ns}	3.26 ^{ns}	8.85 ^{ns}
I (مقدار آبیاری)	2	48.16*	84.51*	6.41*	57.96*
Y*I	2	84.55 ^{ns}	47.21 ^{ns}	0.58 ^{ns}	14.05 ^{ns}
S (شوری آب)	1	33.18*	89.26*	5.63*	84.42*
I*S	2	21.73*	42.25*	6.76*	63.25*
S*Y	1	51.26 ^{ns}	55.35 ^{ns}	8.81 ^{ns}	35.52 ^{ns}
I*S*Y	2	46.97 ^{ns}	85.41 ^{ns}	6.72 ^{ns}	47.23 ^{ns}
Y*I(S)	4	102.79	91.05	3.18	47.63
M (روش آبیاری)	1	112.61*	72.16*	2.45*	84.15**
I*M	2	82.28**	100.25**	5.73*	32.57*
S*M	1	73.13*	83.14**	9.11*	48.67**
Y*M	1	93.26 ^{ns}	59.27 ^{ns}	7.17 ^{ns}	75.21 ^{ns}
I*S*M	2	47.29*	35.61*	35.61*	91.41*
I*S*M*Y	2	27.55 ^{ns}	73.16 ^{ns}	8.35 ^{ns}	48.52 ^{ns}
Y*M(I*S)	8	92.17	29.46	1.23	25.18
ضریب تغییرات (%)		10.16	7.41	6.15	7.68

* و ** معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد، ns عدم معنی‌داری.

*and **significance at the five percent and one percent probability levels, ns non-significance.



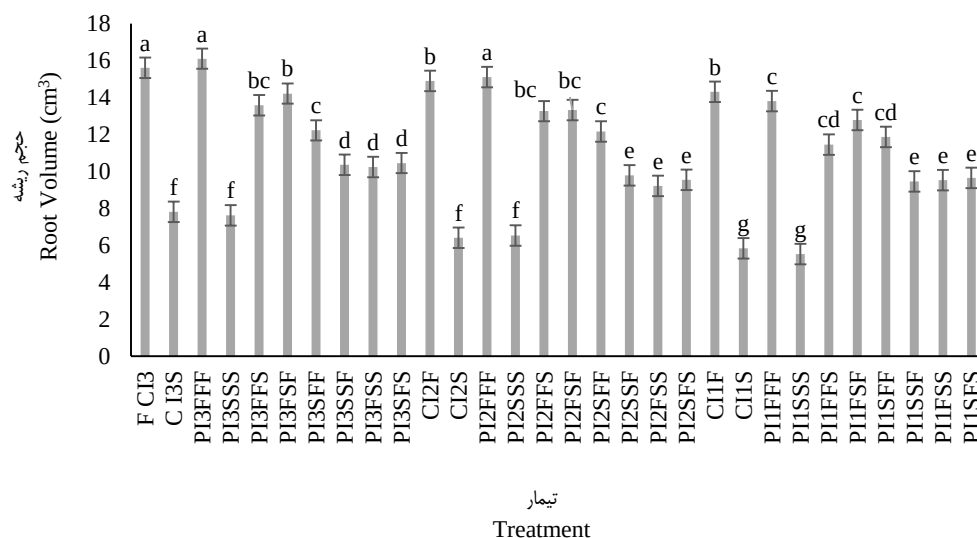
شکل ۲- اثر تیمارهای مورد مطالعه بر وزن تر و خشک ریشه



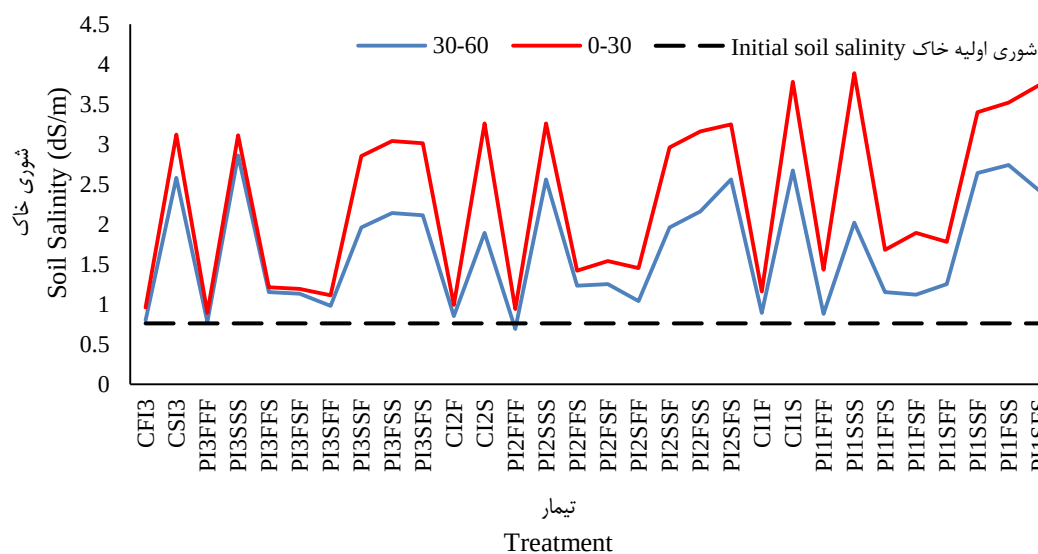
شکل ۳- اثر تیمارهای مورد مطالعه بر طول، ریشه

آبیاری قطره‌ای پیوسته با آب شیرین و عمق ۶۰ درصد نیاز آبی و آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۶۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین) بودند. در واقع، در صورت تأمین آبیاری پیوسته با آب شیرین، کم‌آبیاری اثری بر تغییرات شوری خاک نداشت. در صورتی که آبیاری پالسی اعمال شود؛ حتی در صورت اعمال سه پالس آبیاری شیرین، شوری خاک اندکی بیشتر از آبیاری پیوسته با آب شیرین بود. براساس نتایج به دست آمده، اگر آب شیرین در دو پالس اعمال شود و نیاز آبی ۸۰ درصد تأمین شود، شوری خاک افزایش چندانی ندارد.

تیمارهای ۵، ۶، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۱ و ۲۳ نیز شوری نهایی پائینی داشتند. این تیمارها به ترتیب شامل آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۱۰۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین)، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۱۰۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شور، پالس سوم آب شیرین)، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۸۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شیرین، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شور)، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۸۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شور، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین)، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۸۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شور، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شور)، پالس سوم آب شیرین)، آبیاری قطره‌ای پالسی و عمق ۸۰ درصد نیاز آبی (پالس اول آب شور، پالس دوم آب شیرین، پالس سوم آب شیرین)،



شکل ۴- اثر تیمارهای مورد مطالعه بر حجم ریشه
Figure 4- Effect of studied treatments on root volume



شکل ۵- اثر تیمارهای مورد مطالعه بر شوری خاک
Figure 5- Effect of studied treatments on soil salinity

نتیجه‌گیری

رطوبت در ناحیه ریشه و کاهش تجمع نمک در خاک شد که جذب آب و مواد مغذی توسط گیاه را تسهیل کرد. در شرایط آب شیرین و عمق کامل نیاز آبی، بیشترین صفات کمی (ارتفاع گیاه، وزن خشک و شاخص سطح برگ) و میزان کلروفیل مشاهده شد، در حالی که اعمال شوری یا تنش کم آبی با پالسی مناسب، کیفیت علوفه (قند محلول، پروتئین و پروتئین) را افزایش داد. به‌طور مشخص، ترکیب آبیاری پالسی با آب شور و کاهش ۴۰ درصدی عمق نیاز آبی (پالس‌های آب شور) بیشترین کیفیت علوفه را فراهم کرد و نشان داد که تنش کنترل شده می‌تواند به

این پژوهش به‌منظور ارزیابی تیمارهای مقدار آبیاری (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی)، شوری آب (شیرین و شور) و مدیریت آبیاری (قطره‌ای پیوسته و قطره‌ای پالسی) بر خصوصیات کمی و کیفی کینوا انجام شد. نتایج نشان داد که آبیاری قطره‌ای پالسی با عمق مناسب آبیاری می‌تواند رشد و عملکرد کینوا را بهبود دهد، به‌ویژه زمانی که تنش شوری یا کم آبی وجود دارد. آبیاری پالسی موجب توزیع یکنواخت‌تر

علوفه‌ای است. توصیه می‌شود که در شرایط کم‌آبی و استفاده از آب شور، سیستم پالسی با تنظیم مناسب عمق و ترتیب پالس‌ها به کار گرفته شود تا هم بهره‌وری آب افزایش یابد و هم کیفیت محصول حفظ شود.

بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای محصولات علوفه‌ای منجر شود. همچنین، بهترین بهره‌وری مصرف آب با ترکیب پالسی نیمه‌کامل آب شیرین و آب شور حاصل شد که هم تولید بالای علوفه و هم کیفیت مناسب را تضمین کرد. این نتایج نشان می‌دهد که آبیاری قطره‌ای پالسی یک ابزار کارآمد برای مدیریت آب و شوری در کینوا و سایر محصولات

References

1. Afsharmanesh, R., Rahimi, A., Sahafi, S.R., & Salehi, M. (2020). Physiological responses of quinoa plant to nitrogen application under saline conditions. *Journal of Crop and Horticultural Crop Production and Processing*, 11(4), 129-143. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jcpp.11.4.20089>
2. Afzalinejad, F., Ghasemi, S., Seifati, S.A., & Shahbazi Manshadi, Sh. (2019). The effect of sewage sludge on the growth and some nutrients of three quinoa genotypes in a calcareous and saline soil. *Soil and Water Sciences*, 24(4), 127-139. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jwss.24.4.42021>
3. Almeida, W.F.D., Paz, V.P.D.S., de Jesus, A.P., Silva, J.S.D., Gonçalves, K.S., & Oliveira, A.S.D. (2018). Yield of green beans subjected to continuous and pulse drip irrigation with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(7), 476-481. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p476-481>
4. Aly, A.A., Al-Barakah, F.N., & El-Mahrouky, M.A. (2018). Salinity stress promote drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(11): 1331-1343. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1457160>
5. Arabfard, M., Shahnazari, A., & Zia Tbar Ahmadi, M. (2019). Comparison of efficiency and productivity index of pulse irrigation with gravity pressures in sandy soil under watermelon cultivation. *Water and Soil*, 33(2), 216-205. <https://doi.org/10.22067/jsw.v33i2.70933>
6. Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in beta vulgaris. *Plant Physiology*, 24, 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
7. Association of Official Analytic Chemists (AOAC). (1990). 15th, Ed, Washington. D.C.
8. Awa, M., Zhao, J., & Tumaerbai, H. (2024). Deficit irrigation-based improvement in growth and yield of quinoa in the northwestern arid region in China. *Sustainability*, 16(10), 4136. <https://doi.org/10.3390/su16104136>
9. Bagheri, M. (2018). Quinoa Cultivation Handbook, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Institute for Research on Breeding and Seed Preparation. 56 pages. (In Persian)
10. Bates, L., Waldren, R., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
11. Carroll, J.L., Orr, S.T., Benedict, C.A., DeVetter, L.W., & Bryla, D.R. (2024). Feasibility of using pulse drip irrigation for increasing growth, yield, and water productivity of red raspberry. *HortScience*, 59(3), 332-339. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17467-23>
12. Derbali, I., Gharred, W., Manaa, J., Slama, I., & Koyro, H.-W. (2023). Mitigating salinity stress in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with biochar and superabsorber polymer amendments. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(6), 687-699. <https://doi.org/10.3390/plants13010092>
13. Dubois, D., Gilleres, K.A., & Hamilton, J.K. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
14. Ghaedi, S., Afrasiab, P., & Liaqat, A. (2015). Studying the effect of combining salt and fresh water in the Sistan region. *Iranian Soil and Water Research*, 46(3), 463-455. (In Persian with English abstract)
15. Ghorbani, Kh., & Jamali, P. (2021). Studying the effect of irrigation with a mixture of Caspian Sea and well water on the yield of Sajama quinoa cultivar under greenhouse conditions. *Soil and Water Conservation Research*, 28(2), 81-63. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18372.3397>
16. Jamali, S., & Ansari, H. (2019). The effect of water quality and irrigation management on the growth and yield of quinoa. *Water Research in Agriculture*, 33(3), 352-339. (In Persian with English abstract)
17. Jamali, S., Ansari, H., & Zeinuddin, S.M. (2020). Evaluation of the effect of nitrogen fertilizer and alternate furrow irrigation methods on water use efficiency in quinoa cultivation. *Water Management and Irrigation*, 11(2), 112-92. (In Persian with English abstract)
18. Jamali, S., Zein al-Din, S.M., & Kolahi, M. (2019). The effect of combined treatments of treated urban wastewater on the yield and yield components of quinoa plant. *Soil and Water Conservation Research*, 27(1), 181-195. (In Persian with English abstract)
19. Kafi, M.A., Borzoi, Salehi, M., Kamandi, A., Masoumi, A., & Nabati, J. (2009). Physiology of environmental stresses in plants, Jihad University of Mashhad Publications, Mashhad, 502 pages. (In Persian with English abstract)
20. Karimi, B., & Karimi, N. (2019). Simulation of wetted area of onion moisture in pulsed drip irrigation system. *Water and Soil*, 34(2), 349-364. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i2.82228>

21. Karmeli, D., & Peri, G. (1974). Basic principles of pulse irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 100(3), 309-319. <https://doi.org/10.1061/jrcea4.0000988>
22. Kohi-Cheleh-Karan, N., Alizadeh, A., & Davari, K. (2015). The effect of different irrigation rates on root length density and grain yield of corn under drip irrigation. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(3), 331-340. (In Persian with English abstract)
23. Levin, I., Van Rooyen, P.C., & Van Rooyen, F.C. (1979). The effect of discharge rate and intermittent water application by point source irrigation on the soil moisture distribution pattern. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 8-16. <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300010002x>
24. Lichtenthaler, H.K., & Welburn, A.R. (1983). Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591-592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
25. Linn, J.G., & Martin, N.P. (1999). Forage quality test and interpretations. Minnesota Extension service AG, FO.2637. [https://doi.org/10.1016/s0749-0720\(15\)30790-8](https://doi.org/10.1016/s0749-0720(15)30790-8)
26. Madane, D.A., Mane, M.S., Kadam, U.S., Thokal, R.T., Patil, S.T., Nandgude, S.B., & Dhekale, J.S. (2018). Effect of pulse irrigation (drip) influencing different irrigation levels on growth and yield parameters of white onion (*Allium cepa* L.). *Advanced Agricultural Research & Technology Journal*, 2(2), 228-234. <https://doi.org/10.15740/has/ijae/11.1/128-134>
27. Maestro-Gaitán, I., Granado-Rodríguez, S., Orús, M.I., Matías, J., Cruz, V., Bolaños, L., & Reguera, M. (2022). Genotype-dependent responses to long-term water stress reveal different water-saving strategies in *Chenopodium quinoa* Willd. *Environmental and Experimental Botany*, 201, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104976>
28. Meskini Vishkaei, F., Tafteh, A., Jafarnejadi, A., & Gosheh, M. (2021). Investigating the effect of periodic water deficit stress on quinoa plant yield and determining its water use-yield production function in saline soil (Case study: Khuzestan province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 16(6), 1255-1265. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jwss.28.4.62741>
29. Mohammadi, S., Mirlatifi, M., Dehghanisanich, H., & Homaei, M. (2019). The effect of pulse management in drip irrigation system on yield, yield components and water efficiency of forage corn, *Iranian Soil and Water Research*, 51(12): 3135-3145. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.309258.668726>
30. Payero, J.O., Melvin, S.R., Irmak, S., & Tarkalson, D. (2009). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 84, 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.01.009>
31. Piri, H., Ansari, H., & Parsa, M. (2018). The interaction effect of salinity, drought and harvesting dates on yield, quality and efficiency of forage sorghum in subsurface drip irrigation (Case study: Sistan plain). *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), 99-114.
32. Phogat, V., Skewes, M.A., Mahadevan, M., & Cox, J.W. (2013). Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. *Agricultural Water Management*, 118, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.015>
33. Rashki, P., Piri, H., & Khamari, E. (2022). Effect of potassium fertilization on roselle yield and yield components as well as IWUE under deficit irrigation regime. *South African Journal of Botany*, 148, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.03.048>
34. Razzaghi, F., Jacobsen, SE., Jensen, CR., & Andersen, MN. (2015). Ionic and photosynthetic homeostasis in quinoa challenged by salinity and drought- mechanisms of tolerance. *Functional Plant Biology*, 42(2), 136-148. <https://doi.org/10.1071/FP14132>. PMID: 32480660
35. Saberi, A.R. (2024). The effects of plant density and irrigation management on forage production of quinoa and forage sorghum. *Crop Production Journal*, 17(1), 81-98. (In Persian with English abstract)
36. Sheikhi-Sanandji, D., Heydari, G., Fathi, P., Sharifi, Z., & Khodaverdiloo, H. (2022). Studying the effect of different levels of vermicompost and irrigation on the yield and quality of quinoa forage. *Crop Plant Sciences*, 54(2), 15-29. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4963152/v1>
37. Stone, S.L., & Gifford, D.J. (1997). Structural and biochemical changes in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seeds during germination and early seedling growth: I storage protein reserves. *International Journal Plant Science*, 158, 727-737. <https://doi.org/10.1086/297484>
38. Telahigue, D., Yahia, L.B., Aljane, F., Belhouchett, K., & Toumi, L. (2017). Grain yield, biomass productivity and water use efficiency in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress. *Science of Food and Agriculture*, 1, 222-232. <https://doi.org/10.25081/jsa.2017.v1.67>
39. Tourajzadeh, O., Piri, H., Naserin, A., & Chari, M.M. (2024). Effect of nano biochar addition and deficit irrigation on growth, physiology and water productivity of quinoa plants under salinity conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 217, 105564. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105564>
40. Van Soest, P.J., Robertson, B., & Lewis, B.A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal Dairy Science*, 74, 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
41. Vennam, RR., Ramamoorthy, P., Poudel, S., Reddy, KR., Henry, WB., & Bheemanahalli, R. (2023). Developing

- functional relationships between soil moisture content and corn early-season physiology, growth, and development. *Plants (Basel)*, 28, 12(13), 2471. <https://doi.org/10.3390/plants12132471>. PMID: 37447032; PMCID: PMC10346487
42. Wang, J., & Zheng, H. (2017). Experimental study on the effect of temperature and flux conditions on moisture distribution in vadose zone soil. *Water Science Technology*, 75(3-4), 881-889. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.569>. PMID: 28234288
 43. Yan, H., & Nelson, B.Jr. (2022). Effects of soil type, temperature, and moisture on development of Fusarium root rot of soybean by *Fusarium solani* (FSSC 11) and *Fusarium tricinctum*. *Plant Disease*, 106(11), 2974-2983. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-21-2738-RE>

The Effect of Using Mealworm Frass and Spraying of Zinc Lignosulfonate on the Yield and Some Properties of Green Mung Bean (*Vigna radiata*) Seeds

N. Mirzababaei¹, A. Hassani^{1*}, M. Babaakbari Sari¹, A. Golchin¹

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

(*- Corresponding Author Email: akbar.hassani@znu.ac.ir)

Received: 10 June 2025

Revised: 08 September 2025

Accepted: 09 February 2026

Available Online: 09 February 2026

How to cite this article:

Mirzababaei, N., Hassani, A., Babaakbari Sari, M., & Golchin, A. (2026). The effect of using mealworm frass and spraying zinc lignosulfonate on the yield and some properties of green mung bean (*Vigna radiata*) seeds. *Journal of Soil and Water*, 39(5), 449-464. (In Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.93966.1486>

Introduction

Increasing the quality of food grains is one of the goals of sustainable agriculture. Mung bean (*Vigna radiata* L.) is one of the most important legume crops cultivated on more than 6 million hectares worldwide. There are few studies on the effect of mealworm frass application and its effectiveness on plant growth and yield. On the other hand, given the soil and climatic conditions of Iran, its high potential in legume production, and its economic justification, it seems necessary to pay attention to feeding mung beans with organic fertilizers. The cultivation of mung bean is increasingly developing in Iran, and its use for food and medicinal purposes is also increasing. Therefore, considering the possible positive effect of mealworm frass and zinc fertilizer on the growth of this plant, the present study was conducted to investigate the effect of these fertilizers on growth, yield indices, and the molar ratio of phytic acid to zinc in the seeds.

Materials and Methods

In this study, an experiment was conducted as a factorial experiment in a randomized complete block design with three replications. The aim was to investigate the effect of different levels of mealworm frass and zinc lignosulfonate foliar application on growth characteristics, yield, zinc concentration, the molar ratio of phytic acid to zinc, and some biochemical factors of mung bean seeds. The treatments included four levels of mealworm frass (0, 500, 1000 and 1500 kg ha⁻¹) and three levels of zinc foliar application during the flowering period (foliar application with irrigation water as a control and foliar application with concentrations of 2.5 and 5 g L⁻¹ of zinc lignosulfonate). Growth and yield indices including plant height, number of secondary stems, number of pods per plant, number of seeds per pod, pod length, and seed yield were measured. Also, some biochemical properties such as molar ratio of phytic acid to zinc, flavones, total flavonoids, total phenols, tannin concentration and percentage of antioxidant activity were measured. Nitrogen, phosphorus and potassium of mung bean seeds were also measured.

Results and Discussion

The results showed that the simple effect of mealworm frass was significant for all measured traits except the number of secondary stems, pod length, and number of seeds per pod. The simple effect of zinc lignosulfonate was significant for all measured traits except the number of secondary stems, pod length, number of seeds per pod and total phenol concentration, and seed tannin. The interaction effect of mealworm frass and zinc lignosulfonate for all measured traits except pod length and number of seeds per pod was significant. The highest grain yield (115.2 g m⁻²) was related to the treatment of 1500 kg of mealworm frass and 5 ppt zinc lignosulfonate foliar spray, which was in the same group as the treatment of 1500 kg mealworm frass with 0 and 2.5 g L⁻¹ zinc foliar spray, and the treatment of 1000 kg mealworm frass and 5 g L⁻¹ zinc foliar spray. While the lowest amount (80.1 g m⁻²)



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.2026.93966.1486>

was observed in the control treatment. The highest plant height (37.05 cm) was measured in the treatment of 500 kg mealworm frass with zero zinc application, and the lowest stem length (24.68 cm) was observed in the treatment of 500 kg of mealworm frass with the application of 5 g L⁻¹ zinc. The highest molar ratio of phytic acid to zinc (30.8) was observed in the treatment of 500 kg of mealworm frass and no foliar application of zinc lignosulfonate, which was not significantly different from the treatments of 0 kg of mealworm frass and 0 and 2.5 g L⁻¹ of zinc lignosulfonate application. While the lowest ratio (24.1) was observed in the treatment of 0 kg of mealworm frass and 5 g L⁻¹ zinc lignosulfonate application, which was not significantly different compared to the treatment of 1500 kg of mealworm frass and 2.5 and 5 g L⁻¹ of zinc lignosulfonate application. Foliar application of zinc reduced the molar ratio of phytic acid to zinc in the grain (maximum 21%), and application of mealworm frass increased this ratio up to 500 kg and then decreased it. Based on the results of this study, the application of 1000 kg of mealworm frass without zinc application was more effective in increasing the concentration of flavonoids and antioxidant activity. However, zinc foliar application was effective in increasing the concentration of phenolic compounds and tannin. The highest antioxidant activity (72.44%) was observed in the treatment of 1000 kg of mealworm frass without foliar application of zinc, and the lowest (58.18%) was measured in the treatment of 1500 kg of mealworm frass and application of 2.5 g L⁻¹ zinc lignosulfonate, followed by treatments of 500 kg of mealworm frass without foliar application of zinc lignosulfonate and foliar application of 2.5 g L⁻¹ zinc lignosulfonate. Zinc foliar spraying was effective in increasing the concentration of phenolic compounds and tannin content. Foliar application of zinc lignosulfonate increased the zinc and nitrogen content of the grain but had no effect on the phosphorus and potassium concentrations. Application of mealworm frass increased the nitrogen, phosphorus, and potassium content of the mung bean grain but simultaneously reduced the zinc concentration.

Conclusion

In general, the results of this study showed that the use of mealworm frass increased mung bean grain yield, and foliar spraying of zinc lignosulfonate increased the grain zinc concentration and reduced the molar ratio of phytic acid to zinc. Overall, the use of mealworm frass increased the yield, and the use of zinc lignosulfonate improved the grain quality.

Keywords: Antioxidant activity, Flavonoids, Molar ratio of phytic acid to zinc, Tannin, Total phenol

تأثیر کاربرد کود میلورم و محلول پاشی لیگنوسولفونات روی بر عملکرد و برخی ویژگی‌های دانه گیاه ماش سبز (*Vigna radiata*)

نیلوفر میرزابابایی^۱ - اکبر حسینی^{۱*} - محمد بابا اکبری ساری^۱ - احمد گلچین^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

چکیده

افزایش کیفیت دانه‌های غذایی یکی از اهداف کشاورزی پایدار می‌باشد. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف کود میلورم و محلول پاشی لیگنوسولفونات روی بر ویژگی‌های رشد، عملکرد، غلظت روی و نسبت مولی اسید فیتیک به روی و همچنین برخی فاکتورهای بیوشیمیایی دانه گیاه ماش (*Vigna radiata*) رقم پرتو آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان اجرا شد. تیمارها شامل چهار سطح کود میلورم (۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار) و دو سطح محلول پاشی لیگنوسولفونات روی در دوره گل‌دهی (محلول پاشی با آب آبیاری به عنوان شاهد، محلول پاشی با غلظت‌های ۲/۵ و ۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی) بودند. شاخص‌های رشد و عملکرد شامل ارتفاع گیاه، تعداد ساقه‌های فرعی، تعداد غلاف در هر بوته، تعداد دانه در هر غلاف، طول غلاف و محصول دانه اندازه‌گیری شدند. همچنین برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی مانند نسبت مولی اسید فیتیک به روی، فلاون، فلاونوئید کل، فنل کل، غلظت تانن، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم دانه ماش مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کاربرد کود میلورم به تنهایی در افزایش تعداد ساقه، طول ساقه اصلی، میزان فلاونوئیدها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بذر ماش مؤثرتر از کاربرد تلفیقی کود میلورم و روی بود. همچنین، محلول پاشی لیگنوسولفونات روی به تنهایی و همچنین همراه با کود میلورم سبب افزایش غلظت روی (حداکثر ۴۵ درصد) در بذر ماش شد. بیشترین محصول دانه (۱۱۵/۲ گرم در متر مربع) مربوط به تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و کمترین میزان (۸۰/۱ گرم در متر مربع) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی صفر روی دیده شد. محلول پاشی با روی نسبت مولی اسید فیتیک به روی دانه را کاهش داد (حداکثر ۲۱ درصد) و کاربرد کود میلورم تا ۵۰۰ کیلوگرم این نسبت را افزایش و پس از آن کاهش داد. بر اساس نتایج این پژوهش کاربرد هزار کیلوگرم کود میلورم بدون کاربرد روی، در افزایش میزان فلاونوئیدها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی مؤثرتر بود. با این حال محلول پاشی روی در افزایش میزان ترکیبات فنلی و میزان تانن مؤثر بود.

واژه‌های کلیدی: تانن، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فلاونوئیدها، فنل کل، نسبت مولی اسید فیتیک به روی

مقدمه

چین، هند، بنگلادش، پاکستان و برخی کشورهای جنوب شرقی آسیا و همچنین در مناطق خشک جنوب اروپا و بخش‌های گرم‌تر کانادا و ایالات متحده به طور گسترده کشت می‌شود (Dahiya et al, 2015). در رژیم‌های غذایی عمدتاً غلات محور ایران، ماش به عنوان یک غذای رایج برای قرن‌ها مصرف شده است. ماش حاوی مواد غذایی متعادل شامل پروتئین، فیبر، مواد معدنی، ویتامین‌ها و مقادیر قابل توجهی از ترکیبات مغذی مفید است (Gan et al., 2017). برای افرادی که نمی‌توانند پروتئین‌های حیوانی را تهیه کنند یا گیاه‌خوار هستند، ماش

ماش سبز (*Vigna radiata* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات خوراکی حبوبات است که در بیش از ۶ میلیون هکتار در سراسر جهان کشت می‌شود (حدود ۸/۵ درصد از مساحت جهانی حبوبات) و توسط اکثر خانوارها در آسیا مصرف می‌شود. به دلیل ویژگی‌های آن از جمله تحمل نسبتاً بالا به خشکی، نیاز کم به نهاده‌های کشاورزی و دوره رشد کوتاه (حدود ۷۰ روز)، ماش در بسیاری از کشورهای آسیایی (عمدتاً در

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: akbar.hassani@znu.ac.ir)

باعث افزایش غلظت روی در دانه‌های ماش شده است (Hussain *et al.*, 2021). مواد غذایی غنی ماش سبز، از جمله مواد معدنی، روی، فیبر رژیمی و مقادیر قابل توجهی از ترکیبات بیولوژیکی فعال نیز آن را به یک غذای عملکردی خوب تبدیل می‌کند. به علاوه، پلی‌فنول‌ها، پلی‌ساکاریدها و پپتیدهای موجود در ماش خواص آنتی‌اکسیدانی دارند که می‌تواند به پیشگیری از بیماری‌ها کمک کند. تا به امروز، ماش و عصاره‌های آن نشان‌دهنده اثرات قابل توجه سلامت، مانند فعالیت‌های ضد فشار خون، ضد سرطان، حفاظت کبدی و تنظیم ایمنی بوده‌اند (Liyana *et al.*, 2018; Ali *et al.*, 2014).

در سال‌های اخیر پرورش و تولید حشرات به‌منظور خوراک دام و طیور در ایران افزایش یافته است. در حال حاضر چندین مرکز پرورش میلورم^۱ در ایران در حال فعالیت هستند. میلورم در بستر سبوس پرورش داده می‌شود و پس از اتمام دوره رشد، بستر میلورم محتوی بقایای جسم کرم میلورم، مدفوع آن و اندکی سبوس می‌باشد که از آن به‌عنوان کود میلورم در مزارع کشاورزی استفاده می‌شود. خصوصیات شیمیایی کود میلورم نشان می‌دهد که غلظت نیتروژن (۵ درصد)، پتاسیم (۱/۷ درصد)، فسفر (۲ درصد) و کربن آلی (۳۹ درصد) در آن به اندازه غلظت‌های موجود در کود دامی و به‌ویژه کود مرغی است که پتانسیل بالای تغذیه‌ای آن را تأیید می‌کند (Houben *et al.*, 2020). همچنین گزارش شده است که مقدار کربن محلول آن زیاد و مقدار کربن شبه سلولز و شبه لیگنین در آن کمتر بوده و از این نظر تشابه زیادی با کود مرغی دارد (Li *et al.*, 2013). گزارش شده است که کود میلورم به دلیل معدنی شدن سریع آن و وجود مواد مغذی به شکلی که به راحتی در دسترس است، به اندازه کود کامل NPK برای بهبود زیست‌توده و جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم توسط جو قابل استفاده است (Houben *et al.*, 2020). استفاده از این کود می‌تواند نتایج قابل قبولی در مزارع و باغات داشته باشد.

روی یک عنصر غذایی ضروری برای رشد مطلوب گیاه در تشکیل و فعالیت هورمون‌های رشد، طویل شدن فاصله گره‌ها، تشکیل کلروپلاست، سنتز نوکلئوتیدها، تنظیم آب گیاه و نشاسته دانه غلات نقش دارد. روی به‌عنوان فعال‌کننده و کوفاکتور برخی آنزیم‌های حیاتی گیاه از جمله کربونیک انیدرازها، دهیدروژنازها، آلکالین فسفاتازها، فسفولیپازها و RNA پلیمرازها در متابولیسم قندها، پروتئین‌ها، چربی‌ها و اسیدهای نوکلئیک، فتوسنتز گیاه و بیوسنتز اکسین به‌عنوان یک هورمون محرک رشد ایفای نقش می‌کند. درحالی‌که همین عنصر در غلظت‌های بالا به‌عنوان یک فلز سنگین، موجب اختلالات متابولیکی و در نهایت بازدارندگی رشد در اکثر گونه‌های گیاهی می‌شود (Broadley *et al.*, 2007). کمبود روی مهم‌ترین مشکل گیاهان سراسر دنیا از نظر مواد غذایی کم‌مصرف به‌خصوص در کشورهایی که

منبع پروتئینی با هزینه نسبتاً پایین و خوبی برای آنان است. علاوه بر این، پروتئین ماش در مقایسه با پروتئین سایر حبوبات به راحتی قابل هضم است (Mubarak, 2005). مصرف ماش همراه با غلات برای افزایش قابل توجه کیفیت پروتئین توصیه شده است، زیرا غلات غنی از آمینواسیدهای حاوی گوگرد و دارای کمبود لیزین هستند (Boye *et al.*, 2010). ترکیب نمودن ماش سبز با برنج سبب افزایش کیفیت و تنوع آمینواسید پروتئین این دو محصول شده و این ترکیب به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای مصرف غذایی پیشنهاد شده است (Dahiya *et al.*, 2015). مشخص شده است که قابلیت هضم پروتئین رژیم غذایی ترکیب برنج و ماش ۸۴/۴ درصد از آنچه برای رژیم غذایی ترکیب برنج و گوشت در نوزادان مشاهده شده است، می‌باشد که تقریباً نیازهای انسان به پروتئین را برآورده می‌کند (Hussain *et al.*, 1983). علاوه بر این، پروتئین‌های گیاهی می‌توانند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با پروتئین‌های حیوانی کمک کنند و تعادل بهتری بین عادات غذایی و حفاظت از محیط‌زیست ایجاد کنند (Di Paola *et al.*, 2017). ماش باعث نفخ کمتری شده و به خوبی توسط کودکان تحمل می‌شود. در بسیاری از مطالعات، ماش به‌عنوان مکملی برای تهیه غذای کمکی نوزادان به‌دلیل محتوای بالای پروتئین آن توصیه شده است (Kumar Dahiya *et al.*, 2014). در پاکستان، تقریباً ۲۵ درصد از تمام آهن موجود در رژیم غذایی توسط حبوبات تأمین می‌شود و ماش توسط تمام خانوارها مصرف می‌شود (Nair *et al.*, 2013). با این حال، وجود عوامل نامطلوب در ماش ممکن است ارزش بیولوژیکی مواد غذایی آن را محدود کند. به‌عنوان مثال، اسید فیتیک می‌تواند با چندین کاتیون دو ظرفیتی مهم مانند آهن، روی، کلسیم و منیزیم پیوند برقرار کند و جذب و استفاده از مواد معدنی در روده کوچک را محدود کند (Sandberg, 2007). با این حال، می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف فرآوری، مانند تخمیر، جوانه‌زنی، پوست‌کنی و پخت، عامل ضد تغذیه را کاهش یا حذف کرد (Barakoti & Bains, 2007; Tajoddin *et al.*, 2011). گزارش شده است پس از جوانه‌زنی، محتوای اسید فیتیک در ماش به میزان ۷۶ درصد کاهش یافت و مقادیر زیستی روی و آهن به‌ترتیب ۳ و ۲/۴ برابر بیشتر از ماش خام افزایش یافت. بنابراین، برخی ویژگی‌های نامطلوب مانع از استفاده از ماش نمی‌شود (Wang *et al.*, 2015). همچنین غنی‌سازی این محصول با کاربرد کودهای محتوی آهن و روی تأثیر قابل توجهی بر کاهش نسبت مولی اسید فیتیک به روی و آهن در این محصول خواهد داشت (Hummel *et al.*, 2020). برخی از مطالعات نشان داده‌اند که استراتژی‌های غنی‌سازی زراعی، به‌صورت کاربرد کودهای خاکی و یا محلول‌پاشی، پیشرفت‌های زیادی در افزایش غلظت روی در دانه‌های غلات و حبوبات داشته‌اند. مشخص شد که کاربرد محلول‌پاشی روی

خاک‌های آن‌ها دارای روی قابل دسترس کمی هستند، می‌باشد (Alloway, 2008). کمبود این عنصر، تشکیل دانه و قدرت حیات آن را کاهش می‌دهد. آسیب به ساختمان گرده و تشکیل میوه حتی تا زمانی که گیاهان در زمان گل‌دهی از دریافت روی محروم شوند نیز مشاهده می‌شود، اما این میزان کمتر از حالتی که گیاهان از ابتدا عنصر روی کمتر دریافت می‌کنند، می‌باشد. رفع کمبود روی در شروع گل‌دهی، شدت اثرات کمبود روی را بر باروری دانه گرده و تولید دانه کاهش می‌دهد و باعث افزایش تعداد دانه در بوته، وزن هزاردانه و قدرت حیات بذر می‌شود (Pandey et al., 2006). در این میان کمپلکس‌های ارگانیک طبیعی روی مانند لیگنوسولفونات روی، گروهی از کودهای روی را تشکیل می‌دهند که از کلات‌های سنتزی مانند روی-ادتا^۱ تجزیه‌پذیرتر و ارزان‌تر هستند زیرا از محصولات جانبی تولید خمیر کاغذ از طریق فرآیند سولفیت به‌دست می‌آیند. پلیمرهای لیگنین به‌دلیل داشتن گروه‌های عاملی سولفونیک اسید به ترکیبات محلول در آب تبدیل می‌شوند. در سال‌های اخیر کاربرد این کودهای لیگنوسولفونات در کشورهای اتحادیه اروپا به‌ویژه کشور اسپانیا افزایش چشمگیری داشته است به‌نحوی که بیش از ۲۵ درصد از کودهای روی فروخته شده در بازار اسپانیا از لیگنوسولفونات به‌عنوان عامل کمپلکس کننده استفاده کرده‌اند (Sánchez Jiménez & Lucena, 2015). قوانین اتحادیه اروپا کاربرد این ترکیب را در کوددهی، به شکل محلول پاشی و اخیراً کاربرد مستقیم در خاک مجاز می‌داند (EFSA, 2015). برخی محققان کارایی این کمپلکس‌ها را در شرایط کشت هیدروپونیک، در خاک یا محلول پاشی برگی مورد بررسی قرار داده‌اند (Álvarez-Fernández et al., 2007; Gonzalez et al., 2008; Martin-Ortiz et al., 2009; Benedicto et al., 2011) و در اغلب موارد اثربخشی این کود قابل توجه بوده است.

با توجه به مطالعات اندک در زمینه تأثیر کاربرد کود میلورم و اثربخشی آن بر رشد و عملکرد گیاهان و همچنین با در نظر گرفتن شرایط خاکی و اقلیمی کشور ایران و پتانسیل بالای آن در تولید حبوبات و توجیه اقتصادی آن، توجه به تغذیه گیاه ماش با کودهای آلی ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به توسعه روزافزون کشت گیاه ماش در ایران و افزایش کاربرد آن جهت مصارف غذایی و دارویی و همچنین تأثیر مثبت احتمالی کود میلورم و روی بر رشد این گیاه، پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر این کودها بر رشد، شاخص‌های عملکرد و نسبت مولی اسید فیتیک به روی در دانه این گیاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی پاسخ گیاه ماش به سطوح مختلف کود میلورم و

لیگنوسولفونات روی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک-های کامل تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار در فضای باز انجام شد. فاکتور اول شامل ۴ سطح کود میلورم (صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود میلورم) و فاکتور دوم شامل محلول پاشی عنصر لیگنوسولفونات روی در سه سطح (محلول پاشی آب آبیاری به‌عنوان شاهد، محلول پاشی لیگنوسولفونات روی با غلظت ۲/۵ گرم در لیتر و محلول پاشی با غلظت ۵ گرم لیتر) بود. کود میلورم از یک مزرعه تولید کرم میلورم با نام مزرعه ورمیکا تهیه شد. لیگنوسولفونات روی نیز از شرکت تولیدکننده کود اینترجپال^۲ اسپانیا تهیه شد. در مجموع تعداد ۳۶ کرت آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. طول هر کرت ۴ متر و عرض آن ۳ متر بود. کود میلورم به‌صورت کود پایه قبل از کشت بذرها به زمین اضافه شد و با خاک تا عمق ۲۰ سانتی‌متری مخلوط شد. محلول پاشی روی از زمان قبل از گل‌دهی تا زمان تشکیل غلاف بوته‌ها (حدود یک ماه) در مجموع چهار مرتبه انجام شد. این پژوهش در بخش کهریزک شهرستان ری واقع در استان تهران به اجرا درآمد. برخی ویژگی‌های خاک منطقه مورد کشت در جدول ۱ ارائه شده است. بذر مورد استفاده، ماش سبز رقم پرتو (*Vigna radiata*) بود و کشت گیاهان در نیمه اول تیر ماه انجام شد. بذر مورد استفاده از شرکت بذر مهردشت اصفهان تهیه شد. در طی رشد گیاهان، انجام عملیات داشت مانند مبارزه با علف‌های هرز، آبیاری (به روش قطره‌ای و با هدایت الکتریکی ۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) و غیره برای کلیه تیمارها به‌صورت یکسان صورت گرفت. برداشت بوته‌ها در مرحله رسیدگی نیام‌ها (قهوه‌ای شدن رنگ آنها) که مصادف با نیمه دوم شهریور ماه بود انجام شد. در هر کرت ۸ بوته انتخاب شدند (هر کدام به‌عنوان یک قرائت) و مهم‌ترین شاخص‌های رشد و عملکرد شامل تعداد ساقه، طول ساقه، تعداد کل غلاف در هر بوته، تعداد بذر در هر غلاف، طول غلاف و محصول دانه اندازه‌گیری شد. پس از برداشت، غلاف‌های بوته‌ها به‌دقت به‌صورت جداگانه برداشت و در دمای محیط خشک گردید و تمیز کردن و جداسازی بذرها به‌صورت دستی انجام شد. با توجه به اینکه از دانه این گیاه به‌عنوان بخش دارویی و غذایی استفاده می‌گردد مهم‌ترین ویژگی‌های بیوشیمیایی عصاره بذر (فلاون و فلاونول، فلاونوئید کل، ترکیبات فنلی کل، میزان تانن و فعالیت آنتی‌اکسیدانی)، مورد سنجش قرار گرفت.

به‌منظور اندازه‌گیری فاکتورهای بیوشیمیایی بذر، عصاره‌گیری از نمونه‌های بذر با استفاده از حلال متانولی ۷۰ درصد به نسبت ۵ به ۱ (حجمی- وزنی) به روش خیساندن^۳ انجام شد (Wojdylo et al., 2007). برای تمامی تیمارها میزان ۵ گرم نمونه بذر، کاملاً آسیاب گردید و به لوله فالکون انتقال یافت و سپس میزان ۲۵ میلی‌لیتر حلال

از تهیه نمونه‌های مناسب و آسیاب کردن آنها ابتدا به روش اکسایش خشک و تر، نیتروژن به روش کج‌دال، فسفر به روش رنگ‌سنجی با دستگاه اسپکتروفوتومتر، پتاسیم به روش شعله‌سنجی با دستگاه فلیم فتومتر و آهن و روی به روش اسپکتروفوتومتری جذب اتمی با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (Karla, 1997). آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و Excell و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

براساس نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر کود میلورم و روی بر همه صفات اندازه‌گیری شده به‌جز تعداد بذر در غلاف، طول غلاف و غلظت آهن دانه معنی‌دار بود (جدول ۲) که نتایج آن به شرح ذیل می‌باشد:

ویژگی‌های مورفولوژیکی

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار اثر متقابل کود میلورم و روی بر تعداد ساقه فرعی بود. در حالی که اثر ساده کود میلورم و محلول‌پاشی روی بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲). بیشترین تعداد ساقه (۶/۴۹) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم بدون کاربرد روی و بعد از آن (۵/۶۸) در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم و محلول-پاشی ۲/۵ گرم در لیتر روی، مشاهده شد. در حالی که کمترین تعداد ساقه (۴/۱۲) در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم بدون کاربرد روی یافت شد که با سایر تیمارها در یک گروه قرار داشت (جدول ۳). بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات ساده و متقابل تیمارها بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۲). بدون در نظر گرفتن اثر ساده تیمارها، بیشترین طول ساقه (۳۷/۰۵ سانتی‌متر) در تیمار ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم بدون کاربرد روی دیده شد که با تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم بدون کاربرد روی در یک گروه قرار داشتند و کمترین طول ساقه نیز (۲۴/۶۸ سانتی-متر) در تیمار ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم با کاربرد ۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی، مشاهده شد (جدول ۳). بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرات ساده و متقابل روی و کود میلورم بر تعداد غلاف در بوته معنی‌دار بود (جدول ۲). در بررسی اثرات متقابل کود میلورم و محلول-پاشی روی، بیشترین تعداد غلاف در بوته (۴۱) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و محلول‌پاشی ۵ گرم در لیتر روی، دیده شد. در حالی که کمترین میزان (۱۱) مربوط به تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم و صفر روی بود (جدول ۳).

به آنها اضافه شد و مدت ۲۴ ساعت روی شیکر با دور ۲۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. سپس به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شده و قسمت روشن‌آور صاف گردید و به‌عنوان عصاره جهت انجام آزمایش‌های بعدی در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. میزان فلاون و فلاونول به روش پاپوا و همکاران (Popova et al., 2004) اندازه‌گیری شد و نتایج به‌صورت میلی‌گرم اکی‌والانت کوئرستین در گرم وزن خشک بیان شد. در ادامه برای رسم منحنی استاندارد، از غلظت‌های مختلف کوئرستین استفاده شد. اندازه‌گیری میزان فلاونوئید کل با استفاده از معرف کلرید آلومینیوم انجام شد. تبدیل داده‌های حاصل از جذب به غلظت‌های مختلف کوئرستین با رسم منحنی استاندارد کوئرستین (غلظت‌های ۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) انجام شد و نتایج بر اساس میلی‌گرم کوئرستین در گرم وزن خشک بیان شد (Menichini et al., 2009). محاسبه میزان تانن موجود در عصاره بذرها بر اساس روش اسیدکلریدریک-وانیلین در طول موج ۵۰۰ نانومتر انجام شد و از ترکیب کاتکین^۱ به‌عنوان استاندارد استفاده شد (Broadhurst & Jones, 1978). ترکیبات فنلی کل با استفاده از معرف فولین سیوکالتو^۲ در طول موج ۷۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. غلظت‌های مختلف گالیک اسید به‌عنوان استاندارد مورد استفاده قرار گرفت و داده‌ها به‌صورت میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن خشک بیان شد (Wojdylo et al., 2007). اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها بر اساس آزمون DPPH^۳ با اعمال تغییرات جزئی بر اساس روش اوکه و همکاران (Oke et al., 2009) انجام شد.

اندازه‌گیری اسید فیتیک به روش هاگ و لانتسچ (Haug & Lantzsch, 1984) انجام شد. اساس این روش بر مبنای رسوب فیتات آهن و اندازه‌گیری آهن باقیمانده در محلول رویی (محلول باقیمانده) می‌باشد. بدین‌منظور نیم گرم بذر آسیاب شده ماش با ۲۵۰ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک (pH=3) به مدت سه ساعت عصاره‌گیری شد و با استفاده از آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس یک میلی‌لیتر از این عصاره به لوله‌های سانتریفیوژ منتقل شده و یک میلی‌لیتر از محلول آهن فریک به آن افزوده شد. لوله‌های مورد آزمایش روی پایه ای مناسب روی حمام بن‌ماری ثابت شده و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب جوش نگهداری شدند. پس از اتمام این دوره و سرد شدن لوله‌ها و رسیدن به دمای اتاق، محتوای لوله‌ها مخلوط و در دور ۳۰۰۰ به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. در ادامه یک میلی‌لیتر از محلول روشن‌آور به لوله دیگری منتقل شده و با افزودن ۱/۵ میلی‌لیتر محلول بی‌پیریدین، جذب در طول موج ۵۱۹ نانومتر با استفاده از دستگاه طیف‌سنج خوانده شد. نسبت مولی اسید فیتیک به روی از تقسیم میلی‌مول اسید فیتیک به میلی‌مول روی محاسبه شد. برای اندازه‌گیری عناصر غذایی دانه پس

3- 2,2-diphenylpicrylhydrazyl, Sigma, Aldrich

1- Catechin

2- Folin Ciocalteu Sigma-Aldrich

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی و برخی عناصر غذایی موجود در خاک مورد کشت گیاه ماش سبز

Table 1- Physicochemical characteristics and some nutritional elements in the soil cultivated with mung bean plant

اسیدیته	هدایت الکتریکی	رطوبت اشباع خاک	نیتروژن کل	فسفر قابل استفاده	پتاسیم قابل استفاده
Soil pH	EC dS m ⁻¹	Saturated soil moisture %	N %	P mg kg ⁻¹	K mg kg ⁻¹
7.62	0.85	32	0.038	8.24	227
شن	سیلت	رس	بافت خاک	مواد آلی	کربنات کلسیم معادل
Sand %	Silt %	Clay %	Soil texture	OM %	CaCO ₃ %
52	30	18	loam	0.42	23

جدول ۲- آنالیز واریانس (میانگین مربعات) تأثیر سطوح مختلف کود میلورم و محلول پاشی روی بر شاخص‌های رشد و ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه ماش

Table 2- Analysis of variance (mean squares) of the effect of different mealworm frass content and zinc foliar application on growth and yield characteristics of mung bean (*Vigna radiata*)

منبع تغییر	درجه آزادی	تعداد ساقه	طول ساقه	تعداد غلاف	طول غلاف	تعداد بذر در غلاف	محصول دانه
Source of variance	Df	Shoot number	Shoot length	Pod number	Pod length	Number of seed per pod	Seed yield
بلوک	2	0.16	2.44	121.69	0.66	0.83	420.36
کود میلورم	3	0.06ns	16.52*	746.32**	0.12ns	0.12ns	2421.48**
روی	2	0.44ns	23.41**	914.03**	0.17ns	0.34ns	1362.93*
کود میلورم*روی	6	1.93**	76.28**	2934.59**	0.29ns	0.94ns	5310.22**
منبع تغییرات	فلانون و فلاونول	فلانونوئید کل	فنل کل	میزان تانن	فعالیت آنتی‌اکسیدانی	روی	نسبت مولی
Source of variance	Flavone and flavonol	Total flavonoid	Total phenol	Tannin content	Antioxidant activity	Zinc	Phy acid/Zn
بلوک	0.01	0.07	4.21	0.47	3.478	3.74	97.23
کود میلورم	2.15**	1.98**	23.42**	4.74**	110.20**	18.93*	475.21**
روی	0.54**	1.23**	1.98ns	1.18ns	60.34**	28.31**	884.73**
کود میلورم*روی	0.52**	1.76**	23.14**	4.32**	57.23**	56.48**	1624.59**
منبع تغییرات	نیتروژن	فسفر	پتاسیم				
Source of variance	Nitrogen	Phosphorous	Potassium				
بلوک	0.18	0.02	0.01				
کود میلورم	1.92**	1.81**	1.52**				
روی	0.48**	0.71**	0.98ns				
کود میلورم*روی	0.59**	0.76**	0.44**				

ns و ** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و عدم معنی‌داری.

*, ** ns: Significant at 5% and 1% probability level and no significant, respectively.

عملکرد دانه

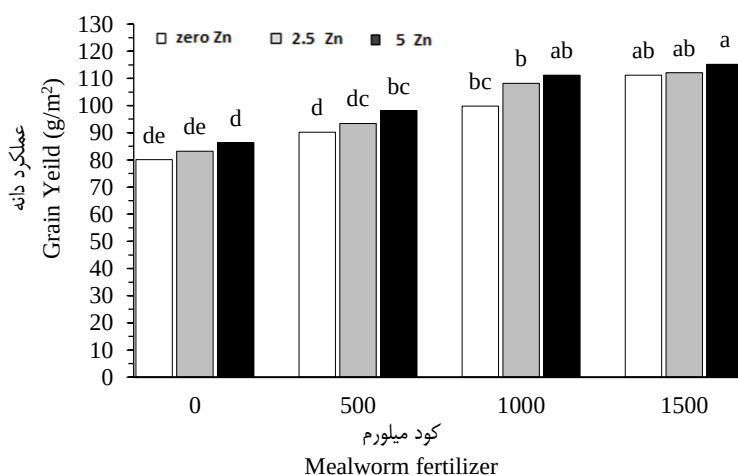
محصول دانه معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که بیشترین محصول دانه (۱۱۵/۲ گرم در متر مربع) مربوط به تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات ساده و متقابل تیمارها بر

فلاون‌ها و فلاونول‌ها

نتایج نشان‌دهنده اثرات معنی‌دار ساده و متقابل تیمارها بر این صفت بود (جدول ۲) در بررسی اثرات متقابل کود میلورم و روی، بیشترین میزان (۰/۸۲ میلی گرم) در تیمار شاهد (عدم کاربرد کود میلورم و روی) و کمترین میزان (۰/۰۵ میلی گرم) در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم بدون کاربرد روی مشاهده شد که با سایر تیمارهای کاربرد ۱۵۰۰ کیلوگرم میلورم در یک گروه قرار داشت (جدول ۳).

کود میلورم و ۵ گرم در لیتر محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی بود که با سایر تیمارهای ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم در یک گروه قرار داشتند. کمترین میزان (۸۰/۱ گرم) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم و محلول‌پاشی صفر روی، مشاهده شد (شکل ۱). لازم به ذکر است که بین این تیمار و تیمار بدون کود میلورم و محلول‌پاشی ۲/۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی، اختلاف معنی‌داری از نظر آماری وجود نداشت (شکل ۱).



شکل ۱- اثر متقابل مقادیر مختلف کود میلورم و محلول‌پاشی روی بر محصول دانه گیاه ماش سبز (*Vigna radiata*)

Figure 1- Interaction effect of different mealworm level and zinc spraying on grain yeild of Mung bean seed (*Vigna radiata*)

جدول ۳- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف کود میلورم و محلول‌پاشی روی بر برخی شاخصه‌های رشد و ویژگی‌های بیوشیمیایی بذر گیاه ماش سبز (*Vigna radiata*)

Table 3- Mean comparison of interaction effect of different mealworm level and zinc spraying on some growth and biochemical factors properties of Mung bean plant (*Vigna radiata*)

فاکتور اول	فاکتور دوم	تعداد ساقه فرعی	طول ساقه اصلی	تعداد غلاف در هر بوته	فلاون و فلاونول	فلاونوئید کل	میزان تانن
Factor A	Factor B	Shoot number	Length of main shoot (cm)	Pod number per plant	Flavone and flavanol (mg quercetin g ⁻¹ DW)	Total flavonoid	Tannin content (mg catechin g ⁻¹ DW)
		-	(cm)	-	(mg quercetin g ⁻¹ DW)		(mg catechin g ⁻¹ DW)
Ck	CK	4.22bc	30.19b-e	11de	0.82a	2.59ab	7.44abc
	2.5	5.30abc	28.01de	26bc	0.66b	0.91e	6.31bcd
	5	5.43abc	30.80abc	24bcd	0.65b	1.03e	9.05a
500	CK	4.80bc	37.05a	32ab	0.55bc	1.64cde	5.46cd
	2.5	5.63ab	34.03a-d	21a	0.64b	2.72ab	5.73bcd
	5	4.37bc	24.68e	18de	0.66b	2.63ab	7.17a-d
1000	CK	4.12c	26.37e	31ab	0.63b	3.28a	7.78ab
	2.5	5.68abc	27.13e	15b-e	0.15cd	2.25bcd	7.57ab
	5	5.45abc	34.73abc	31b	0.05d	2.25bcd	6.21bcd
1500	CK	6.49a	36.20ab	33ab	0.09d	2.29bc	6.11bcd
	2.5	4.60bc	29.69cde	13cd	0.16cd	2.62ab	5.34cd
	5	4.79bc	30.18b-e	41a	0.07d	1.38de	5.16d

فاکتور اول: کود میلورم (کیلوگرم بر هکتار)، فاکتور دوم: محلول‌پاشی روی (گرم بر لیتر)، CK: شاهد

حروف متفاوت در داده‌های مرتبط با هر صفت، نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین میانگین مقادیر با توجه به آزمون دانکن ($P < 0.05$) هستند.

Factor A: Mealworm fertilizer (kg⁻¹ ha), Factor B: zinc foliar application (per thousand), CK: Control, DW: dry weight

Means followed by the different letters in each column and row in relation each factor is significantly different at 5% probability level using Duncan test.

جدول ۴- تأثیر سطوح مختلف کود میلورم و محلول پاشی لیگنوسولفونات روی بر برخی ویژگی های بیوشیمیایی و غلظت عناصر غذایی دانه گیاه ماش سبز (*Vigna radiata*)

Table 4- The effect of different mealworm concentration and zinc spraying on some biochemical factors and nutrient elements of Mung bean

فاکتور اول Factor A	فاکتور دوم Factor B	ترکیبات فنلی کل Total phenol (mg gallic acid g ⁻¹ DW)	فعالیت آنتی اکسیدانی Antioxidant activity (%)	روی دانه Zinc	نیتروژن دانه Nitrogen (mg kg ⁻¹ DW)	فسفر دانه Phosphorous	پتاسیم دانه Potassium
Ck	CK	15.01cd	66.63a-d	27.44bc	3120cd	379c	579bc
	2.5	12.36d	69.11abc	26.41bc	3322bcd	382bc	582bc
	5	15.62bcd	71.24ab	39.85a	3365bcd	388bc	588bc
500	CK	12.41d	59.99d	25.46bcd	3502abcd	384bc	594bc
	2.5	19.91a	58.59d	25.73bcd	3685abc	390b	590bc
	5	20.72a	65.17a-d	36.47ab	3553abc	391b	591bc
1000	CK	19.31ab	72.44a	22.71cd	3712abc	394b	604ab
	2.5	17.98abc	62.44bcd	27.57bc	3822ab	392b	632a
	5	16.50a-d	60.81cd	32.31ab	3771abc	410ab	611ab
1500	CK	18.81abc	64.65a-d	20.22cd	3721abc	410ab	610ab
	2.5	18.44abc	58.18d	25.34bcd	3862ab	408ab	601ab
	5	13.88cd	64.50a-d	31.26bc	3832ab	412a	612ab

فاکتور اول: کود میلورم (کیلوگرم بر هکتار)، فاکتور دوم: محلول پاشی روی (در هزار)، CK: (شاهد)

حروف متفاوت در داده های مرتبط با هر صفت، نشان دهنده تفاوت معنی دار بین میانگین مقادیر با توجه به آزمون دانکن ($P < 0.05$) هستند.

Factor A: Mealworm fertilizer (kg⁻¹ he), Factor B: zinc foliar application (per thousand), CK: Control, DW: dry weight

Means followed by the different letters in each column and row in relation each factor is significantly different at 5% probability level using Duncan test.

میزان فلاونوئید کل

نتایج نشان داد که با افزایش کاربرد کود میلورم تا سطح ۱۰۰۰ کیلوگرم میزان فلاونوئیدها افزایش و سپس تا حدودی کاهش داشت. در بررسی اثر متقابل کود میلورم و روی مشاهده می گردد که بیشترین میزان فلاونوئید کل (۳/۲۸ میلی گرم) در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم بدون محلول پاشی روی، یافت شد. در حالی که کمترین میزان (۰/۹۱ و ۱/۰۳ میلی گرم) به ترتیب در تیمارهای بدون کود میلورم (محلول پاشی ۲/۵ و ۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی) دیده شد (جدول ۳).

میزان تانن

طبق نتایج تجزیه واریانس، اثرات ساده کود میلورم و اثر متقابل کود میلورم و روی بر میزان تانن بذر گیاه ماش سبز معنی دار بود اما اثر ساده محلول پاشی کود لیگنوسولفونات روی معنی دار نگردید (جدول ۲). بیشترین غلظت تانن (۹/۰۵ میلی گرم) در تیمار محلول پاشی ۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی بدون کاربرد کود میلورم مشاهده شد. در حالی که کمترین میزان (۵/۱۶ میلی گرم) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی ۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی، به دست آمد (جدول ۳).

ترکیبات فنلی کل

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر ساده کود میلورم و اثر متقابل کود میلورم و محلول پاشی لیگنوسولفونات روی معنی دار بود. اثر ساده

محلول پاشی لیگنوسولفونات روی، معنی دار نبود (جدول ۲). در بررسی اثر متقابل کود میلورم و محلول پاشی لیگنوسولفونات روی، بالاترین غلظت ترکیبات فنلی (۲۰/۷۲ میلی گرم گالیک اسید بر گرم وزن خشک) در تیمارهای ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی ۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی دیده شد. پایین ترین غلظت ترکیبات فنلی (۱۲/۳۶ میلی گرم گالیک اسید بر گرم وزن خشک) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم محلول پاشی ۲/۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی، مشاهده شد (جدول ۴). مشاهده می گردد که در تیمارهای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم، افزایش غلظت محلول پاشی روی باعث کاهش میزان ترکیبات فنلی در بذر ماش سبز شده است ولی این کاهش از نظر آماری معنی دار نبود.

فعالیت آنتی اکسیدانی

اثرات ساده و متقابل کود میلورم و روی، بر میزان فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره بذر ماش سبز معنی دار بود (جدول ۲). مشاهده می شود که بیشترین میزان فعالیت آنتی اکسیدانی (۷۲/۴۴ درصد) در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم بدون محلول پاشی روی مشاهده شد و کمترین میزان (۵۸/۱۸ درصد) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و کاربرد ۲/۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی و بعد از آن تیمارهای ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم بدون محلول پاشی لیگنوسولفونات روی و محلول - پاشی ۲/۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی اندازه گیری شد (جدول ۴). در تیمارهای شاهد، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم، افزایش غلظت محلول پاشی لیگنوسولفونات روی تأثیری بر تغییر فعالیت آنتی اکسیدانی آن نداشت در حالی که در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم، افزایش

غلظت محلول پاشی لیگنوسولفونات روی باعث کاهش فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره بذر گیاه ماش سبز شد.

غلظت روی

اثرات ساده و متقابل کود میلورم و روی، بر میزان غلظت روی در بذر ماش سبز معنی دار بود (جدول ۲). در بررسی اثرات متقابل تیمارها مشاهده می شود که بیشترین غلظت روی ($39/85$ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم با محلول پاشی 5 گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی مشاهده شد و کمترین میزان ($20/22$ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار 1500 کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی صفر لیگنوسولفونات روی و بعد از آن تیمار 1000 کیلوگرم کود میلورم بدون محلول پاشی لیگنوسولفونات روی اندازه گیری شد (جدول ۴). با افزایش کاربرد کود میلورم غلظت روی در بذر ماش سبز کاهش یافت در حالی که با افزایش غلظت محلول پاشی با لیگنوسولفونات روی غلظت روی در بذر افزایش یافت.

نسبت مولی اسید فیتیک به روی

در رابطه با این صفت، نتایج تجزیه واریانس بیانگر معنی دار بودن اثر ساده محلول پاشی لیگنوسولفونات روی و کاربرد کود میلورم و اثرات متقابل کود میلورم و روی بود (جدول ۲).

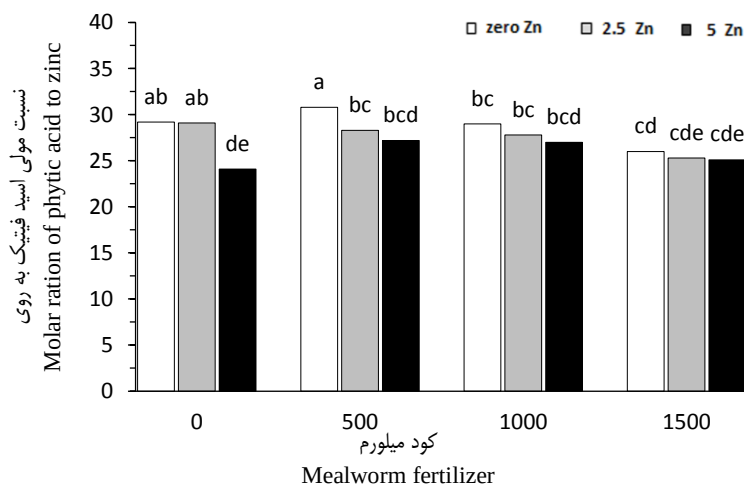
نتایج نشان داد که بیشترین نسبت ($30/8$) در تیمار 500 کیلوگرم کود میلورم و بدون محلول پاشی لیگنوسولفونات روی بود که با تیمارهای کاربرد صفر کیلوگرم میلورم و محلول پاشی صفر و $2/5$ گرم

در لیتر لیگنوسولفونات روی نیز اختلاف معنی داری نداشت. در حالی که کمترین نسبت ($24/1$) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی 5 گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی، مشاهده شد که البته با تیمارهای 1500 کیلوگرم میلورم و محلول پاشی $2/5$ و 5 گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی اختلاف معنی دار نداشت (شکل ۲).

عناصر غذایی دانه

نتایج مربوط به اثرات متقابل تیمارها در ارتباط با غلظت نیتروژن دانه ماش نشان داد که بیشترین غلظت (3862 میلی گرم در 100 گرم) در تیمار 1500 کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی $2/5$ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی بود که با سایر تیمارهای کاربرد 1500 کیلوگرم کود میلورم اختلاف معنی داری نداشت. در حالی که کمترین غلظت (3120 میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم و بدون محلول پاشی لیگنوسولفونات روی، مشاهده شد که البته با تیمارهای صفر کیلوگرم میلورم و همچنین تیمارهای بدون محلول پاشی لیگنوسولفونات روی اختلاف معنی دار نداشت (جدول ۴). با افزایش کاربرد کود میلورم غلظت نیتروژن دانه ماش افزایش یافت.

نتایج مربوط به اثرات متقابل تیمارها در ارتباط با غلظت پتاسیم نشان داد که بیشترین غلظت پتاسیم دانه (623 میلی گرم بر 100 گرم) در تیمار 1000 کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی $2/5$ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی بود که با تیمارهای کاربرد 1500 کیلوگرم میلورم اختلاف معنی داری نداشت (جدول ۴).



شکل ۲- اثر متقابل مقادیر مختلف کود میلورم و محلول پاشی روی بر نسبت مولی اسید فیتیک به روی دانه ماش سبز (*Vigna radiata*)

Figure 2- Interaction effect of different mealworm level and zinc spraying on molar ration of phytic acid to zinc in mung bean (*Vigna radiata*) seed

نشان داد که بیشترین غلظت فسفر دانه (412 میلی گرم بر 100 گرم)

نتایج مربوط به اثرات متقابل تیمارها در ارتباط با غلظت فسفر نیز

در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی ۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی بود که با سایر تیمارهای کاربرد ۱۵۰۰ کیلوگرم میلورم اختلاف معنی داری نداشت (جدول ۴). بیشترین غلظت آهن در دانه ماش ۹۷/۲۲ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم میلورم و ۵ گرم در لیتر محلول پاشی روی دیده شد و کمترین غلظت آهن ۹۳/۴۱ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار صفر کیلوگرم میلورم و صفر محلول پاشی روی دیده شد که البته بین همه تیمارها اختلاف معنی دار آماری وجود نداشت.

بحث و نتیجه گیری

اثرات متقابل دو فاکتور محرک رشد گیاهان می تواند مثبت یا منفی باشد. بیشترین عملکرد زمانی بدست می آید که تعادل مناسبی بین عناصر غذایی و سایر عوامل مؤثر در رشد برقرار باشد. کود میلورم محتوی عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان و همچنین برخی ترکیبات محرک رشد می باشد و لیگنوسولفونات روی محتوی دو عنصر ضروری روی و گوگرد می باشد. انتظار می رود کاربرد توأم این دو ماده سبب هم افزایی آنها و افزایش عملکرد گردد که این موضوع در نتایج این پژوهش هم دیده شد. نتایج نشان داد که افزودن کود میلورم و پاشش برگی لیگنوسولفونات تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات رشد، عملکرد و برخی شاخص های بیوشیمیایی دانه ماش داشت. اثر ساده میلورم بر بیشتر صفات سنجش شده و اثر پاشش روی بر غلظت روی و ترکیبات فنولی و تانن چشمگیر بود. همچنین اثر تعامل این دو کود در اغلب صفات (از جمله عملکرد بذری و برخی ترکیبات بیوشیمیایی) معنی دار بود. محلول پاشی لیگنوسولفونات روی، تأثیر کود میلورم را در افزایش عملکرد، طول ساقه اصلی و تعداد غلاف در هر بوته را بهبود بخشیده است. با توجه به غلظت اندک عنصر روی در کود میلورم، به نظر می رسد این هم افزایی منطقی باشد. اگرچه با افزایش عملکرد، غلظت روی در دانه ماش سبز کاهش یافت ولی تأثیر مثبت آن بر عملکرد دانه معنی دار بود. غلظت روی در شاخساره گیاهان با اثر واکنش رشد القایی کاهش می یابد (اثر رقیق سازی). به این معنی که با افزایش رشد گیاه، میزان جذب روی در گیاه افزایش می یابد اما غلظت آن در بافت های گیاه کاهش می یابد، به عبارت دیگر آن عنصر در بافت های گیاهی رقیق می شود.

افزایش قابل توجه عملکرد بذری در بالاترین سطح کود میلورم (۱۵۰۰ کیلوگرم در هکتار) به ویژه همراه با محلول پاشی لیگنوسولفونات روی مشاهده شد. این افزایش احتمالاً ناشی از چند مکانیزم هم زمان است: بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (افزایش ماده آلی، نگهداری رطوبت و قابلیت تبادل کاتیون)، افزودن عناصر غذایی و تحریک رشد ریشه و میکروارگانیسم های مفید خاک که جذب عناصر را تسهیل می کنند؛ که این مکانیسم ها با گزارش های قبلی درباره

اثربخشی کود میلورم در افزایش رشد و ویژگی های خاک همخوانی دارد. تأثیر مثبت روی و کود میلورم در افزایش عملکرد گیاهان مختلف از جمله سویا (Mehdiniya Afra & Manavi Amri, 2015)، سیب زمینی (Motalebifard, 2017)، گندم (Feiziasl & Valizadeh, 2004) گزارش شده است. گزارش داده شده است که کود میلورم با تأمین عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم سبب افزایش رشد شلغم (Poveda et al., 2019)، جو (Houben et al., 2020)، علف راجا (Houben et al., 2021) و کدو سبز (Zim et al., 2022) شده است. همچنین گزارش شده است که افزایش رشد گیاه ممکن است به دلیل تحریک فعالیت های میکروبی خاک باشد (Houben et al., 2020). به نظر می رسد میکروارگانیسم های مفید موجود در کود میلورم در افزایش تحمل به تنش های شوری، خشکی و غرقابی در گیاهان لوبیا مؤثر بوده اند (Poveda et al., 2019). در پژوهشی (Blakstad et al., 2023) گزارش شد که اثربخشی کاربرد کود میلورم در رشد بوته های گوجه فرنگی به اندازه کود مرغی غنی شده با نیتروژن (۶ درصد)، فسفر (۴/۵ درصد) و پتاسیم (۵ درصد) بود. آنان این افزایش رشد را به وجود میکروارگانیسم های محرک رشد موجود در کود میلورم نسبت دادند. در این پژوهش تأثیر کاربرد کود میلورم بر عملکرد دانه و کاه گندم بیشتر از محلول پاشی با لیگنوسولفونات روی بود. به نظر می رسد کود میلورم به دلیل داشتن انواع مختلف عناصر غذایی و همچنین مواد آلی محرک رشد مؤثرتر عمل کرده است. در پژوهش های اخیر بر نقش کود میلورم به عنوان یک محرک رشد و همچنین تقویت کننده گیاهان در برابر تنش های زیستی و غیر زیستی تأکید زیادی شده است (Zunzunegui et al., 2024). در مورد اثرات تقویتی، مشخص شده که تأثیر کود میلورم به طور چشمگیری بستگی به مقدار مصرف و نوع محصول دارد و در بسیاری از آزمایش ها نتایج بسیار مطلوبی به دست آمده است (Verardi, 2025).

محلول پاشی با لیگنوسولفونات روی نیز بر رشد و عملکرد ماش سبز در این پژوهش به تنهایی و توأم با کود میلورم مؤثر بود. روی از جمله عناصر ضروری برای رشد گیاه است که در تشکیل هورمون اکسین نقش داشته و رشد گیاه را تنظیم می کند. همچنین، روی باعث فعال شدن بسیاری از آنزیم ها می شود، به طوری که برای سنتز کلروفیل و تشکیل کربوهیدرات ها ضروری است. از آنجایی که روی عنصری است که در داخل گیاه قادر به توزیع مجدد نیست، لذا محلول پاشی آن گزینه مناسبی برای غنی سازی دانه حبوبات می باشد (Vitosh et al., 1994). جلیلیان و همکاران (Jaliliain et al., 2014) گزارش نمودند که محلول پاشی روی در گیاه ماش سبز باعث افزایش ۴۷/۱۲ درصدی ارتفاع بوته و افزایش ۱۰/۲۲ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین گزارش شده است که محلول پاشی با سولفات روی ۰/۵ درصد در گیاه ماش سبز سبب افزایش عملکرد دانه، تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف نسبت به تیمار شاهد شد و همچنین این

زارع ده‌آبادی و اسرار (Zare Dehabadi & Asrar, 2009) محتوای ترکیبات فنلی مانند فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌های برگ، مقدار پروتئین کل و میزان مالون‌دی‌آلدهید به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون پروتئین-های غشایی در برگ‌ها با افزایش غلظت روی در محلول غذایی نسبت به گیاه شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین در پژوهشی گزارش شده است که غلظت ترکیبات فنلی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان ریحان تیمار شده با روی افزایش یافت و غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان غلظت بهینه انتخاب شد (Azizian-Shermeh et al., 2018). افزایش غلظت ترکیبات فنلی بر اثر بیش‌بود عنصر روی، در برگ‌های گونه‌های مختلف گیاهان بید و چای نیز مشاهده شده است (Mukhopadhyay et al., 2013; Borowiak et al., 2015). به‌رغم نقش حیاتی روی در ساختار و راه‌اندازی بسیاری از فرآیندهای متابولیسم گیاه، تجمع بالای فلز روی در سیتوزول سلول‌ها از طریق اختلال در عملکرد طبیعی سلول‌ها و مهار فرآیند تنفس و واکنش‌های انرژی‌خواه مرتبط با رشد سلول می‌تواند سبب کاهش رشد و نمو ایده‌آل گیاهان شود. گزارش‌هایی وجود دارد که یون‌های فلزی سنگین پس از ورود به گیاه تا زمان القای تشکیل فیتوکلاتین‌ها در اثر فیتوکلاتین-سنتز در سیتوزول سلول‌ها باقی می‌مانند و این تجمع بالای فلز در سیتوزول باعث مهار برخی از فرآیندهای متابولیسمی می‌شود (Bonnet et al., 2000). برخی از پژوهش‌گران معتقدند، فلز روی از طریق تأثیر بر میزان جذب و جابجایی عناصر ضروری و نیز اثر بر میزان فعالیت برخی از آنزیم‌ها در جایگاه عملکردشان موجب اختلال در متابولیسم گیاه می‌شود (Zare Dehabadi & Asrar, 2009).

در بذر ماش، تانن‌ها معمولاً در پوست و قسمت‌های خارجی بذر یافت می‌شوند و باعث طعمی تلخ و گس می‌شوند. این ترکیبات علاوه بر اثرات طعمی، در فرآیندهای هضم و جذب مواد غذایی نیز تأثیر دارند. در برخی موارد، وجود مقدار زیاد تانن می‌تواند جذب پروتئین‌ها و مواد مغذی را کاهش دهد، بنابراین در فرآیندهای فرآوری و مصرف، کاهش میزان تانن‌ها اهمیت دارد (Ojo, 2022). محلول‌پاشی با لیگنوسولفونات روی و کاربرد خاکی کود میلورم در ماش سبب شده است که در مقادیر پایین کود میلورم اثر محلول‌پاشی با لیگنوسولفونات روی سبب افزایش تانن دانه ماش شده است اما در مقایسه با کود میلورم محلول‌پاشی با لیگنوسولفونات روی غلظت تانن بذر را کم کرده است. این نتایج نشان می‌دهد که تعامل بین میزان کود میلورم و محلول‌پاشی با لیگنوسولفونات روی بر میزان تانن در دانه‌های ماش تأثیرگذار است. سطوح بالای کود میلورم ممکن است اثراتی همچون تنظیم هورمون‌های گیاهی یا مهار فعالیت آنزیم‌هایی که در مسیر سنتز تانن نقش دارند، داشته باشند. همین امر می‌تواند منجر به کاهش سطح تانن در دانه‌ها شود. همچنین کود میلورم در مقادیر بالا ممکن است متابولیسم گیاه را به سمت تولید ترکیبات دیگر سوق دهد و تولید تانن را کاهش دهد، یا از تجمع این ترکیبات در دانه ماش جلوگیری کند.

تیمار محلول‌پاشی با کاربرد مصرف خاکی ۲۵ کیلوگرم سولفات روی تفاوت معنی‌دار نداشت. در یک گزارش (Martin-Ortiz et al, 2009) آزمایش‌های اتاقک رشد نشان دادند که گیاهان ذرت تحت تیمار با لیگنوسولفونات روی بالاترین وزن خشک و غلظت‌های روی در ساقه‌ها را داشتند. همچنین در آزمایش‌های میدانی، غلظت روی در ساقه‌ها به طور قابل توجهی در گیاهانی که تحت تیمار با کود لیگنوسولفونات روی + کود NPK بودند، بالاتر از شاهد بود. بر اساس تحقیقات انجام شده، غلظت‌های ۲۰۰ میکرومولار و بالاتر عنصر روی، سبب کاهش وزن تر، سطح برگ و سایر شاخص‌های رشد در ماش شده است (Vassilev et al., 2011). بررسی تأثیر روی بر رشد و شاخص‌های بیوشیمیایی دو گیاه *Abelmoschus esculentus* و *Cyamopsis tetragonolobus* نشان داد، روی تا غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به صورت ماده غذایی عمل و رشد را تحریک می‌کند ولی در غلظت‌های بالاتر به‌طور معکوس عمل می‌کند و رشد را کاهش می‌دهد (Mangal et al., 2013). با توجه به اینکه غلظت روی در خاک‌های آهکی ایران معمولاً خیلی کمتر از این مقدار است، همواره با کاربرد کودهای محتوی روی شاهد افزایش رشد گیاهان خواهیم بود.

کاربرد لیگنوسولفونات روی در این پژوهش بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و غلظت فلاونوئیدها خنثی و یا منفی بود. کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در دانه ماش پس از محلول‌پاشی با لیگنوسولفونات می‌تواند نتیجه اختلالات در مسیرهای بیوشیمیایی، تداخل در تولید یا فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، و یا تعاملات منفی با عناصر موجود در کود میلورم باشد. لیگنوسولفونات ممکن است به‌عنوان یک ترکیب شیمیایی، فعالیت آنزیم‌های مرتبط با آنتی‌اکسیدان‌ها مانند پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، و کاتالاز را مهار کند یا در مسیرهای بیوشیمیایی تأثیر منفی بگذارد، که منجر به کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود. این نتیجه در پژوهش‌های محققان پیشین وجود ندارد اما گزارش شده است که برخی ترکیبات شیمیایی ممکن است فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی را کاهش دهند (Dangles, 2012). همچنین کود میلورم ممکن است حاوی عناصر یا مواد مغذی باشد که در تعامل با لیگنوسولفونات، اثر منفی بر مسیرهای آنتی‌اکسیدانی را تشدید کند. مثلاً، ممکن است برخی عناصر اثر مهاری بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان داشته باشند یا فرآیندهای متابولیسمی مرتبط را مختل کنند. برای فهم دقیق‌تر، نیاز است بررسی‌هایی مانند اندازه‌گیری مستقیم فعالیت‌های آنزیم‌ها، سطح ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، و بررسی تعاملات فیتوهورمونی انجام گیرد. همچنین در اغلب پژوهش‌های پیشین، تأثیر عنصر روی معمولاً همراه با یک تنش بوده است و محلول‌پاشی با روی سبب افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی شده است در صورتی که در این پژوهش تیمار تنش وجود نداشته است. زمانی که گیاهان در شرایط غیر تنش باشند، فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی نیز کاهش خواهد یافت (Fujita & Hasanuzzaman, 2022). بر اساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش

کود میلورم در غلظت های بالا بر مقدار عددی این نسبت مؤثر بوده است. کود میلورم به دلیل دارا بودن عنصر فسفر، ممکن است بر غلظت فسفر دانه مؤثر باشد و محلول پاشی با روی، این نسبت را متعادل نگاه می دارد. با افزایش کاربرد کود میلورم در سطوح بالای ۵۰۰ کیلوگرم، این نسبت بدون محلول پاشی روی نیز متعادل می شود و این ممکن است به دلیل اثرات اشیاع شدن گیاه از نظر فسفر و یا همچنین ممکن است به دلیل بهبود شرایط خاکی و جذب بیشتر روی از خاک زراعی باشد که سبب شده است این نسبت بدون محلول پاشی با روی نیز بهبود یابد. به هر روی، تأثیر متقابل این دو کود در سطوح بالا سبب کاهش نسبت مولی فیتات به روی خواهد شد.

به طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد کود میلورم به ویژه در سطح ۱۵۰۰ کیلوگرم در هکتار موجب افزایش معنی دار عملکرد دانه ماش شد و محلول پاشی برگی لیگنوسولفونات روی در سطح ۵ گرم در لیتر باعث افزایش غلظت روی در دانه و کاهش نسبت مولی اسید فیتیک به روی گردید. ترکیب بهینه برای افزایش عملکرد و بهبود محتوای روی دانه، استفاده از ۱۵۰۰ کیلوگرم در هکتار کود میلورم همراه با محلول پاشی ۵ گرم در لیتر لیگنوسولفونات روی بود اگرچه این ممکن است سبب کاهش فعالیت آنتی اکسیدانی و غلظت فلاونوئیدهای بذور شود. برای افزایش عملکرد ماش و ارتقای محتوای روی بذور (با هدف بهبود ارزش تغذیه ای)، پیشنهاد می شود کود میلورم همراه با حداقل یک پاشش برگی لیگنوسولفونات روی در دوره گل دهی به کار برده شود. به طور کل نتایج این مطالعه نشان می دهد که کود میلورم یک منبع آلی برای افزایش عملکرد در ماش است و هنگامی که با محلول پاشی برگی روی همراه شود، می تواند کیفیت تغذیه ای دانه ها را از منظر غلظت روی و نسبت فیتات به روی بهبود بخشد. با این وجود برای توصیه های کاربردی گسترده و تضمین ایمنی-اثر بخشی اقتصادی لازم است مطالعات بیشتری انجام شود.

نسبت مولی فیتات به عناصر معدنی به عنوان یک معیار کیفی ساده شده برای دسترسی زیستی عناصر غذایی معدنی در رژیم غذایی انسان استفاده می شود (Weaver & Kannan, 2002). بنابراین از نسبت مولی اسید فیتیک به روی به طور گسترده ای به عنوان شاخصی از دسترسی زیستی روی استفاده می شود. به طور کلی، جذب روی در بدن انسان هنگامی که نسبت مولی اسید فیتیک به روی بیشتر از ۱۵ باشد، به شدت کاهش می یابد (Gargari et al., 2007) و دسترسی زیستی روی معمولاً در صورتی که این نسبت کمتر از ۱۵ باشد، تحت تأثیر قرار نمی گیرد (Ryan et al., 2008)؛ اگرچه سازمان بهداشت جهانی اعلام نمود برای آنکه عناصر موجود در ماده غذایی به وسیله سیستم گوارشی بدن قابل جذب باشد باید نسبت مولی اسید فیتیک به روی کمتر از ۲۵ باشد (WHO, 1996). نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر کاهش معنی دار و چشم گیر نسبت مولی اسید فیتیک به روی بر اثر محلول پاشی با لیگنوسولفونات روی بود. تأثیر کوددهی روی در خاک های دارای کمبود روی سبب کاهش نسبت مولی اسید فیتیک به روی می شود (Malakouti, 2011). در تحقیق حاضر نیز محلول پاشی روی سبب کاهش نسبت مولی اسید فیتیک به روی شد. که نشان می دهد کاربرد کود میلورم در واقع یک رابطه منفی بین غلظت روی و میزان اسید فیتیک در این تحقیق مشاهده شد. این نتیجه با نتایج تحقیقات ملکوتی (Malakouti, 2011)، متشعرزاده و ثواقبی (Motesarezadeh & Savaghebi, 2012) و کایا و همکاران (Kaya et al., 2009) مطابقت دارد. روی به دلیل داشتن اثر آنتاگونیسمی با فسفر در جذب، انتقال و جابجایی فسفر در داخل گیاه اختلالاتی ایجاد می کند که باعث کاهش جذب فسفر و متعاقب آن کاهش میزان اسید فیتیک می شود. بیشترین کاهش در این نسبت در تیمار صفر کود میلورم و تیمار ۵ در هزار روی بود. همچنین کاربرد کود میلورم تا ۵۰۰ کیلوگرم سبب افزایش این نسبت و پس از آن سبب کاهش آن شد. به نظر می رسد وجود برخی عوامل زیستی موجود در

References

1. Ali, N.M., Mohd Yusof, H., Yeap, S.K., Ho, W.Y., Beh, B.K., Long, K., & Alitheen, N.B. (2014). Anti-inflammatory and antinociceptive activities of untreated, germinated, and fermented mung bean aqueous extract. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, (1), 350507.
2. Alloway, B.J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition (2th ed.). Brussels: international zinc association (IZA), 136p.
3. Álvarez-Fernández, A., Orera, I., Abadía, J., & Abadía, A. (2007). Determination of synthetic ferric chelates used as fertilizers by liquid chromatography-electrospray/mass spectrometry in agricultural matrices. *Journal of American Society of Mass Spectrometry*, 18, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.jasms.2006.08.018>
4. Azizian-Shermeh, O., Einali A., & Valizadeh, J. (2018). Physiological and biochemical responses of basil (*Ocimum basilicum*) seedlings to different concentrations of zinc. *Iranian Journal of Plant Biology*, 10(2), 35-56. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22108/IJPB.2018.105679.1043>
5. Barakoti, L., & Bains, K. (2007). Effect of household processing on the in vitro bioavailability of iron in mungbean (*Vigna radiata*). *Food and Nutrition Bulletin*, 28(1), 18-22. <https://doi.org/10.1177/156482650702800102>
6. Boye, J., Zare, F., & Pletch, A. (2010). Pulse proteins: processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, 43(2), 414-431. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003>

7. Benedicto, A., Hernández-Apaolaza, L., Rivas, I., & Lucena, J.J. (2011). Determination of ^{67}Zn distribution in navy bean (*Phaseolus vulgaris* L.) after foliar application of ^{67}Zn -lignosulfonates using isotope pattern deconvolution. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(16), 8829-8838.
8. Blakstad, J.L., Strimbeck, R., Poveda, J., Bones, A.M., & Kissen, R. (2023). Frass from yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) as plant fertilizer and defense priming agent. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53, 102862.
9. Bonnet, M., Camares, O., & Veisseire, P. (2000). Effect of zinc and influence of *Acremonium lolli* on growth parameters, chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activity of ryegrass. *Experimental Botany*, 51(346), 945-953. <https://doi.org/10.1093/jxb/51.346.945>
10. Borowiak, K., Gasecka, M., Mleczek, M., Dabrowski, J., Chadzinikolau, T., Magdziak, Z., Golinski, P., Rutkowski, P., & Kozubik, T. (2015). Photosynthetic activity in relation to chlorophylls, carbohydrates, phenolics and growth of a hybrid *Salix purpurea* × *triandra* × *viminalis* 2 at various Zn concentrations. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37(8), 155. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1904-x>
11. Broadhurst, R.B., & Jones, W.T. (1978). Analysis of condensed tannins using acidified vanillin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 29(9), 788-794. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740290908>
12. Broadley, M.R., White, P.J., Hammond, J.P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, 173(4), 677-702. <https://doi.org/abs/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
13. Dahiya, P.K., Linnemann, A.R., Van Boekel, M.A.J.S., Khetarpaul, N., Grewal, R.B., & Nout, M.J.R. (2015). Mung bean: Technological and nutritional potential. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5), 670-688. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.671202>
14. Dangles, O. (2012). Antioxidant activity of plant phenols: chemical mechanisms and biological significance. *Current Organic Chemistry*, 16(6), 692-714. <https://doi.org/10.2174/138527212799957995>
15. Di Paola, A., Rulli, M.C., & Santini, M. (2017). Human food vs. animal feed debate. A thorough analysis of environmental footprints. *Land Use Policy*, 67, 652-659. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.017>
16. EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP). (2015). Scientific Opinion on the safety and efficacy of lignosulphonate as a feed additive for all animal species. *EFSA Journal*, 13(7), 4160. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4160>
17. Feiziasl, V., & Valizadeh, Gh. (2004). Effects of phosphorus and zinc fertilizer applications on nutrient concentrations in plant and grain yield in cv. Sardari "*Triticum aestivum*" under dryland conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 6(3), 223- 235. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.15625540.1383.6.3.5.4>
18. Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2022). Approaches to enhancing antioxidant defense in plants. *Antioxidants*, 11(5), 925. <https://doi.org/10.3390/antiox11050925>
19. Gan, R.Y., Lui, W.Y., Wu, K., Chan, C.L., Dai, S.H., Sui, Z.Q., & Corke, H. (2017). Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: An updated review. *Trends in Food Science & Technology*, 59, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.010>
20. Gargari, B.P., Mahboob, S., & Razavieh, S.V. (2007). Content of phytic acid and its mole ratio to zinc in flour and breads consumed in Tabriz, Iran. *Food Chemistry*, 100(3), 1115-1119. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.018>
21. Gonzalez, D., Obrador, A., López Valdivia, L.M., & Álvarez, J.M. (2008). Effect of zinc source applied to soils on its availability to navy bean. *Soil Science Society of America*, 72, 641-649. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0099>
22. Haug, W., & Lantzs, H.J. (1983). Sensitive method for the rapid determination of phytate in cereals and cereal products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 34(12), 1423-1426. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740341217>
23. Houben, D., Daoulas, G., Faucon, M.P., & Dulaurent, A.M. (2020). Potential use of mealworm frass as a fertilizer: Impact on crop growth and soil properties. *Scientific Reports*, 10(1), 4659. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61765-x>
24. Houben, D., Daoulas, G., & Dulaurent, A.M. (2021). Assessment of the short-term fertilizer potential of mealworm frass using a pot experiment *Front. Sustain Food Syst.*, 5 Article 714596, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.714596>
25. Hussain, M., Shahid, M.Z., Mehboob, N., Minhas, W.A., & Akram, M. (2021). Zinc application improves growth, yield and grain zinc concentration of mung bean (*Vigna radiata* L.). *Semina: Ciências Agrárias*, 42(2), 487-500.
26. Hussain, T., Tontisirin, K., & Chaowanakarnkit, L. (1983). Protein digestibility of weaning foods prepared from rice-minced meat and rice-mungbean [*Vigna radiata*] combination in infants using a short term nitrogen balance method. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology (Japan)*, 29(4). <https://doi.org/10.3177/jnsv.29.497>
27. Hummel, M., Talsma, E.F., Taleon, V., Londoño, L., Brychkova, G., Gallego, S., & Spillane, C. (2020). Iron, zinc and phytic acid retention of biofortified, low phytic acid, and conventional bean varieties when preparing common household recipes. *Nutrients*, 12(3), 658. <https://doi.org/10.3390/nu12030658>
28. Jalilian, J., Khade, A., & Pirzad, A. (2014). Effect of Fe and Zn spraying on some characteristics of mungbean using chemical and organic fertilization. *Journal of Crops Improvement*, 16(3), 725-732.

- <https://doi.org/10.22059/jci.2014.53272>
29. Kalra, Y. (Ed.). (1997). *Handbook of reference methods for plant analysis*. CRC press.
30. Kaya, M., Küçükyumuk, Z., & Erdal, I. (2009). Phytase activity, phytic acid, zinc, phosphorus and protein contents in different chickpea genotypes in relation to nitrogen and zinc fertilization. *African Journal of Biotechnology*, 8, 4508-4513.
31. Kumar Dahiya, P., Nout, M.J.R., A. van Boekel, M., Khetarpaul, N., Bala Grewal, R., & Linnemann, A. (2014). Nutritional characteristics of mung bean foods. *British Food Journal*, 116(6), 1031-1046. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2012-0280>
32. Li, L., Zhao, Z., & Liu, H. (2013). Feasibility of feeding yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) in bioregenerative life support systems as a source of animal protein for humans. *Acta Astronautica*, 92(1), 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.actastro.2012.03.012>
33. Liyanage, R., Kiramage, C., Visvanathan, R., Jayathilake, C., Weththasinghe, P., Bangamuwage, R., & Vidanarachchi, J. (2018). Hypolipidemic and hypoglycemic potential of raw, boiled, and sprouted mung beans (*Vigna radiata* L. Wilczek) in rats. *Journal of Food Biochemistry*, 42(1), e12457.
34. Malakouti, M.J. (2011). Towards improving the quality of consumed breads in Iran, a review. *Journal of Food Science and Technology*, 8(32), 11-21. (In Persian with English abstract). <https://fsc.modares.ac.ir/article-7-1738-en.html>
35. Mangal, M., Agarwal, M., & Bhargava, D. (2013). Effect of cadmium and zinc on growth and biochemical parameters of selected vegetables. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2, 106-114. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087582>
36. Martin-Ortiz, D., Hernandez-Apaolaza, L., & Garate, A. (2009). Efficiency of a NPK fertilizer with adhered zinc lignosulfonate as a zinc source for maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(19), 9071-9078.
37. Mehdiniya Afra, J., & Manavi Amri, SS. (2015). The effects of interaction between the elements phosphorous and zinc are some traits of soybean cultivars of Sari. *Iranian Journal of Dynamic Agriculture*, 11(4), 309-315. (In Persian with English abstract)
38. Menichini, F., Tundis, R., Bonesi, M., Loizzo, M.R., Conforti, F., Statti G., Di Cindi, B., Houghton, P.J., & Menichini, F. (2009). The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. Habanero. *Food Chemistry*, 114, 553-560. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.086>
39. Motalebifard, R. (2017). Effects of zinc and phosphorus levels on yield, nutrients uptake and zinc recovery and agronomic efficiency in potato. *Journal of Water and Soil*, 31(3), 886-899. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V31I3.54513>
40. Motesharezadeh, B., & Savaghebi, Gh.R. (2012). The effect of balanced fertilization on nutrients' concentration and phytic acid to zinc molar ratio in Iranian red been (*Phaseolus calcaratus* L.) cultivars at different stages of seed development. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 3(1), 73-84. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20089082.1391.3.1.6.4>
41. Mubarak, A.E. (2005). Nutritional composition and antinutritional factors of mung bean seeds (*Phaseolus aureus*) as affected by some home traditional processes. *Food Chemistry*, 89(4), 489-495. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.007>
42. Mukhopadhyay, M.S., Das, A., Subba, P., Bantawa, P., Sarkar, B., Ghosh, P. & Mondal, TK. (2013). Structural, physiological, and biochemical profiling of tea plants under zinc stress. *Biologia Plantarum*, 57, 474-480. <https://doi.org/10.1007/s10535-012-0300-2>
43. Nair, R.M., Yang, R.Y., Easdown, W.J., Thavarajah, D., Thavarajah, P., Hughes, J.D.A., & Keatinge, J.D.H. (2013). Biofortification of mungbean (*Vigna radiata*) as a whole food to enhance human health. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(8), 1805-1813. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6110>
44. Oke, F., Aslim, B., Ozturk, S., & Altundag, S. (2009). Essential oil composition, antimicrobial and antioxidant activities of *Satureja cuneifolia* ten. *Food Chemistry*, 112, 874-879. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.061>
45. Ojo, M.A. (2022). Tannins in foods: nutritional implications and processing effects of hydrothermal techniques on underutilized hard-to-cook legume seeds—a review. *Preventive Nutrition and Food Science*, 27(1), 14. <https://doi.org/10.3746/pnf.2022.27.1.14>
46. Pandey, N., Pathak, G.C., & Sharma, C.P. (2006). Zinc is critically required for pollen function and fertilization in lentil. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 20, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.09.006>
47. Popova, M., Bankova, V., Butovska, D., Petkov, V., Nikolova-Damyanova, B., Sabatini, A.G., Marcazzan, G.L., & Bogdanov, S. (2004). Validated methods for the quantification of biologically active constituents of poplar-type propolis. *Phytochemistry Analysis*, 15, 235-240. <https://doi.org/10.1002/pca.777>
48. Poveda, J., Jiménez-Gómez, A., Saati-Santamaría, Z., Usategui-Martín, R., Rivas, R., & García-Fraile, P. (2019). Mealworm frass as a potential biofertilizer and abiotic stress tolerance-inductor in plants. *Applied Soil*

- Ecology*, 142, 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.04.016>
49. Ryan, M.H., McInerney, J.K., Record, I.R., & Angus, J.F. (2008). Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertiliser, crop sequence and mycorrhizal fungi. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(7), 1208-1216. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3200>
50. Sánchez Jiménez, S., & Lucena, J.J. (2015). Characterization of zinc fertilizers. adjustment to the European and Spanish regulations (in Spanish). *Phytoma*, 272, 47-52.
51. Sandberg, A.S. (2002). Bioavailability of minerals in legumes. *British Journal of Nutrition*, 88(S3), 281-285.
52. Tajoddin, M.D., Shinde, M., & Lalitha, J. (2011). In vivo reduction the phytic acid content of mung bean (*Phaseolus aureus* L.) cultivars during germination. *Am.-Eurasian Journal of Agriculture Environment Science*, 10, 127-132. [http://www.idosi.org/aejaes/jaes10\(1\)/20.pdf](http://www.idosi.org/aejaes/jaes10(1)/20.pdf)
53. Vassilev, A., Nikolova, A., Koleva, L., & Lidon, F. (2011). Effect of excess zinc on growth and photosynthetic performance of young bean plants. *Journal of Phytology*, 3, 58-62.
54. Verardi, A., Sangiorgio, P., Della Mura, B., Moliterni, S., Spagnoletta, A., Dimatteo, S., & Errico, S. (2025). *Tenebrio molitor* Frass: A cutting-edge biofertilizer for sustainable agriculture and advanced adsorbent precursor for environmental remediation. *Agronomy*, 15(3), 758. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030758>
55. Vitosh, M.L., Warncke, D.D., & Lucas, R.E. (1994). Secondary and micronutrients for vegetable and field crops. extension bulletin E-486, Michigan State University Extension Service, 18 p.
56. Wang, X., Yang, R., Jin, X., Chen, Z., Zhou, Y., & Gu, Z. (2015). Effect of germination and incubation on Zn, Fe, and Ca bioavailability values of soybeans (*Glycine max* L.) and mung beans (*Vigna radiate* L.). *Food Science and Biotechnology*, 24, 1829-1835. <https://doi.org/10.1007/s10068-015-0239-0>
57. Weaver, C.M., & Kannan, S. (2001). Phytate and mineral bioavailability. In *Food phytates* (pp. 227-240). CRC Press.
58. World Health Organization. (1996). Trace elements in human nutrition and health. *WHO Library Cataloguing in Publication Data*, 105-122.
59. Wojdylo, A., Oszmianski, J., & Czemerys, R. (2007). Antioxidant activity and phenolic compound in 32 selected herbs. *Food Chemistry*, 1005: 940-949. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.038>
60. Zare Dehabadi, S., & Asrar, Z. (2009). Effect of excess zinc on the concentration of some mineral element and antioxidant responses of spearmint (*Mentha spicata* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 24(4), 530-540. (In Persian with English abstract)
61. Zim, J., Aitikkou, A., EL Omari, M.H., EL Malahi, S., Azim, K., Hirich, A., & Oumouloud, A. (2022). A new organic amendment based on insect frass for zucchini (*Cucurbita pepo* L.) cultivation. *Environmental Sciences Proceedings*, 16(1), 28.
62. Zunzunegui, I., Martín-García, J., Santamaría, Ó., & Poveda, J. (2024). Analysis of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) frass as a resource for a sustainable agriculture in the current context of insect farming industry growth. *Journal of Cleaner Production*, 460, 142608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142608>

Research Article

Vol. 39, No. 5, Dec. 2025-Jan. 2026, p. 465-478

Study of the Effect of Ammonium Acetate Concentration on Extracted Potassium in Some Calcareous Soils

M. Barati^{1*}, A.R. Hosseinpour¹, M.H. Salehi¹, A. Jafari²

1- Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

(*-Corresponding Author Email: marziehbarati99@yahoo.com)

2- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 22 July 2025

Revised: 03 November 2025

Accepted: 12 November 2025

Available Online: 12 November 2025

How to cite this article:

Barati, M., Hosseinpour, A.R., Salehi, M.H., & Jafari, A. (2026). Study of the effect of ammonium acetate concentration on extracted potassium in some calcareous soils. *Journal of Water and Soil*, 39(5), 465-478. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95838.1504>

Introduction

Potassium is one of the macronutrients essential for plant growth and plays significant physiological and biochemical roles in plant yield. There are four forms of potassium in the soil, listed in order of their availability for plant uptake: soluble potassium, exchangeable potassium, non-exchangeable potassium, and structural potassium. Determining the concentration of available potassium using an efficient extractant that is applicable to different soil types is essential for soil and crop management, such as fertilizer recommendations. One of the most common extractants for available potassium is 1N ammonium acetate (NH₄OAc). This extractant is widely used in many soil science studies and fertilizer recommendations due to its ability to extract exchangeable potassium and a portion of non-exchangeable potassium. However, this method may not have sufficient accuracy to measure the potassium readily available for plant uptake. In soils with high amounts of potassium-containing minerals, due to the presence of specific adsorption sites, a large portion of potassium is held strongly at these sites and can be partially extracted during NH₄OAc extraction. This issue could be one reason for the weak correlation between NH₄OAc-extracted potassium and plant response to potassium fertilizer in such soils. The critical level of available potassium is the threshold below which plant growth is limited. Since the amount of potassium extracted depends on the concentration of the extractant, evaluating the effect of different NH₄OAc concentrations on the determining the critical level is important. The objective of this study was to assess the impact of various NH₄OAc concentrations on the extraction of available potassium and to determine the critical potassium level in the calcareous soils of Shahrekord Plain.

Material and Methods

In order to evaluate different concentrations of NH₄OAc of the calcareous soils of the Shahrekord plain, 30 agricultural soil samples were collected from a depth of 0–30 cm. Four different concentrations of NH₄OAc including 1, 0.5, 0.25, and 0.1 molar were evaluated for extracting available potassium. The greenhouse experiment was carried out as a factorial experiment in a completely randomized design with two factors (soil type and potash fertilizer rate) and three replications. The potash fertilizer (potassium sulfate) was applied at two levels of potassium: 0 and 100 mg K kg⁻¹. At the end of the vegetative period, corn plants were harvested, and plant indices including dry matter weight, potassium concentration, potassium uptake, relative yield, and plant response were determined. To assess the significance of treatment effects in terms of plant indicators, factorial analysis of variance was performed. Then, the correlation between plant indices and potassium extracted using different concentrations of NH₄OAc was calculated, and based on the results, the most suitable concentration for extracting available potassium by NH₄OAc was determined. The potassium critical level was determined using the Cate-



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.2026.95838.1504>

Nelson graphical method for NH_4OAc extractants with concentrations of 1, 0.5, 0.25, and 0.1 molar.

Results and Discussion

The results showed the range of available potassium extracted using NH_4OAc extractants at concentrations of 1, 0.5, 0.25, and 0.1 molar was 157–581, 155–598, 160–596, and 168–590 mg kg^{-1} , respectively. Furthermore, the results showed that the differences among the mean values of potassium extracted at different concentrations of ammonium acetate were not statistically significant. The results of the analysis of variance showed that the main effects of soil type and potassium fertilizer were significant ($p < 0.01$) for dry matter weight, potassium concentration and uptake. However, the interaction between soil and fertilizer was not significant for dry matter weight. Based on the strong correlation between potassium extracted by NH_4OAc at concentrations of 1, 0.5, 0.25, and 0.1 molar and the relative yield and plant response indices, these concentrations can be considered suitable for use in these soils. By using the Cate-Nelson graphical method, the potassium critical level with concentrations of 1, 0.5, 0.25, and 0.1 molar was 250, 250, 255, and 250 mg kg^{-1} respectively.

Conclusion

The results showed that reducing the concentration of ammonium acetate does not affect the efficiency of this extractant. The results showed that the amounts of available potassium extracted with NH_4OAc at different concentrations were close to each other, with less than one percent difference. Commonly, NH_4OAc 1 M is used for extracting available potassium; however, our results show that lower concentrations of NH_4OAc (0.5, 0.25, and 0.1 M) can be effectively used as a substitute to the 1 M solution. Therefore, it is recommended to use 0.1 molar ammonium acetate for the extraction of available potassium. This substitution could result in a considerable reduction in chemical consumption.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Soil Science Department of the University of Shahrekord for providing equipment and facilities.

Keywords: Ammonium acetate, Available potassium, Concentration, Corn

مطالعه غلظت استات آمونیوم بر پتاسیم عصاره‌گیری شده در تعدادی از خاک‌های آهکی

مرضیه براتی^{۱*} ID - علیرضا حسین‌پور^۱ ID - محمدحسن صالحی^۱ ID - اعظم جعفری^۲ ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱

چکیده

یکی از رایج‌ترین عصاره‌گیرها در تعیین پتاسیم قابل استفاده خاک‌های آهکی، استات آمونیوم یک مولار است که به‌طور گسترده در آزمایشگاه‌های خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف این پژوهش، تأثیر غلظت‌های مختلف استات آمونیوم بر مقدار پتاسیم استخراج‌شده بود. تعداد ۳۰ نمونه خاک از خاک‌های کشاورزی (۳۰- سانتیمتر) دشت شهرکرد انتخاب شد. پتاسیم قابل استفاده خاک‌ها با استفاده از عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار استخراج شد. آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور (نوع خاک و مقدار کود پتاسیم)، در ۳ تکرار انجام شد. پس از اتمام دوره رویشی، بخش هوایی ذرت برداشت و شاخص‌های گیاهی تعیین شد. نتایج نشان داد که غلظت‌های مختلف استات آمونیوم مقادیر مشابهی پتاسیم استخراج کردند و کاهش غلظت استات آمونیوم تأثیری بر مقدار پتاسیم قابل استفاده نداشت. دامنه تغییرات پتاسیم قابل استفاده در عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار به‌ترتیب: ۵۸۱-۱۵۷، ۵۹۸-۱۵۵، ۵۹۶-۱۶۰ و ۵۹۰-۱۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. همچنین، نتایج نشان داد که اختلاف بین میانگین پتاسیم استخراج‌شده در غلظت‌های مختلف استات آمونیوم از نظر آماری معنی‌دار نبود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات خاک و کود پتاسیم در سطح یک درصد اثر معنی‌داری بر وزن خشک، غلظت و جذب پتاسیم گیاه ذرت داشت. علاوه بر این، همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r = 0.99$)، بین مقادیر پتاسیم استخراج‌شده با استفاده از غلظت‌های مختلف استات آمونیوم مشاهده شد. عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار، همبستگی معنی‌داری با شاخص عملکرد نسبی و پاسخ گیاه، داشت. نتایج نشان داد که حد بحرانی پتاسیم به روش تصویری کیت-نلسون به‌ترتیب ۲۵۰، ۲۵۵، ۲۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار عصاره‌گیر استات آمونیوم بودند. نتایج نشان داد که کاهش غلظت استات آمونیوم بر میزان پتاسیم استخراج‌شده و تعیین حد بحرانی تأثیری ندارد. لذا توصیه می‌شود جهت عصاره‌گیری پتاسیم قابل استفاده، استات آمونیوم ۰/۱ مولار استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: استات آمونیوم، پتاسیم قابل استفاده، ذرت

مقدمه

فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه مانند تنظیم فشار اسمزی، تعادل کاتیون-آنیون، سنتز پروتئین و فعال‌سازی آنزیم‌ها نقش دارد. از دیدگاه کشاورزی، پتاسیم در خاک عمدتاً به چهار شکل، شامل پتاسیم محلول، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی و پتاسیم ساختمانی وجود دارد. این اشکال در تعادل پویا با یکدیگر قرار دارند و این تعادل نقش مؤثری در فراهمی پتاسیم قابل استفاده برای گیاهان ایفا می‌کند (Lalitha & Dhakshinamoorthy, 2014). عوامل مختلفی بر قابلیت استفاده

آنالیز شیمیایی خاک برای برآورد میزان در دسترس بودن عناصر غذایی، یکی از مؤثرترین روش‌ها در مدیریت بهینه تغذیه گیاه است، که نه تنها در راهنمایی توصیه‌های کوددهی نقش دارد، بلکه به حفظ و بهبود پایداری خاک و کیفیت آب نیز کمک می‌کند (Ferrando et al., 2020). پتاسیم به عنوان هفتمین عنصر فراوان در پوسته زمین، یکی از عناصر ضروری جهت رشد گیاهان می‌باشد و در بسیاری از

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
(*)- نویسنده مسئول: Email: marziehbarati99@yahoo.com

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

پتاسیم در خاک تأثیر می‌گذارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اندازه ذرات خاک، نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت بافری خاک، رطوبت و دمای خاک و همچنین pH نیز اشاره کرد (Havlin et al., 2016). پتاسیم قابل استفاده را می‌توان از طریق مطالعات رشد گیاه که توانایی خاک در تأمین پتاسیم را ارزیابی می‌کنند، یا با استفاده از عصاره گیرهای شیمیایی که قدرت آزادسازی پتاسیم را تعیین می‌کنند، و یا با استفاده از ترکیبی از هر دو روش ارزیابی کرد. در این راستا، آزمون خاک به عنوان روش کاربردی، سریع و مقرون به صرفه، معیاری مناسب برای برآورد دقیق پتاسیم قابل جذب محسوب می‌شود و نقش مهمی در مدیریت کودهای پتاسیمی دارد. دستیابی به نتایج قابل اعتماد در آزمون خاک، مستلزم استفاده از یک عصاره گیر کارآمد و سازگار با انواع مختلف خاک است. عملکرد موفق یا ناموفق یک عصاره گیر در ارزیابی وضعیت پتاسیم خاک، به طور عمده، به نوع و مقدار شکل‌های مختلف پتاسیم موجود در کانی‌های خاک بستگی دارد. همبستگی میان پتاسیم استخراج شده توسط هر عصاره گیر و میزان جذب آن توسط گیاه، یکی از معیارهای اصلی در ارزیابی کارایی عصاره گیرها و انتخاب مناسب‌ترین روش برای برآورد پتاسیم قابل جذب گیاه محسوب می‌شود (Zarrabi & Jalali, 2008). با توجه به تأثیر نوع گیاه، شرایط اقلیمی و ترکیب کانی‌شناسی خاک بر میزان پتاسیم قابل استفاده، انتخاب عصاره گیر مناسب برای هر منطقه و با در نظر گرفتن نوع گیاه کشت شده، ضروری به نظر می‌رسد، اگرچه امکان تعمیم برخی از این روش‌ها به مناطق مشابه وجود دارد. در برخی مطالعات، عصاره گیرهای مختلف در یک نوع خاک و منطقه خاص بررسی و بهترین عصاره گیر برای آن شرایط معرفی شده است.

حسین‌پور و سماواتی (Hosseinpour & Samavati, 2008)، گزارش کردند که عصاره گیرهای مختلفی برای برآورد پتاسیم قابل استفاده در خاک به کار می‌روند از جمله می‌توان به: استات آمونیوم یک مولار، بی‌کربنات آمونیوم-دی‌تی‌بی‌ای، نیترات سدیم، نیترات آمونیوم، کلسیم کلرید، بری ۱، ۲ و ۳، مهلیج ۱، ۲ و ۳، بی‌کربنات سدیم و اسیدهای معدنی اشاره کرد.

عصاره گیر استات آمونیوم یک مولار خنثی، رایج‌ترین عصاره گیر برای تعیین پتاسیم قابل استفاده در خاک‌ها می‌باشد (Haby et al., 1990). این روش برای استخراج پتاسیم تبدلی بسیار کارآمد است، اما ممکن است دقت کافی برای اندازه‌گیری پتاسیم به راحتی قابل جذب توسط گیاه را نداشته باشد. در خاک‌هایی که دارای مقادیر بالایی از کانی‌های حاوی پتاسیم هستند، به دلیل وجود مکان‌های اختصاصی جذب پتاسیم، بخش زیادی از این عنصر با انرژی بالا در این مکان‌ها نگهداری می‌شود و در زمان عصاره‌گیری با استات آمونیوم، بخشی از آن استخراج می‌شود. این مسئله می‌تواند یکی از دلایل همبستگی ضعیف بین پتاسیم استخراج شده با استات آمونیوم و پاسخ گیاه به کود

پتاسیم در چنین خاک‌هایی باشد. (Havlin et al., 2016). آموریوم و همکاران (Amorim et al., 2021)، چهار عصاره گیر، شامل: استات آمونیوم یک مولار، مهلیج ۱، مهلیج ۳ و کلرید آمونیوم یک مولار را برای ارزیابی عصاره گیر مناسب پتاسیم قابل دسترس ذرت در برخی خاک‌های برزیل بررسی کردند. نتایج نشان داد که مهلیج ۱ بیشترین همبستگی را با شاخص‌های رشد ذرت داشت و پتاسیم قابل دسترس بیشتری را برای این گیاه استخراج نمود. فتحی و همکاران (Fathi et al., 2014)، به ارزیابی عصاره گیرهای مختلف، شامل: استات آمونیوم یک مولار، استات سدیم یک مولار، سدیم کلرید یک مولار، باریم کلرید ۰/۱ مولار، اسید نیتریک ۰/۱ مولار و کلسیم کلرید ۰/۱ مولار برای تعیین پتاسیم قابل استفاده ذرت در خاک‌های آهکی استان کردستان پرداختند و گزارش نمودند که عصاره گیر استات آمونیوم ۱ مولار با ضریب همبستگی $r = 0.84$ ($P \leq 0.01$) رابطه معناداری با جذب پتاسیم توسط ذرت دارد و به دلیل سادگی، هزینه پایین و عملکرد مناسب، به عنوان عصاره‌گیری مناسب برای پیش‌بینی پتاسیم قابل استفاده ذرت در این خاک‌ها معرفی شد.

پس از انتخاب عصاره گیر مناسب، تعیین حد بحرانی پتاسیم در خاک به منظور ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاه و پیش‌بینی پاسخ گیاه به مقادیر مختلف پتاسیم، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. (Black, 2013). اعداد متفاوتی برای حدود بحرانی پتاسیم در خاک‌های آهکی در مطالعات گلخانه‌ای و مزرعه‌ای گزارش شده است. به منظور تعیین حد بحرانی روش‌های مختلفی، از جمله: روش میچرلیخ-بری (Bray, 1958)، روش ترتیب ستونی پاسخ گیاه (Havlin & Soltanpour, 1982)، روش تصویری کیت-نلسون (Cate & Nelson, 1965) و روش تجزیه واریانس کیت-نلسون (Cate & Nelson, 1971) استفاده می‌شود. حد بحرانی پتاسیم در خاک‌ها، با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نوع عصاره گیر به کار رفته و نوع گیاه کشت شده متفاوت می‌باشد. نظری و همکاران (Nazari et al., 2021)، حد بحرانی پتاسیم با عصاره گیر استات آمونیوم یک نرمال را به روش تصویری کیت-نلسون در ۹۰ درصد عملکرد نسبی در گیاه کینوا، ۲۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش نمودند. منا و همکاران (Meena et al., 2015)، در یک آزمایش کشت گلدانی با استفاده از خاک‌های دارای سطوح مختلف پتاسیم از ۱۸ منطقه در ایالت مهاراشترا هند، حد بحرانی پتاسیم برای گیاه سورگوم را با استفاده از عصاره گیر استات آمونیوم یک نرمال و روش تصویری کیت-نلسون، ۵۲۷ کیلوگرم در هکتار گزارش نمودند.

در اغلب مطالعات، از عصاره گیر استات آمونیوم با غلظت ۱ مولار برای استخراج پتاسیم استفاده شده است. با این حال، تأثیر غلظت‌های کمتر این عصاره گیر تاکنون بررسی نشده است. بنابراین، هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی عصاره گیر استات آمونیوم در چهار غلظت مختلف (۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار) و انتخاب عصاره گیر مناسب

می‌باشد، همچنین، مقایسه مقادیر پتاسیم استخراج‌شده به‌منظور تعیین پتاسیم قابل استفاده و برآورد حد بحرانی پتاسیم برای گیاه ذرت در تعدادی از خاک‌های آهکی در شرایط گلخانه‌ای بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور مطالعه اثر غلظت استات آمونیوم در استخراج پتاسیم قابل استفاده ذرت، ۱۲۰ نمونه خاک زراعی از عمق ۳۰ سانتی‌متری در فروردین ماه ۱۴۰۳ تهیه شد. پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها و عبور از الک ۲ میلی‌متری، مقدار پتاسیم قابل استفاده در خاک‌ها با عصاره‌گیر استات آمونیوم یک نرمال تعیین شد. براساس میانگین مقادیر پتاسیم استخراج شده، ۳۰ نمونه خاک (شکل ۱)، که حاوی مقادیر مختلف پتاسیم بودند، انتخاب شدند. سپس، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های انتخاب شده، شامل توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۲ به ۱ آب به خاک (Rhoades, 1996)، pH در سوسپانسیون ۲ به ۱ آب به خاک (Thomas, 1982)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید (Loeppert & Suarez, 1996) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات سدیم در pH (Sumner & Miller, 1996)، اندازه‌گیری شد. همچنین، پتاسیم محلول خاک توسط آب مقطر با نسبت ۱ به ۵ خاک به آب، پتاسیم قابل استفاده خاک‌ها تحت شرایط یکسان با عصاره‌گیر استات آمونیوم یک نرمال (Knudsen et al., 1982)، استات آمونیوم ۰/۵ مولار (Shokri Vahed, 2018) استات آمونیوم ۰/۲۵ مولار (Ahrari et al., 2017) و استات آمونیوم ۰/۱ مولار (Shokri Vahed, 2018)، عصاره‌گیری شدند.

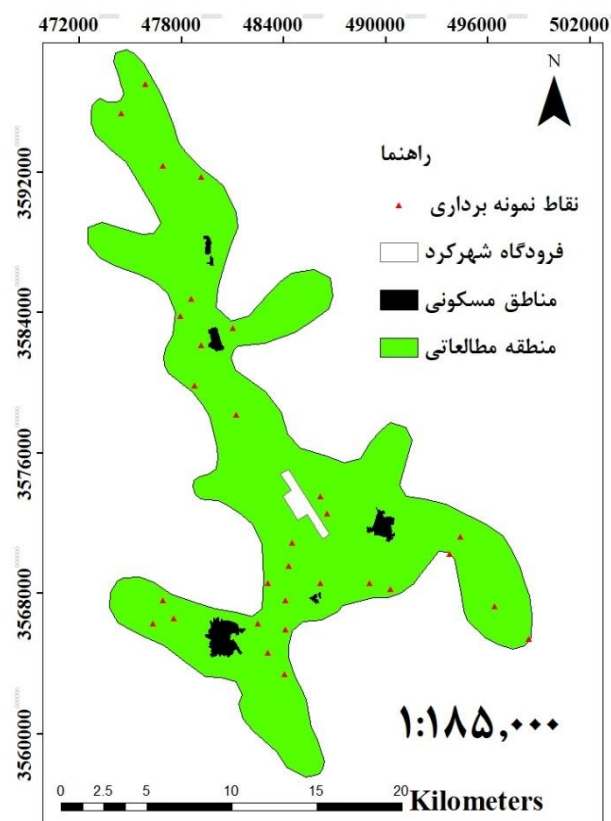
آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳۰ نمونه خاک با دو سطح پتاسیم (مقدار صفر و ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم از منبع سولفات پتاسیم) در سه تکرار در گلخانه انجام شد. به همین منظور، بذر ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، در گلدان‌هایی با هفت کیلوگرم خاک کشت شد. برای کشت گیاه، بذرهای ذرت با محلول قارچ‌کش بنومیل ضدعفونی شده و تعداد پنج بذر در هر گلدان کشت شد. بعد از جوانه‌زنی، تعداد بذرها به دو عدد در هر گلدان کاهش داده شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، مقادیر ۵۰، ۱۰ و ۵ میلی‌گرم بر

کیلوگرم فسفر، آهن و روی به‌صورت کودهای مونوکلسیم دی‌هیدروژن فسفات، سکوسترین ۱۳۸ آهن و سولفات روی به هر گلدان اضافه شد. همچنین، مقدار ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره به صورت تقسیطی در سه نوبت (در زمان کاشت، سه و پنج هفته بعد از کاشت) اضافه گردید. در طول دوره رشد، شرایط محیطی گلخانه به‌صورت نسبتاً کنترل‌شده نگهداشته شد، به‌طوری‌که دمای روز در محدوده ۲۳ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، دمای شب بین ۱۷ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد، و رطوبت نسبی بین ۵۰ تا ۶۰ درصد بود. مراقبت‌های لازم از قبیل آبیاری در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه و حذف علف‌های هرز انجام شد. پس از تکمیل مرحله رویشی (پس از دو ماه)، بخش‌های هوایی گیاه برداشت شد و با آب مقطر شسته شدند. سپس، به‌مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک و وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خشک شده در آون، به روش خاکستر خشک هضم و غلظت پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فوتومتر اندازه‌گیری شد (Waling et al., 1989). همچنین، تفاوت ماده خشک گیاه در تیمارهای کود داده شده و کود داده نشده به عنوان پاسخ گیاه (ΔY_{max}) و جذب پتاسیم و عملکرد نسبی با استفاده از معادله‌های ۱ و ۲، محاسبه شد.

$$(۱) \quad \text{غلظت پتاسیم در گیاه} \times \text{عملکرد گیاه} = \text{جذب پتاسیم}$$

$$(۲) \quad ۱۰۰ * \frac{\text{عملکرد در تیمار شاهد}}{\text{عملکرد در تیمار کود داده شده}} = \text{عملکرد نسبی (درصد)}$$

غلظت‌های مختلف عصاره‌گیر با مقایسه میانگین پتاسیم قابل استفاده حاصل از هر غلظت و با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه و آزمون دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند. به‌منظور ارزیابی معنی‌دار بودن اثر تیمارها از نظر پاسخ‌های گیاهی، تجزیه واریانس آزمایش فاکتوریل با استفاده از نرم‌افزار Statistica انجام و معنی‌دار بودن اختلاف بین تیمارها از نظر عملکرد ماده خشک، جذب و غلظت پتاسیم، با استفاده از آزمون دانکن انجام شد. به منظور بررسی ارتباط غلظت‌های مختلف استات آمونیوم با یکدیگر، ضرایب همبستگی پیرسون بین مقادیر پتاسیم استخراجی در غلظت‌های مختلف استات آمونیوم تعیین شد. سپس، حد بحرانی پتاسیم قابل استفاده خاک‌ها در غلظت‌های مناسب عصاره‌گیر استات آمونیوم، با روش تصویری کیت-نلسون انجام شد.



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه برداری خاک‌های مورد مطالعه در دشت شهرکرد
Figure 1- Location of the study area map and soil sampling points in the Shahrekord plain

نتایج و بحث

نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه شده در **جدول ۱**، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خاک‌ها دارای pH ۷/۷ تا ۸/۲، مواد آلی ۰/۲۳ تا ۱/۶۶ درصد، کربنات کلسیم معادل ۲۰ تا ۴۶ درصد، گنجایش تبادل کاتیونی ۱۵ تا ۲۵ سانتی مول‌بار بر کیلوگرم و بافت خاک‌ها متوسط تا سنگین بودند. مقادیر پتاسیم عصاره‌گیری شده در خاک‌های مطالعاتی در عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ مولار، در **جدول ۲** نشان داده شده است. دامنه تغییرات پتاسیم قابل استفاده در عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ مولار به‌ترتیب: ۵۸۱-۱۵۷، ۵۹۸-۱۵۵، ۵۹۶-۱۶۰ و ۵۹۰-۱۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار پتاسیم قابل استفاده در غلظت یک نرمال استات آمونیوم با میانگین ۳۴۱/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار پتاسیم قابل استفاده در غلظت ۰/۱ نرمال استات آمونیوم با میانگین ۳۳۸/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

روش تصویری کیت-نلسون

کیت-نلسون (Cate & Nelson, 1965)، این روش را به‌منظور گروه‌بندی مقادیر عناصر غذایی خاک به دو دسته کم و زیاد، طراحی نمودند. در این روش خاک‌ها به خاک‌هایی که احتمال پاسخ به مصرف کود در آنها اندک و خاک‌هایی که احتمال پاسخ به مصرف کود در آنها زیاد می‌باشد، تقسیم می‌شوند. در این روش، محور X ، میزان عنصر غذایی عصاره‌گیری شده از خاک و محور Y ، درصد عملکرد نسبی می‌باشد. در این نمودار، محل تلاقی عنصر غذایی عصاره‌گیری شده از خاک با نتایج درصد عملکرد نسبی نقطه‌گذاری می‌شود. خط عمود بر محور Y ها، از ۹۰ درصد عملکرد نسبی ترسیم خواهد شد. سپس، خط عمود بر محور X ها، به‌گونه‌ای ترسیم می‌شود که نمودار پراکنش نقاط به چهار قسمت تقسیم و بیشترین نقاط در ربع‌های دوم و چهارم قرار گیرد. محل تلاقی خط عمود بر محور X ، حد بحرانی عنصر غذایی در خاک در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1- Some physical and chemical properties of the studied soil

شماره خاک	pH 1:2	EC 1:2	بافت خاک	رس	سیلت	شن	ماده آلی	کربنات کلسیم معادل	ظرفیت تبادل کاتیونی
Soil number		(dS m ⁻¹)	Soil texture	Clay	Silt	Sand	Organic matter %	Calcium carbonate equivalent	Cation exchange capacity (Cmol _c kg ⁻¹)
1	7.8	0.35	C.L	27.4	24.0	48.6	0.90	38.5	21.2
2	7.8	0.32	C.L	27.4	29.0	43.6	0.78	40.5	17.1
3	8.0	0.32	C.L	25.4	26.0	48.6	0.65	23.5	21.3
4	8.0	0.32	S.C.L	23.4	26.0	50.6	0.40	34.0	15.3
5	7.9	0.33	C.L	37.4	18.0	44.6	0.45	35.0	25.0
6	8.1	0.32	S.L	19.4	16.0	64.6	0.32	46.0	15.0
7	7.9	0.31	S.L	17.4	16.0	66.6	0.23	33.5	20.0
8	7.8	0.37	S.L	17.4	20.0	62.6	0.82	43.0	18.0
9	8.0	0.31	C	41.4	28.0	30.6	0.51	38.0	23.7
10	8.0	0.35	C.L	23.4	38.0	38.6	1.30	33.0	19.1
11	8.0	0.35	C	43.4	34.0	22.6	0.97	29.0	21.0
12	8.0	0.35	C.L	35.4	38.0	26.6	1.28	26.5	20.3
13	8.1	0.31	C.L	27.4	30.0	42.6	0.59	44.5	17.0
14	8.2	0.36	C.L	35.4	36.0	28.6	1.05	45.0	18.5
15	8.1	0.35	C.L	33.4	40.0	26.6	1.66	43.0	23.2
16	8.1	0.31	S.C.L	25.4	30.0	44.6	0.71	44.5	19.0
17	8.0	0.33	C.L	29.4	42.0	28.6	0.83	20.0	21.7
18	8.2	0.37	C.L	27.4	32.0	40.6	1.53	39.5	19.1
19	8.0	0.42	C.L	29.4	38.0	32.6	0.88	25.0	15.5
20	8.2	0.35	C.L	31.4	32.0	36.6	1.43	38.0	19.5
21	7.9	0.34	C.L	29.4	28.0	42.6	1.33	24.0	21.7
22	8.0	0.33	C	47.4	28.0	24.6	0.72	36.0	21.1
23	8.0	0.31	S.C.L	31.4	12.0	56.6	0.41	44.5	18.0
24	8.0	0.33	C	47.4	26.0	26.6	0.55	38.5	18.4
25	8.1	0.33	C	43.4	20.0	36.6	0.70	29.5	21.7
26	8.2	0.30	C	43.4	22.0	34.6	0.50	34.0	21.7
27	7.8	0.31	C.L	33.4	22.0	44.6	0.83	23.5	23.0
28	7.7	0.33	S.L	19.4	16.0	64.6	0.48	20.0	22.3
29	8.1	0.31	C	41.4	32.0	26.6	0.90	26.5	24.8
30	8.1	0.32	C	41.4	32.0	26.6	0.68	30.0	21.4
میانگین Mean	0.8	0.33		33.0	28.0	39.0	0.83	34.4	20.0

لومی شنی، لومی رسی شنی، لومی رسی، رسی

SL: Sandy Loam ,SCL: Sandy Clay Loam ,CL: Clay Loam ,C: Clay

داد که بین میانگین مقادیر پتاسیم قابل استفاده حاصل از غلظت‌های مختلف استات آمونیوم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. بازرگان و همکاران (Bazargan et al., 2022)، دامنه تغییرات مقدار پتاسیم قابل

نتایج نشان داد که مقادیر پتاسیم قابل استفاده عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم با غلظت‌های مختلف به یکدیگر نزدیک بود و کمتر از یک درصد تفاوت داشت. همچنین، نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان

استخراج شده در عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ مولار در **جدول ۳** نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اختلاف بین میانگین پتاسیم استخراج‌شده در غلظت‌های مختلف استات آمونیوم از نظر آماری معنی‌دار نبود، که بیانگر توان مشابه استخراج عصاره‌گیر در غلظت‌های مورد بررسی است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر غلظت غیرمعنی‌دار، اثر نوع خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار و اثر متقابل غلظت و خاک نیز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهد که هرچند بین غلظت‌های مختلف استات آمونیوم تفاوت کلی وجود ندارد، اما خاک‌ها از نظر مقدار پتاسیم استخراج‌شده با یکدیگر تفاوت دارند و واکنش آن‌ها به تغییر غلظت عصاره‌گیر یکسان نیست.

استفاده در خاک‌های استان فارس با عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های ۱ و ۰/۱ نرمال را به ترتیب ۱۵۲ تا ۸۰۰ با میانگین ۳۱۹ و ۱۷۲ تا ۶۵۰ با میانگین ۳۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش نمودند. شکری واحد (Shokri Vahed, 2018)، دامنه تغییرات مقدار پتاسیم قابل استفاده در خاک‌های شالیزاری را با عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ به ترتیب ۹۱ تا ۳۷۳، ۵۸ تا ۳۲۱، ۵۴ تا ۳۰۵ و ۴۵ تا ۲۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش نمود. احراری و همکاران (Ahrari et al., 2017)، دامنه تغییرات مقدار پتاسیم قابل استفاده خاک با عصاره‌گیر استات آمونیوم در غلظت‌های ۱ و ۰/۲۵ نرمال را به ترتیب ۵۲/۴ تا ۹۲۱/۹ با میانگین ۲۳۱/۱ و ۵۲/۳ تا ۹۳۷/۸ با میانگین ۲۲۳/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش نمودند.

نتایج تجزیه واریانس اثر نوع عصاره‌گیر و خاک بر مقدار پتاسیم

جدول ۲- مقادیر پتاسیم قابل استفاده خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های مختلف

Table 2- Available potassium concentrations in soil (mg kg^{-1}) extracted using NH_4OAc at different concentrations

شماره خاک Soil number	استات آمونیوم ۱ نرمال NH_4OAc 1 N	استات آمونیوم ۰/۵ نرمال NH_4OAc 0.5 N	استات آمونیوم ۰/۲۵ نرمال NH_4OAc 0.25 N	استات آمونیوم ۰/۱ نرمال NH_4OAc 0.1 N
1	301	302	304	308
2	352	350	323	341
3	206	208	209	216
4	272	274	276	280
5	195	205	207	190
6	310	299	297	303
7	242	237	230	262
8	168	160	155	157
9	285	282	281	288
10	338	334	330	330
11	311	308	290	290
12	295	291	290	283
13	187	184	177	171
14	230	229	228	227
15	377	377	379	382
16	332	334	329	334
17	456	459	474	471
18	324	324	318	309
19	390	393	405	400
20	324	324	327	308
21	590	596	598	581
22	218	224	226	220
23	184	189	190	202
24	283	311	314	320
25	258	270	269	283
26	250	245	248	238
27	251	249	251	247
28	403	359	358	356
29	308	306	303	300
30	343	341	340	305
میانگین Mean	299.43 ^a	298.80 ^a	297.53 ^a	296.73 ^a

حروف مشابه بیانگر نبود اختلاف بین میانگین تیمارهاست.

Similar letters indicate no significant difference among the treatment means.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر غلظت و خاک بر مقدار پتاسیم استخراج شده با استات آمونیوم

Table 3- Analysis of variance for the effect of ammonium acetate concentration and soil type on the amount of extracted potassium

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات مقدار پتاسیم استخراج شده Mean square of extracted potassium content
اثر غلظت Concentration effect	3	135 ^{ns}
خاک Soil	29	92744 ^{**}
اثر غلظت × خاک Concentration effect × Soil	87	246 ^{**}
خطا Error	240	1

^{ns}: غیر معنی‌دار و ^{**}: معنی‌دار در سطح اطمینان ۱ درصد.

^{ns}: non significant and ^{**}: Significant at the 1% level of probability

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس ماده خشک ذرت و غلظت و جذب پتاسیم در تیمارهای نوع خاک و مقدار پتاسیم

Table 4- Analysis of variance results for maize dry matter, potassium concentration, and potassium uptake as affected by soil type and potassium application rate treatments

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Square		
		عملکرد ماده خشک Dry matter	غلظت پتاسیم Potassium concentration	جذب پتاسیم Potassium uptake
نوع خاک Soil type	29	26.17 ^{**}	1.45 ^{**}	0.074 ^{**}
مقدار پتاسیم Potassium content	1	38.34 ^{**}	44.55 ^{**}	0.878 ^{**}
نوع خاک × مقدار پتاسیم Soil type × Potassium content	29	2.84 ^{ns}	0.535 ^{**}	0.013 ^{**}
خطا Error	120	3.84 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.007 ^{ns}
ضریب تغییرات Coefficient of Variation		26.4	18.7	35.0

^{**}: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ^{ns}: غیر معنی‌دار

^{**}: Significant at the 1% level of probability and ^{ns}: non significant

جدول ۵- همبستگی بین مقادیر پتاسیم عصاره‌گیری شده در غلظت‌های مختلف استات آمونیوم

Table 5- Coefficient of correlations between potassium extracted by NH₄OAc at different concentrations

عصاره‌گیر Extractant	استات آمونیوم ۰/۲۵ + مولار NH ₄ OAc 0.25 N	استات آمونیوم ۰/۵ + مولار NH ₄ OAc 0.5 N	استات آمونیوم ۱ + مولار NH ₄ OAc 1 N
استات آمونیوم ۰/۱ + مولار NH ₄ OAc 0.1N	0.99 ^{**}	0.99 ^{**}	0.99 ^{**}
استات آمونیوم ۰/۲۵ + مولار NH ₄ OAc 0.25N		0.99 ^{**}	0.99 ^{**}
استات آمونیوم ۰/۵ + مولار NH ₄ OAc 0.5N			0.99 ^{**}

^{**}: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

^{**}: Significant at the 1% level of probability

تغییر لزوماً به افزایش ماده خشک منجر نمی‌شود، که احتمالاً به دلیل محدودیت‌های دیگر خاکی یا آستانه پاسخ گیاه به پتاسیم در شرایط آزمایش است. خودشناس و همکاران (Khodshenas et al., 2021)، گزارش نمودند که تأثیر برهمکنش خاک و کود در سطح ۵ درصد بر غلظت پتاسیم گیاه معنی‌دار و بر عملکرد ماده خشک و جذب کل پتاسیم معنی‌دار نبود. نتایج نشان می‌دهد که پتاسیم جذب‌شده در این شرایط، عمدتاً در بافت‌های گیاهی انباشته می‌شود، بدون آن که لزوماً به بهبود عملکرد ماده خشک منجر گردد.

نتایج تجزیه واریانس آزمایش فاکتوریل در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اثر نوع خاک و اثر سطح پتاسیم مصرفی بر عملکرد ماده خشک، غلظت و جذب پتاسیم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بنابراین، می‌توان گفت که مصرف پتاسیم باعث افزایش رشد گیاه ذرت گردیده و سبب افزایش غلظت و جذب پتاسیم در گیاه شده است. همچنین، اثر متقابل نوع خاک و میزان مصرف پتاسیم بر عملکرد ماده خشک ذرت غیرمعنی‌دار، اما بر غلظت و جذب پتاسیم معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه غلظت و جذب پتاسیم در نتیجه‌ی تعامل نوع خاک و میزان مصرف آن تغییر می‌کند، اما این

جدول ۶- اثر مصرف کود پتاسیمی بر پارامترهای گیاهی
Table 6- Effects of potassium fertilizer on plant parameters

شماره خاک Soil Number	پاسخ گیاه Plant response (g pot ⁻¹)	عملکرد نسبی Relative yield %	جذب کل پتاسیم Potassium uptake (mg pot ⁻¹)		غلظت پتاسیم Potassium concentration %		عملکرد ماده خشک Dry Matter (g pot ⁻¹)	
			سطوح پتاسیم مصرفی Potassium application levels (mg kg ⁻¹)					
			100	0	100	0	100	0
1	-0.92	109.20	460.99 ^a	438.94 ^a	4.61 ^b	4.02 ^a	10.0 ^a	10.92 ^a
2	2.27	83.57	620.04 ^b	314.60 ^a	4.49 ^b	2.72 ^a	13.81 ^b	11.54 ^a
3	0.98	88.62	343.81 ^b	204.66 ^a	4.0 ^b	2.68 ^a	8.60 ^b	7.62 ^a
4	-0.67	107.50	501.56 ^a	439.19 ^a	5.58 ^b	4.55 ^a	8.98 ^a	9.65 ^a
5	3.38	70.21	565.09 ^b	308.15 ^a	4.98 ^a	3.87 ^a	11.33 ^b	7.95 ^a
6	0.51	95.23	419.58 ^b	254.22 ^a	3.94 ^b	2.51 ^a	10.64 ^a	10.13 ^a
7	2.07	77.22	403.28 ^a	260.89 ^a	4.43 ^b	3.71 ^a	9.10 ^b	7.03 ^a
8	1.94	85.38	606.80 ^a	479.73 ^a	4.56 ^a	4.22 ^a	13.30 ^b	11.35 ^a
9	3.66	125.77	947.29 ^b	553.18 ^a	5.30 ^b	3.89 ^a	14.20 ^b	17.86 ^a
10	0.67	94.80	594.14 ^b	441.06 ^a	4.61 ^b	3.61 ^a	12.87 ^a	12.20 ^a
11	0.11	98.88	496.84 ^b	338.77 ^a	4.91 ^b	3.38 ^a	10.11 ^a	10.0 ^a
12	-0.24	102.54	399.97 ^a	340.65 ^a	4.25 ^b	3.53 ^a	9.42 ^a	9.66 ^a
13	0.47	94.48	446.01 ^b	258.71 ^a	5.23 ^b	3.21 ^a	8.53 ^a	8.06 ^a
14	0.06	99.59	646.45 ^a	593.72 ^a	4.45 ^b	4.10 ^a	14.51 ^a	14.45 ^a
15	-1.33	117.75	315.40 ^a	296.64 ^a	4.22 ^b	3.37 ^a	7.47 ^a	8.79 ^a
16	2.22	85.88	808.54 ^b	507.46 ^a	5.13 ^b	3.75 ^a	15.75 ^b	13.52 ^a
17	0.20	102.07	422.57 ^a	392.23 ^a	4.28 ^a	4.06 ^a	9.66 ^a	9.86 ^a
18	2.49	84.0	832.06 ^b	602.12 ^a	5.35 ^b	4.61 ^a	15.55 ^b	13.06 ^a
19	0.38	94.92	300.19 ^a	178.17 ^a	4.05 ^b	2.53 ^a	7.42 ^a	7.04 ^a
20	0.55	92.74	361.87 ^a	299.41 ^a	4.74 ^b	4.23 ^a	7.63 ^a	7.08 ^a
21	0.08	99.37	528.38 ^a	503.42 ^a	4.42 ^a	4.24 ^a	11.95 ^a	11.88 ^a
22	0.82	91.25	553.86 ^b	263.93 ^a	5.94 ^b	3.10 ^a	9.32 ^a	8.51 ^a
23	1.51	86.48	545.82 ^a	423.10 ^a	4.89 ^a	4.38 ^a	11.16 ^b	9.65 ^a
24	1.08	91.03	616.73 ^b	508.99 ^a	5.11 ^b	4.63 ^a	12.08 ^a	11.0 ^a
25	2.20	83.42	638.15 ^b	466.27 ^a	4.82 ^b	4.22 ^a	13.24 ^b	11.05 ^a
26	2.66	78.98	671.45 ^b	411.67 ^a	5.31 ^b	4.12 ^a	12.65 ^b	9.99 ^a
27	2.22	81.84	522.92 ^b	278.79 ^a	4.27 ^b	2.78 ^a	12.23 ^b	10.01 ^a
28	-1.27	114.93	392.41 ^a	390.27 ^a	4.60 ^b	3.98 ^a	8.53 ^a	9.80 ^a
29	0.62	94.97	528.64 ^b	391.66 ^a	4.27 ^b	3.33 ^a	12.36 ^a	11.74 ^a
30	-0.93	109.60	487.89 ^a	486.22 ^a	5.06 ^b	4.60 ^a	9.64 ^a	10.57 ^a
میانگین Mean	0.93	94.74	532.62 ^b	387.56 ^a	4.73 ^b	3.73 ^a	11.06 ^b	10.40 ^a

حروف مشابه بیانگر نبود اختلاف بین میانگین تیمارها در هر ردیف است.

Similar letters indicate that there is no significant difference among the treatment means within each row.

۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار محاسبه شد (جدول ۵). همان طور که نتایج نشان می‌دهد، همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح یک درصد

به‌منظور بررسی ارتباط بین غلظت‌های مختلف استات آمونیوم، ضرایب همبستگی بین مقادیر پتاسیم استخراج شده در غلظت‌های

وجود دارد. احزازی و همکاران (Ahrari et al., 2017)، نیز ضریب همبستگی بسیار بالا ($r = 0.999$)، بین پتاسیم قابل استفاده استخراج‌شده با غلظت‌های ۱ و ۰/۲۵ مولار استات آمونیوم را در سطح یک درصد گزارش نمودند که تأییدکننده نتایج حاضر است. به‌منظور ارزیابی تأثیر مصرف پتاسیم بر عملکرد ماده خشک، غلظت و جذب پتاسیم از آمون دانکن استفاده شد که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چند تیمار پتاسیم تنها در ۱۲ نمونه خاک باعث افزایش ماده خشک در سطح احتمال ۵ درصد شده، اما جذب و غلظت پتاسیم را در بیشتر خاک‌ها به‌طور معنی‌داری افزایش داده است.

انتخاب عصاره‌گیر مناسب برای استخراج پتاسیم قابل استفاده خاک بر مبنای بررسی همبستگی بین پتاسیم استخراج شده توسط عصاره‌گیر با شاخص‌های گیاهی می‌باشد (Hosseinpour & Samavati, 2008). برهمین اساس، ارتباط بین پتاسیم استخراج شده در غلظت‌های مختلف استات آمونیوم با شاخص‌های گیاه ذرت در جدول ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های مختلف با پاسخ گیاه همبستگی منفی و معنی‌دار و با عملکرد نسبی همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. اما بین پتاسیم استخراج شده با عملکرد ماده خشک، غلظت و جذب پتاسیم همبستگی معنی‌داری مشاهده نشد. بنابراین، می‌توان غلظت‌های مختلف استات آمونیوم را به‌عنوان عصاره‌گیر مناسب برای ارزیابی پتاسیم قابل جذب در این خاک‌ها در نظر گرفت. فتحی و همکاران (Fathi et al., 2014)، عصاره‌گیر استات آمونیوم یک مولار را به عنوان عصاره‌گیر مناسب برای پیش‌بینی پتاسیم قابل استفاده ذرت در خاک‌های آهکی استان کردستان معرفی کردند. بارونی و همکاران

(Barooni et al., 2017)، عصاره‌گیر استات آمونیوم یک مولار را، عصاره‌گیر مناسب جهت استخراج پتاسیم قابل جذب برنج در برخی از خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد دانستند. شکری واحد (Shokri Vahed, 2018)، گزارش کرد که بین غلظت‌های مختلف عصاره‌گیر استات آمونیوم (۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱ و ۰/۱) و جذب و غلظت پتاسیم در گیاه برنج، همبستگی بالایی وجود دارد که این امر استفاده از آن را به‌عنوان شاخص مفید برای ارزیابی پتاسیم قابل استفاده در خاک تأیید می‌کند.

شکل‌های ۲ تا ۵ حد بحرانی پتاسیم قابل استفاده برای دستیابی به ۹۰ درصد عملکرد نسبی ذرت را به روش تصویری کیت-نلسون در عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که حد بحرانی پتاسیم به روش تصویری کیت-نلسون در عصاره‌گیر استات آمونیوم ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار، به‌ترتیب؛ ۲۵۰، ۲۵۵، ۲۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. این نتایج نشان می‌دهد که با وجود تفاوت در غلظت عصاره‌گیر استات آمونیوم، حد بحرانی پتاسیم تقریباً ثابت بوده و تفاوت قابل توجهی نداشته است. شکری واحد (Shokri Vahed, 2018)، حد بحرانی پتاسیم قابل استفاده به روش تصویری کیت-نلسون را، در خاک‌های شالیزاری با عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار، به‌ترتیب؛ ۱۰۵، ۱۰۹، ۱۱۹ و ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش نمود. براین اساس، در خاک‌هایی با شرایط مشابه استفاده از عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ مولار می‌تواند جایگزین مناسبی برای غلظت ۱ مولار استات آمونیوم در استخراج پتاسیم از خاک باشد.

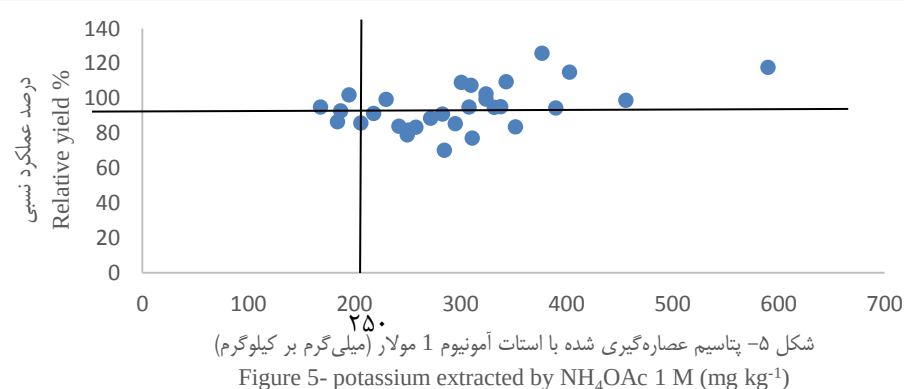
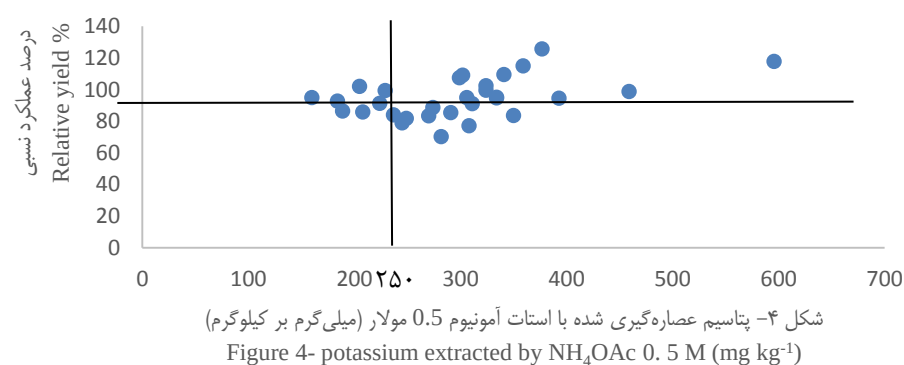
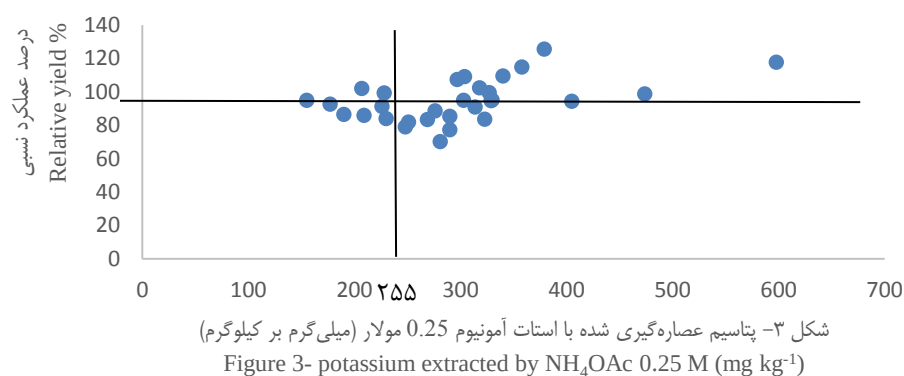
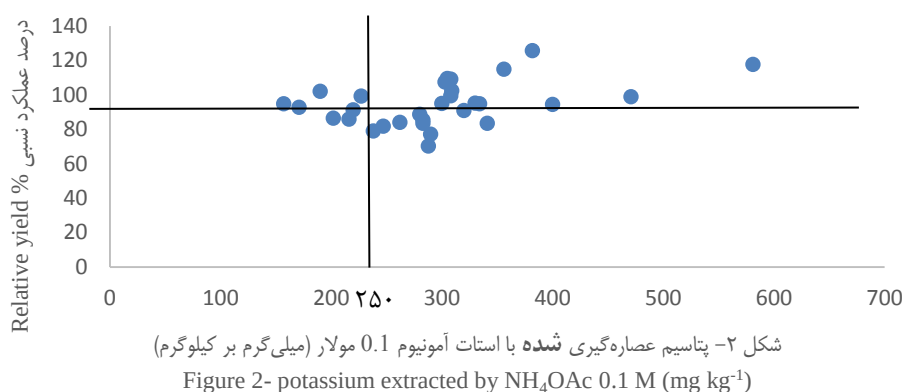
جدول ۷- همبستگی بین مقادیر پتاسیم عصاره‌گیری شده در غلظت‌های مختلف استات آمونیوم با شاخص‌های گیاهی

 Table 7- Coefficient of correlations between potassium extracted by NH_4OAc at different concentrations and plant indices

عملکرد ماده خشک	غلظت پتاسیم	جذب کل پتاسیم	پاسخ گیاه	عملکرد نسبی	غلظت استات آمونیوم
Dry matter	Potassium concentration	Potassium uptake	Plant response	Relative yield	Concentrations of NH_4OAc
0.22 ^{ns}	0.26 ^{ns}	0.27 ^{ns}	-0.48 ^{**}	0.52 ^{**}	استات آمونیوم ۰/۱ مولار NH_4OAc 0.1 N
0.26 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.30 ^{ns}	-0.54 ^{**}	0.59 ^{**}	استات آمونیوم ۰/۲۵ مولار NH_4OAc 0.25 N
0.25 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.30 ^{ns}	-0.55 ^{**}	0.61 ^{**}	استات آمونیوم ۰/۵ مولار NH_4OAc 0.5 N
0.22 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.25 ^{ns}	-0.62 ^{**}	0.67 ^{**}	استات آمونیوم ۱ مولار NH_4OAc 1 N

** : معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ^{ns} : غیر معنی‌دار

** : Significant at the 1% level of probability and ^{ns} : non significant



یکدیگر تفاوت دارند و واکنش آن‌ها به تغییر غلظت عصاره‌گیر یکسان نیست. نتایج نشان داد که اثر نوع خاک و اثر سطح پتاسیم مصرفی بر عملکرد ماده خشک، غلظت و جذب پتاسیم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقدار پتاسیم استخراج شده با عصاره‌گیر استات آمونیوم در این غلظت‌ها، همبستگی معنی‌داری با عملکرد نسبی و پاسخ گیاه داشت، اما با سایر شاخص‌ها همبستگی نداشت. همچنین، نتایج نشان داد که عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های مختلف احتمالاً می‌تواند به عنوان عصاره‌گیر مناسب در خاک‌های آهکی باشد. حد بحرانی پتاسیم با روش تصویری کیت-نلسون در عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های مختلف (۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱)، به ترتیب، ۲۵۰، ۲۵۵، ۲۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. معمولاً از محلول استات آمونیوم ۱ مولار برای عصاره‌گیری پتاسیم قابل استفاده بهره گرفته می‌شود، نتایج این پژوهش نشان داد که امکان استفاده از محلول استات آمونیوم با غلظت پایین‌تر (۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ مولار) به جای محلول ۱ مولار وجود دارد که این امر منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف مواد شیمیایی می‌شود. لذا توصیه می‌شود از استات آمونیوم ۰/۱ مولار، برای عصاره‌گیری پتاسیم خاک‌ها استفاده شود.

دردی‌پور و فرشادی‌راد (Dordipoor & Farshadyrad, 2009)، در مطالعه‌ای بر روی خاک‌های لسی استان گلستان، حد بحرانی پتاسیم قابل استفاده گندم به روش تصویری کیت-نلسون با عصاره‌گیر استات آمونیوم ۱ مولار را ۲۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش نمود. مونی‌شوار ساین و همکاران (Muneshwar Singh et al., 2019)، حد بحرانی پتاسیم با عصاره‌گیر استات آمونیوم یک مولار به روش تصویری کیت-نلسون در خاک‌های ورتی‌سول با سیستم‌های زراعی مختلف، ۳۳۵ کیلوگرم پتاسیم در هکتار گزارش نمودند. سان‌دانا و همکاران (Sandana et al., 2020)، در مطالعه‌ای که در مؤسسه تحقیقات کشاورزی در جنوب شیلی انجام شده بود، حد بحرانی پتاسیم تبادل‌ی سبب‌زمینی به روش تصویری کیت-نلسون را با عصاره‌گیر استات آمونیوم ۱ مولار، ۲۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش نمودند.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که عصاره‌گیر استات آمونیوم با غلظت‌های مختلف (۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱)، مقدار مشابهی پتاسیم استخراج می‌کند. نتایج تجزیه واریانس یک طرفه اثر نوع عصاره‌گیر و خاک بر مقدار پتاسیم استخراج شده نشان داد که بین غلظت‌های مختلف استات آمونیوم تفاوت وجود ندارد، اما خاک‌ها از نظر مقدار پتاسیم استخراج شده با

References

- Amorim, M.B., Rogeri, D.A., & Gianello, C. (2021). Potassium available to corn plants extracted by ammonium acetate, ammonium chloride, Mehlich-1 and Mehlich-3 solutions in southern Brazilian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(15), 1790-1797. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1892736>
- Ahrari, M., Owliaie, H.R., Adhami, E., & Ghiri, M.N. (2017). Study of potassium status and evaluating chemical extractants for estimating available K in some soils of olive orchards of Fars province. *Journal of Water and Soil*, 31(3), 835-845. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i3.54445>
- Bray, R.H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314-317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Black, C.A. (2013). *Soil fertility evaluation and control*. CRC Press.
- Bazargan, K., Marzi, M., Hasheminasab, K.S., Shahbazi, K., & Zare, A.A. (2022). Optimizing ammonium acetate procedure for determining available potassium in Iranian calcareous soils, testing the concentration and contact time. *Dryland Soil Research (DLSR)*, 1(1), 125-136.
- Barooni, F., Owliaie, H., Adhami, E., & Najafi Ghiri, M. (2017). Comparison of some extractants for extracting available potassium for rice in some soils of Kohgiluyeh Province. *Applied Soil Research*, 5(1), 13-24. (In Persian with English abstract)
- Cate, R.B., & Nelson, L.A. (1965). A rapid method for correlation of soil test analyses with plant response data. NC State University Agricultural Experiment Station. <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:000226900>
- Cate Jr, R.B., & Nelson, L.A. (1971). A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4), 658-660. <https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500040048x>
- Dordipoor, A., & Farshadyrad, A. (2009). Determination of critical level of potassium for wheat and its response to potassium sulfate in some loess soils of Golestan Province. *11th Congress of Soil Science of Iran, Gorgan, Iran*. (In Persian). <https://civilica.com/doc/291759>
- Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle- size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411.

11. Ferrando, M.G., Barbazán, M.M., García, F.O., & Mallarino, A.P. (2020). Comparison of the ammonium acetate, Mehlich 3, and sodium tetraphenylboron as extractants to evaluate crop available potassium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(8), 997-1005. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1744625>
12. Fathi, S., Samadi, A., Davari, M., & Asadi Kapourchal, S. (2014). Evaluating different extractants for determining corn available potassium in some calcareous soils of Kurdistan province. *Cereal Research*, 4(3), 253-266. (In Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22520163.1393.4.3.6.4>
13. Havlin, J.L., & Soltanpour, P.N. (1982). Greenhouse and field evaluation of the NH_4HCO_3 - DTPA soil test for Fe. *Journal of Plant Nutrition*, 5(4-7), 769-783. <https://doi.org/10.1080/01904168209363007>
14. Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., & Beaton, J.D. (2016). Soil fertility and fertilizers. *Pearson Education India*.
15. Hosseinpour, A.R., & Samavati, M. (2008). Evaluation of chemical extractants for the determination of available potassium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(9-10), 1559-1570. <https://doi.org/10.1080/00103620802006693>
16. Haby, V.A., Russelle, M.P., & Skogley, E.O. (1990). Testing soil for potassium, calcium, and magnesium. In R. L. Westerman (Ed.), *Soil Testing and Plant Analysis* (3rd ed., pp. 181–227). *Soil Science Society of America*, Madison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c8>
17. Knudsen, D., Peterson, G.A., & Pratt, P.F. (1982). Lithium, Sodium and Potassium. *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. (2nd ed.). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 225-246.
18. Khodshenas, M.A., Ghadbeyklou, J., & Dadivar, M. (2021). Evaluation of chemical extractants and determination of the potassium critical level in soils under the bean cultivation. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(4), 451-463. (In Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22287124.1399.34.4.3.2>
19. Lalitha, M., & Dhakshinamoorthy, M. (2014). Forms of soil potassium-a review. *Agricultural Reviews*, 35(1). <https://doi.org/10.5958/j.0976-0741.35.1.008>
20. Loeppert, R.H., & Suarez, D.L. (1996). Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, 437-474.
21. Meena, R.K., Amrutsagar, V.M., Verma, M.K., Seth, V., Meena, R., Kumar, M., & Jat, L.K. (2015). Critical limits of potassium in soil and plant for increased productivity of Sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Ecology, Environment and Conservation*, 2015, 116.
22. Muneshwar Singh, R.H., Wanjari, B.L., Abhay Shirale, L., Kumar, U., & Jamra, S.H. (2019). Response of crops to applied potassium and estimation of critical limits in vertisols. *Indian Journal of Fertilisers*, 15(7), 748-753.
23. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 961-1010.
24. Nazari, T., Suseraei, N., Barani Motlagh, M., & Dordipour, A. (2021). Determination of potassium critical level using Cate-Nelson method in quinoa plant. *The 3rd International Conference on Agricultural Engineering, Agronomy and Plant Breeding Studies, Tehran, Iran*. (In Persian). <https://civilica.com/doc/1402210>
25. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 417-435.
26. Sumner, M.E., & Miller, W.P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 1201-1229.
27. Shokri Vahed, H.S. (2018). Evaluation of various concentrations of ammonium acetate in potassium extraction and its critical levels determination in some of paddy soils. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 7(1), 6-11.
28. Sandana, P., Orena, S., Rojas, J.S., Kalazich, J., & Uribe, M. (2020). Critical value of soil potassium for potato crops in volcanic soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 1171-1177. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00202-4>
29. Thomas, G.W. (1982). Exchangeable cations. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 159-165.
30. Waling, I., Van Vark, W., Houba, V.J.G., & Van der Lee, J.J. (1989). *Soil and plant analysis, a series of syllabi: Part 7. Plant Analysis Procedures* Wageningen Agriculture University.
31. Zarrabi, M., & Jalali, M. (2008). Evaluation of extractants and quantity-intensity relationship for estimation of available potassium in some calcareous soils of western Iran. *Communications in soil science and plant analysis*, 39(17-18), 2663-2677. <https://doi.org/10.1080/00103620802358797>

Research Article

Vol. 39, No. 5, Dec. 2025-Jan. 2026, p. 479-497

Using Machine Learning Methods to Estimate Soil Erosion with the RUSLE Model in a Part of Central Iran

M.S. Ghavami¹, S. Ayoubi^{1*}

1- Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(*- Corresponding Author Email: ayoubi@cc.iut.ac.ir)

Received: 19 October 2025

Revised: 10 December 2025

Accepted: 16 December 2025

Available Online: 16 December 2025

How to cite this article:Ghavami, M.S., & Ayoubi, S. (2026). Using machine learning methods to estimate soil erosion with the RUSLE model in a part of central Iran. *Journal of Water and Soil*, 39(5), 479-497. (In Persian with English abstract).<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.95566.1502>

Introduction

Soil erosion is the most important cause of land degradation in the world, which threatens the sustainable use of the world's soil resources, especially in semi-arid regions. Despite the important implications of soil erosion in sustainable land use, there is limited information about soil erosion in Iran's watersheds. The lack of this information is related to the complexity of erosion processes, which makes predicting soil erosion costly, time-consuming and difficult. This difficulty has led to the development of various models and tools that seek to simplify soil erosion models and improve our understanding of soil erosion patterns and processes. In recent years, with the development of computer technologies, the evaluation of different machine learning algorithms used in creating predictive models has become the focus of researchers. Machine learning models have been used in numerous studies and have proven as a helpful tool for assessing and mapping various types of water-induced soil erosion. Accordingly, machine learning methods could be used to study the K-factor to identify the areas with higher soil erodibility potential. This research aimed to model and predict the soil erodibility coefficient using various machine learning methods, introduce the most important parameters affecting the prediction of this factor, as well as predict soil erosion using the RUSLE model, and ultimately present a soil erosion risk map in part of the lands of central Iran.

Materials and Methods

The Revised Soil Loss Equation (RUSLE) model, which estimates annual soil erosion rate and evaluates erosion risk by considering five factors rain erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and percentage (LS), vegetation cover (C) and conservative operations (P) was employed in this study. Across the study area, 100 points were sampled using the cLHS method to calculate the spatial variations of the K factor. Some of the soil properties including soil organic matter, primary particle size distribution, soil structure stability, and saturated hydraulic conductivity were measured in the laboratory to aid in the K factor calculation. Subsequently, the K factor was estimated using three machine learning methods (SVM, Cubist, and RF) and a map of its spatial variations was predicted. R factor estimated using data from five climatic stations located within and outside the watershed. The LS factor derived from a digital elevation model (DEM) with 12.5×12.5 m resolution. The P factor was considered as 1, while the C factor calculated from the NDVI map. Finally, all factors were integrated into the RUSLE model using ArcGIS to estimate the average annual soil loss.

Results and Discussion

The results of the effective factors in soil erosion showed that the western parts of the studied basin have more



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.2025.95566.1502>

rainfall than the eastern part of the region. The value of soil erodibility factor in agricultural lands and also in highlands due to the topographical conditions had higher values than the pastures of the study area. The length and percentage of the slope are other effective factors in the calculation of soil erosion. Moreover, the findings confirmed that the amount of soil erosion increased significantly with the increase of the slope. The vegetation factor exhibited high diversity across the region, with low values in areas of proper vegetation like agricultural lands near the river, and high values in degraded pastures. In the study area, no conservation measures, including cultivation on contour lines, strip cultivation, and traces or implementation of banquets, had been carried out. The soil erosion in the central parts of the study area, which includes plains and lands with topographical changes and low slope, had a lower amount than the high lands on both sides of the watershed. In addition to topography, issues such as the loss of vegetation in pastures due to over-grazing and poor management are the main drivers of soil degradation and high erosion in these areas. Various inappropriate management practices, unprincipled cultivation and tillage, the conversion of pastures to low-yielding rainfed agriculture, and excessive grazing are primary drivers of soil degradation in the study area. Factor K modeling results indicated that the random forest model generally exhibited higher performance compared to Cubist and SVM models in almost all machine learning modeling. In all cases, the combination of all environmental variables, including remote sensing indicators, topographic features, and thematic maps (third scenario), resulted in the highest spatial modeling performance.

The results of the implementation of RUSLE model showed that the soil erosion rate for the study area was 8.27 ton/ha/yr. The erosion risk map was prepared using the RUSLE model for the study area and revealed that the critical parts of soil erosion are located at the northeastern part of the basin, which should be given special attention in the executive operations related to watershed management. According to this map, about half of the study area has very low and low erosion, but about 21% of the study area is in severe and very severe soil erosion classes, which require urgent measures to prevent sediment production in the sub-basin.

Conclusion

In predicting soil erodibility coefficient with DSM method, RF model had better results than Cubist and SVM models. Implementing RUSLE model estimated soil erosion rate of the study area to be 8.27 ton/ha/yr. Soil erosion classes were weak, moderate, severe and very severe with about 33, 20, 26, 18 and 3% respectively. About 21% of the basin was classified as severe and very severe, which require urgent soil conservation measures.

Keywords: Digital soil mapping, Erosion factors, Geographical information system, Spatial changes

استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در برآورد فرسایش خاک با مدل RUSLE در بخشی از اراضی مرکز ایران

محمد سجاده قوامی^۱ - شمس‌الله ایوبی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

فرسایش خاک مهم‌ترین عامل تخریب اراضی در سطح جهان است که استفاده پایدار از منابع خاک جهان را تهدید می‌کند، به‌خصوص در مناطقی که شرایط اقلیمی نیمه‌خشک دارند. فرسایش عامل اصلی تخریب اراضی است. علی‌رغم پیامدهای مهم فرسایش خاک در استفاده پایدار از خاک، اطلاعات محدودی در مورد وضعیت فعلی فرسایش وجود دارد. کمبود این اطلاعات به پیچیدگی فرآیندهای فرسایش مرتبط است که پیش‌بینی فرسایش خاک را هزینه‌بر، وقت‌گیر و دشوار می‌کند. این دشواری منجر به توسعه مدل‌ها و ابزارهای مختلفی شده است که به دنبال ساده‌سازی مدل‌های فرسایش خاک و بهبود درک ما از الگو و فرآیندهای فرسایش خاک هستند. هدف اصلی در این پژوهش مقایسه چند روش یادگیری ماشین (ماشین بردار پشتیبان (SVM)، کوپیس (Cu) و جنگل تصادفی (RF)) برای پیش‌بینی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک و همچنین برآورد تلفات خاک با استفاده از مدل RUSLE می‌باشد. مدل RUSLE برای تخمین نرخ فرسایش سالانه خاک و ارزیابی خطر فرسایش با ترکیب پنج عامل شامل فرسایش‌پذیری باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و درصد شیب (LS)، پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی (P) اجرا می‌شود. در این پژوهش برای محاسبه تغییرات مکانی فاکتور K از نقشه‌های تهیه شده با روش یادگیری ماشین که در سه سناریو (سناریوهای (i) توپوگرافی، (ii) توپوگرافی + سنجش از دور، (iii) همه داده‌ها + نقشه‌های موضوعی) با تعداد ۱۰۰ نقطه نمونه‌برداری شده با روش Conditional Latin Hypercube Sampling (cLHS) استفاده شد. نتایج به‌دست آمده برای پیش‌بینی فاکتور K نشان داد که مدل جنگل تصادفی در سناریو سوم بهترین عملکرد را در بین مدل‌ها و سناریوهای استفاده شده در منطقه مطالعاتی دارد. میانگین فرسایش منطقه مطالعاتی ۸/۲۷ تن در هکتار در سال برآورد شد. نتایج نشان داد که سهم هر یک از کلاس‌های فرسایش در منطقه شامل ناچیز، ضعیف، متوسط، شدید و بسیار شدید به ترتیب حدود ۳۳٪، ۲۰٪، ۲۶٪، ۱۸٪ و ۳٪ بود. حدود ۲۱ درصد حوضه در رده‌های شدید و بسیار شدید قرار گرفت که نیاز به اقدامات فوری برای کارهای حفاظتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اطلاعات جغرافیایی، تغییرات مکانی، عوامل فرسایش، نقشه‌برداری رقمی خاک

مقدمه

کنند، اساسی است (UN, 2011). افزایش فشار بر منابع اراضی به دلیل کشت ناپایدار، چرای بیش از حد دام، جنگل تراشی، تغییرات آب و هوایی و خشک‌سالی، افزایش شهرنشینی و شیوه‌های ضعیف مدیریت اراضی، تخریب اراضی را در مقیاس جهانی بیشتر می‌کند. در این میان، فرسایش خاک یکی از رایج‌ترین شیوه تخریب زمین است که با مدیریت ناپایدار محیطی ارتباط دارد. فرسایش خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شدید است (Katra, 2020). اگرچه فرسایش خاک ممکن

فرسایش خاک مهم‌ترین عامل تخریب اراضی در سطح جهان است که استفاده پایدار از منابع خاک جهان را تهدید می‌کند، به‌خصوص در مناطقی که شرایط اقلیمی نیمه‌خشک دارند فرسایش عامل اصلی تخریب اراضی است (Ravi et al., 2010). در حدود ۴۰ درصد از اراضی جهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که حفظ منابع خاک برای بقای تقریباً ۲ میلیارد نفری که در این مناطق زندگی می

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(*) - نویسنده مسئول: (Email: ayoubi@cc.iut.ac.ir)

است به‌طور طبیعی رخ دهد، اما فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری اراضی، کشاورزی، چرای بیش از حد دام و جنگل‌تراشی عوامل تشدید کننده فرسایش و تخریب خاک شناخته می‌شوند. بنابراین، فرسایش خاک یک چالش طبیعی و انسانی در نظر گرفته می‌شود که منجر به آسیب‌های نامطلوب اجتماعی-اقتصادی و زیست محیطی شدید در بسیاری از جوامع می‌شود (Gayen et al., 2020).

علی‌رغم پیامدهای مهم فرسایش خاک در استفاده پایدار از خاک، اطلاعات محدودی در مورد فرسایش در حال حاضر وجود دارد. کمبود این اطلاعات به پیچیدگی فرآیندهای فرسایش مرتبط است که پیش بینی فرسایش خاک را هزینه‌بر، وقت گیر و دشوار می‌کند (Gholami et al., 2018). این دشواری منجر به توسعه مدل‌ها و ابزارهای مختلفی شده است که به دنبال ساده‌سازی مدل‌های فرسایش خاک و بهبود درک ما از الگو و فرآیندهای فرسایش خاک هستند. چندین مدل برای ارزیابی نرخ هدررفت خاک ایجاد شده است (Gayen et al., 2020). این مدل‌ها به سه گروه: مدل‌های مبتنی بر فرآیند فیزیکی، مدل‌های تجربی و مدل‌های نیمه‌تجربی تقسیم می‌شوند (Pan & Wen, 2014). معادله جهانی تلفات خاک (USLE) توسط بخش کشاورزی ایالات متحده در سال ۱۹۷۸ برای پیش‌بینی میزان خاک فرسایش یافته در طول زمان ایجاد شد (Abdo & Salloum, 2017). مدل USLE یک مدل تجربی است که میانگین بلندمدت فرسایش شیاری و ورقه‌ای را ارزیابی می‌کند (Wischmeier & Smith, 1978). رنارد و همکاران (Renard et al., 1997) نسخه جدیدتری از USLE به نام معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده (RUSLE) را ارائه دادند. مدل RUSLE هم یک مدل تجربی است که با ترکیب RS، GIS و RUSLE برآوردهای فرسایش خاک و توزیع مکانی آن را با هزینه‌های قابل قبول و با دقت بیشتر در مناطق بزرگتر پیش‌بینی می‌کند (Chou, 2010). روش‌های کمی‌سازی تلفات خاک براساس کرت‌های فرسایش دارای محدودیت‌های زیادی از نظر هزینه، نمایندگی نقاط انجام آزمایش از کل منطقه و قابل اطمینان بودن داده‌های بدست آمده می‌باشد. این روش‌ها نمی‌توانند توزیع مکانی فرسایش خاک را به دلیل محدودیت نمونه‌ها در محیط‌های پیچیده فراهم کنند. بنابراین، نقشه برداری از فرسایش خاک در مناطق وسیع اغلب با استفاده از این روش‌های سنتی بسیار دشوار است.

استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پیش‌بینی فرسایش خاک و توزیع مکانی آن را با هزینه‌های قابل قبول و دقت بهتر در مناطق بزرگتر امکان‌پذیر می‌سازد (Wang et al., 2002). مدل RUSLE به دلیل نیاز به داده‌های کم و ساختار ساده مدل، مناسب‌ترین روش برای ارزیابی خطر فرسایش خاک است. این امر به‌ویژه برای اکثر کشورهای در حال توسعه صادق است، به‌صورتی که استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر ممکن است به دلیل نبود داده‌های ورودی کافی محدود شود (Pan & Wen, 2014). برای پیش‌بینی

میانگین تلفات سالانه خاک با استفاده از روش RUSLE، از شش عامل فرسایش‌پذیری باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و درصد شیب (LS)، پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی (P) استفاده شده و این عامل به سادگی در هم ضرب می‌شوند (Wischmeier & Smith, 1978). از میان شش عامل ذکر شده فرسایش‌پذیری خاک (عامل K) و چگونگی پیش‌بینی آن همیشه یک موضوع چالش برانگیز بوده است (Benavidez et al., 2018). نقشه‌برداری فرسایش‌پذیری خاک معمولاً بر روی نقشه‌های گسسته خاک انجام می‌شود که بدون توجه به تغییرپذیری و پیوستگی مکانی ویژگی‌های خاک ورودی صورت می‌گیرد (Iaich et al., 2016). اخیراً، روش‌های نقشه‌برداری رقومی برای در نظر گرفتن تغییرات جانبی پیوسته فرسایش‌پذیری خاک استفاده می‌شوند. نقشه‌برداری رقومی خاک، بیانگر مجموعه‌ای از محاسبات رایانه‌ای برای پیش‌بینی پراکنش خاک‌ها در سیمای سرزمین است (Minasny et al., 2010). در نقشه‌برداری رقومی خاک بین واحدهای نقشه، نقاط مطالعه شده و داده‌های توصیفی و آزمایشگاهی مربوط به آن‌ها یک ارتباط پویا شکل می‌گیرد که امکان تغییر، تبدیل، به روز کردن و تجزیه و تحلیل را به سادگی و با سرعت و دقت زیاد فراهم می‌کند. چنین قابلیت‌هایی می‌تواند علاوه بر حفظ و نگهداری داده‌ها، در بخش‌های مدیریتی و ارزیابی و آمایش سرزمین خدمات قابل توجهی ارائه دهد (Scully et al., 2003). به‌عنوان مثال، تیان و همکاران (Tian et al., 2022) نقشه‌برداری فرسایش‌پذیری خاک را با استفاده از مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی و مدل جنگل تصادفی و همچنین شناسایی متغیرهای محیطی مهم در نقشه‌برداری را برای پیش‌بینی در مقیاس منطقه‌ای انجام دادند. همچنین یو و همکاران (Yu et al., 2023) توزیع مکانی فرسایش‌پذیری خاک را با وضوح بالا (۹۰ متر) در جنوب شرقی تبت با استفاده از یک مدل جنگل تصادفی با متغیرهای محیطی متعدد (سنجش از دور، مشاهدات زمینی (۱۱۴ نقطه نمونه‌برداری)، و مجموعه داده‌های شبکه‌بندی شده) ترسیم نمودند. هدف این مطالعه، پیش‌بینی دقیق و مکانی فرسایش خاک در حوزه آبخیز مندرجان با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عوامل محیطی بر فرسایش‌پذیری خاک است. نوآوری اصلی پژوهش در سه جنبه است: ترکیب داده‌های بلندمدت اقلیمی، خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی با روش‌های یادگیری ماشین برای بهبود دقت فاکتور K، تحلیل اهمیت متغیرها برای تعیین عوامل کلیدی کنترل‌کننده فرسایش خاک و ارائه نقشه‌های شدت فرسایش با وضوح بالا که امکان اولویت‌بندی مناطق آسیب‌پذیر را برای مدیران فراهم می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمای علمی مؤثری برای طراحی و اجرای اقدامات حفاظتی خاک در مناطق مشابه ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

معرفی حوزه آبخیز مورد مطالعه

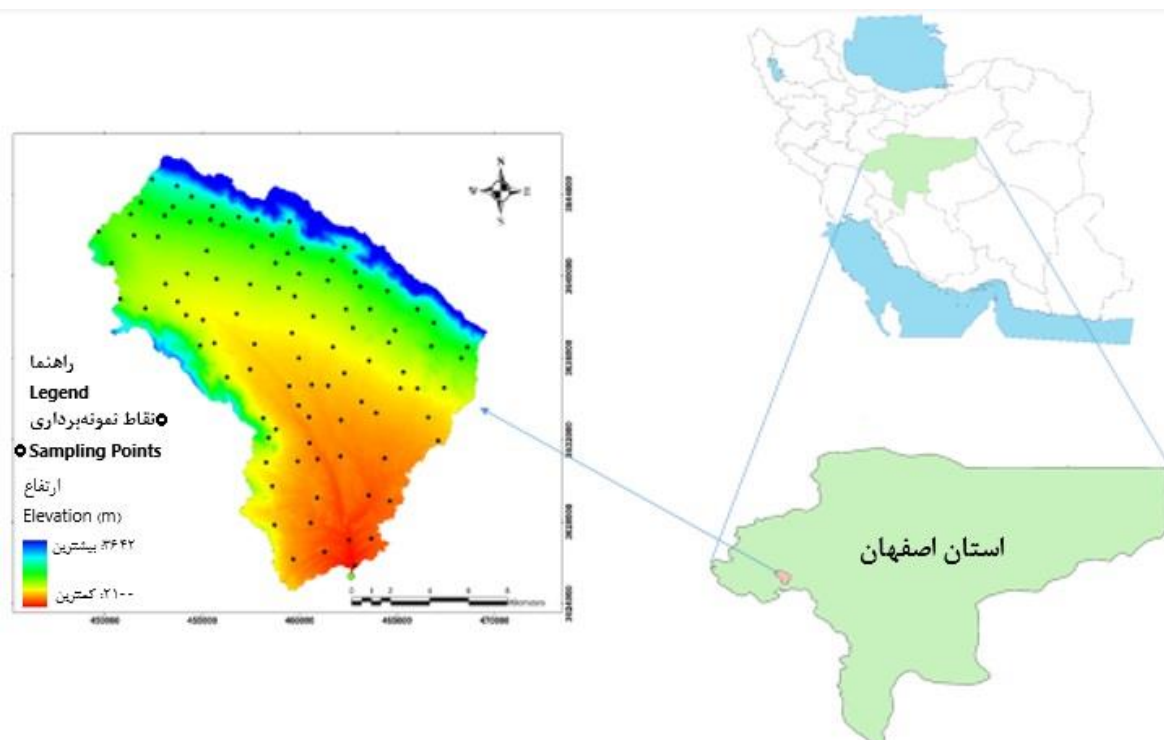
حوزه آبخیز مورد مطالعه در بالادست حوزه سد زاینده‌رود در شهرستان چادگان استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱) که در ۱۲۰ کیلومتری غرب اصفهان و یک کیلومتری غرب شهرستان چادگان و در سمت شمال دریاچه سد زاینده‌رود واقع شده است. وسعت منطقه در حدود ۲۲۴۳۱ هکتار و در غرب اصفهان قرار دارد. قسمت‌های شمالی منطقه توسط کوه‌های داران محدود شده و آبراهه‌های متعددی از این کوه سرچشمه می‌گیرند. ارتفاع حداکثر حوزه آبخیز کوه داران ۳۶۴۲ و ارتفاع حداقل ۲۱۰۰ متر در نقطه خروجی حوزه آبخیز در محل روستای مندرجان می‌باشد و متوسط ارتفاع حوضه ۲۴۳۰ متر از سطح دریا برآورد شده است. شیب متوسط منطقه مطالعاتی در حدود ۱۳/۳ درصد محاسبه که به‌صورت شمالی- جنوبی است. رژیم رطوبتی منطقه مزیک و رژیم حرارتی زیریک است. منطقه مطالعاتی از نظر تقسیمات تکتونیکی جزو زون سندج- سیرجان محسوب می‌شود و روند کلی آن همانند زون زاگرس شمال غربی- جنوب شرقی است. از لحاظ پوشش گیاهی منطقه از مرتع، باغات، کشاورزی آبی و کشاورزی دیم تشکیل شده است. حوزه آبخیز دارای آب و هوای نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد است. میانگین

بارش سالانه منطقه ۳۸۰ میلی‌متر برآورد شده است. متوسط دمای ماهیانه در تیر ماه بیش‌ترین مقدار و برابر ۲۲/۴ درجه سانتی‌گراد و همچنین میانگین دمای ماهیانه دی ماه کم‌ترین مقدار و برابر ۴/۶۴ درجه سانتی‌گراد است. تعرق واقعی سالیانه در حوضه ۱۰۶۱ میلی‌متر است.

مدل RUSLE

در مطالعه حاضر برای محاسبه تلفات سالانه خاک در حوزه آبخیز مورد مطالعه از مدل RUSLE که یک مدل تجربی پیش‌بینی‌کننده فرسایش خاک است استفاده شد. مدل RUSLE گسترده‌ترین روش فرسایش خاک برای پیش‌بینی میانگین تلفات سالانه خاک است که از طریق محاسبه پارامترهای فرسایشی خاک صورت می‌گیرد. این مدل شکل تجدید نظر شده از مدل USLE (Wischmeier & Smith, 1978) است که برای چندین دهه به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. RUSLE میانگین تلفات سالانه خاک را بر حسب تن در هکتار در سال بر اساس پنج پارامتر ذکر شده در معادله ۱ محاسبه می‌کند:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری، استان اصفهان، مرکز ایران

Figure 1- Location of the study area and soil sampling points, Isfahan Province, central Iran

پوشش گیاهی می‌تواند بر میزان رواناب تشکیل شده و خطر فرسایش آبی تأثیر بگذارد. پوشش گیاهی زمانی در برابر فرسایش مؤثر است که انرژی جنبشی قطرات باران را جذب کرده و از خاک به‌ویژه در زمانی از سال که بیش‌ترین میزان بارش است محافظت کند. میزان فاکتور C از صفر تا ۱ متغیر است. هنگامی که پوشش گیاهی متراکم است به صفر و زمانی که پوشش گیاهی ضعیف است به ۱ نزدیک می‌شود. فاکتور C در اوایل به‌عنوان نسبت از دست دادن خاک از زمین کشت شده در شرایط خاص به تلفات مربوطه به زمین‌هایی که همواره آیش هستند بیان می‌شد (Wischmeier & Smith, 1978). در حال حاضر به‌دلیل کاربرد مدل‌های فرسایشی در مقیاس بزرگ، از مجموعه داده‌های سنجش از دور برای ارزیابی فاکتور C استفاده می‌شود (Prasannakumar et al., 2012). چندین شاخص برای محاسبه پوشش گیاهی استفاده می‌شود که بیش‌ترین شاخص مربوط به NDVI است. در این پژوهش تصاویر Landsat 7 & 8 از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ از وب سایت <https://glovis.usgs.gov> دانلود شد. سپس وارد نرم افزار Envi ورژن ۵/۳ نموده و در گام اول ابتدا خطاهای رادیومتریک و اتمسفری منطقه را برطرف و در گام دوم پردازش تصاویر ابتدا برای بهبود تصاویر باندها از روش Fusion استفاده شد و سپس به طبقه‌بندی تصاویر به‌صورت نظارت شده با روش Roi اقدام کرده و با استفاده از نقشه‌های قدیمی پوشش گیاهی موجود در منابع طبیعی و آب‌خیزداری استان اصفهان و بازدید میدانی نقشه پوشش گیاهی ترسیم شد و با استفاده از معادله ۶ که توسط لین و همکاران (Lin et al., 2002) ارائه شد، عامل C محاسبه گردید.

$$C = (-NDVI+1)/2 \quad (۶)$$

عامل عملیات حفاظتی (P)

فاکتور عملیات حفاظتی (P) منعکس‌کننده اقداماتی است که برای کاهش مقدار و سرعت رواناب و کنترل فرسایش خاک انجام می‌شود. عامل P ابتدا بر اساس جهت کشت تعیین می‌شود. اگر کشت در جهت شیب باشد، P-factor برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. در صورت کشت خلاف شیب (کانتوری)، تأثیر آن تابعی از درجه شیب و طول شیب بحرانی است (معادله ۷):

$$SL_{crit} = 170 \times e^{-0.13 \times \text{Slope}(\%)} \quad (۷)$$

که در معادله ۷ SL_{crit} طول شیب بحرانی و $\text{Slope}(\%)$ درصد درجه شیب می‌باشد.

اما در مناطقی که طول شیب از این مقدار بحرانی تجاوز نکند، عامل P بر اساس فرمول استاندارد ۸ محاسبه می‌شود و در غیر این صورت، مقدار آن ۱ در نظر گرفته می‌شود (Schäuble, 2005).

$$P = 0.4 + 0.02 \times \text{Slope}(\%) \quad (۸)$$

به گفته مک‌کول و همکاران (McCool et al., 1995)، ضریب P

که در آن A میانگین تلفات سالانه خاک، R پارامتر فرساینده‌گی باران، K نشان‌دهنده پارامتر فرسایش‌پذیری خاک، L پارامتر طول شیب، S درصد شیب، C نشان‌دهنده عامل پوشش گیاهی، P نشان‌دهنده عملیات حفاظتی است. نرخ فرسایش خاک یک منطقه مربوط به تعامل بین آب و هوا، توپوگرافی، خاک و کاربری اراضی است.

عامل فرساینده‌گی باران (R)

عامل R منعکس‌کننده اثرات قطرات باران بر فرسایش خاک است و نشان‌دهنده تعامل انرژی بین بارش و ذرات خاک است. بر اساس داده‌های موجود برای منطقه مورد مطالعه، مدل رنارد و فریموند (Renard & Freimund, 1994) برای برآورد ضریب R انتخاب شد. این مدل بر اساس شاخص فورنیه اصلاح شده محاسبه می‌شود که میانگین بارندگی ماهانه و سالانه را در نظر می‌گیرد. برای تعیین میانگین سالانه ضریب R از داده‌های ماهانه پنج ایستگاه هواشناسی زاینده‌رود، اسکندری، قلعه شاهرخ، داران و چادگان برای یک دوره ۳۰ ساله (۱۳۶۸-۱۳۹۷) استفاده شد. شاخص فورنیه اصلاح شده که بارندگی ماهانه و سالانه را در نظر می‌گیرد، طبق معادله ۲ محاسبه می‌شود:

$$F = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^{2.2}}{P} \quad (۲)$$

که در آن F شاخص فورنیه اصلاح شده، P_i میانگین بارندگی ماهانه (mm) و P میانگین بارندگی سالانه (mm) است. به گفته رنارد و فریموند (Renard & Freimund, 1994)، رابطه بین شاخص فورنیه اصلاح شده و عامل R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$) در معادلات ۳ و ۴ تعریف می‌شود:

$$R = 0.07397 \times F^{1.847}, F < 55 \text{ mm} \quad (۳)$$

$$R = (95.77 - 6.081 \times F + 0.477 \times F^2), F \geq 55 \text{ mm} \quad (۴)$$

عامل طول و درصد شیب (LS)

عامل LS تأثیر توپوگرافی بر فرسایش را توصیف می‌کند که مستقیماً متناسب با طول و درصد شیب است. اثرات توپوگرافی بر فرسایش با استفاده از پارامتر LS، که حاصل ضرب طول شیب (L) و درصد شیب (S) است، ارزیابی می‌شود. در این مطالعه مدل رقومی ارتفاعی با وضوح $12/5 \times 12/5$ متر از ماهواره ALOS/PALSAR از وب سایت آلاسکا دریافت و در نرم‌افزار SAGA GIS محاسبه شد. ضریب LS با معادله ۵ محاسبه گردید (Moore & Burch, 1986).

$$LS = \left(\frac{A}{22.13} \right)^{0.6} \times \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (۵)$$

که در رابطه ۵ A اندازه سلول‌های شبکه که در این پژوهش $12/5$ متر است و θ زاویه شیب بر حسب درجه می‌باشد.

عامل پوشش گیاهی (C)

مواد آلی و نفوذپذیری برآورد می‌شود. ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K) نشان‌دهنده‌ی میزان تلفات خاک به ازای واحد شاخص فرسایش‌پذیری (R) تحت شرایط استاندارد است. این عامل بیانگر حساسیت ذاتی خاک نسبت به فرآیندهای جداشدن و انتقال ذرات در اثر نیروی باران و رواناب می‌باشد. در فرمول جهانی هدررفت خاک، برای تعیین K از مشخصه‌های نمودگراف ویشمایر شامل درصد سیلت به اضافه شن خیلی‌ریز، درصد شن، درصد ماده‌آلی، ساختمان خاک و قابلیت نفوذ آب در خاک استفاده می‌شود (Refahi, 2015). چگونگی محاسبه K بر مبنای رابطه ۹ است:

$$K = (2.8 \times 10^{-5} \times (12 - OM) \times M^{1.14} + 4.3 \times 10^{-1} \times (S - 2) + 3.3 \times 10^{-1} \times (P - 3)) / 100 \quad (9)$$

که در فرمول OM درصد ماده‌آلی خاک، M حاصل‌ضرب درصد سیلت اصلاح شده در درصد سیلت به اضافه درصد شن اصلاح شده، S و P به ترتیب کلاس‌های ساختمان و نفوذپذیری خاک هستند. در این مطالعه از سه روش یادگیری ماشین برای تهیه نقشه فرسایش‌پذیری خاک استفاد شد. تمامی فرآیندهای انتخاب ویژگی‌ها و مدل‌سازی با استفاده از بسته‌های «caret» و «caretEnsemble» در محیط R نسخه ۳/۵/۲ تکمیل شدند. بررسی‌های آماری نیز در محیط R با به‌کارگیری بسته «corrplot» انجام پذیرفت.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین

طیف وسیعی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در نقشه‌برداری رقومی خاک برای به‌دست آوردن روابط مکانی موجود بین ویژگی‌های خاک و متغیرهای محیطی موجود است. بسیاری از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی برخی از ویژگی‌های خاک ارزیابی شده است، مانند: کیوبیست، شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون خطی چندگانه، نزدیکترین همسایگان، رگرسیون حداقل مربعات جزئی، رگرسیون لجستیک چند جمله‌ای، کریجینگ رگرسیون و جنگل تصادفی، رگرسیون جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم‌های ژنتیک (Naimi et al., 2021).

در این پژوهش از سه الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)، کیوبیست و جنگل تصادفی (RF) که محبوب‌ترین الگوریتم‌های ML برای نقشه‌برداری رقومی خاک هستند، استفاده شد. هر الگوریتمی می‌تواند برهمکنش‌های پیچیده بین فرسایش‌پذیری خاک منطقه مورد مطالعه و متغیرهای کمکی را تشخیص دهد. توضیح خلاصه‌ای از الگوریتم‌های ML به کار رفته در این تحقیق به شرح زیر است.

عمدتاً نشان‌دهنده چگونگی تأثیر شرایط سطح زمین بر مسیرهای جریان و هیدرولیک جریان است. کشت بر روی خطوط تراز، کشت نواری و تراس‌بندی از مؤثرترین شیوه‌های حفاظت خاک هستند. مقدار P کمتر یا مساوی ۱ هستند. مقدار ۱ به مناطقی اختصاص داده می‌شود که هیچ یک از روش‌های ذکر شده بر آن اعمال نشده است.

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

نمونه‌برداری از خاک، آنالیزهای آزمایشگاهی و تعیین عامل

K

در مجموع ۱۰۰ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) در اوایل مهر ۱۴۰۰ با استفاده از روش نمونه‌برداری Conditional Latin Hypercube Sampling (cLHS) جمع‌آوری شد (Minasny & McBratney, 2006)، که بر اساس طیف گسترده‌ای از متغیرهای کمکی محیطی (شاخص‌های سنجش از دور، ویژگی‌های توپوگرافی، نقشه‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی) انجام گرفت (شکل ۱). الگوریتم cLHS توسط بسته cLHS در نرم‌افزار آماری R نسخه ۳/۵/۲ انجام شد. در هر نقطه نمونه‌برداری، پنج نمونه خاک سطحی صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از گوشه‌ها و مرکز یک مربع ۱×۱ متر جمع‌آوری شد و کاملاً مخلوط گردید تا نوعی نمونه مرکب ساخته شود. همه این نمونه‌ها در دمای اتاق هوا خشک و سپس ناخالصی‌هایی مانند سنگریزه و لاشبرگ جدا شده و از الک ۲ میلی‌متری برای آنالیزهای آزمایشگاهی عبور داده شدند. در آزمایشگاه، توزیع اندازه ذرات اولیه خاک با روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (Bouyoucos, 1962). محتوای موادآلی خاک (SOM) با روش اکسیداسیون مرطوب پیشنهاد شده توسط نلسون و سامرز (Nelson & Sommer, 1982) اندازه‌گیری شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) با روش بار ثابت بر روی نمونه‌های دست نخورده که از سطح خاک و با استوانه‌های فولادی ضد زنگ (قطر داخلی ۴/۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۵/۳ سانتی‌متر) تهیه گردید و برای تخمین نفوذپذیری خاک اندازه‌گیری شد (Klute, 1986).

عامل فرسایش‌پذیری خاک میزان حساسیت خاک نسبت به عوامل فرساینده را بیان می‌کند. این شاخص به ویژگی‌های خاک و حساسیت طبیعی آن نسبت به عامل فرسایش بستگی دارد. از نظر کمی، فرسایش‌پذیری خاک بیانگر مقدار متوسط تلفات خاک به ازای واحد شاخص فرسایش‌پذیری است. اما در مجموع بیان فاکتور فرسایش‌پذیری خاک مفهومی پیچیده است که به ویژگی‌های خاک که در فرسایش‌پذیری مؤثر هستند مانند: ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و هیدرولوژیک بستگی دارد (Bagarello et al., 2009).

فرسایش‌پذیری خاک بیانگر میزان حساسیت خاک نسبت به فرسایش است و ضریب فرسایش‌پذیری (K) معمولاً بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، به‌ویژه بافت، ساختمان، درصد

الف- ماشین‌های بردار پشتیبانی^۱

این روش توسط وپنیک (Vapnik, 1998) پیشنهاد گردید که یک تکنیک یادگیری نظارت شده محبوب برای طبقه‌بندی و رگرسیون است که می‌تواند به الگوهای غیرخطی با استفاده از توابع مرکزی تعمیم داده شود. مدل ماشین‌های بردار پشتیبانی داده‌ها را با کمک توابع مرکزی در مکانی فراتر از مکان جدید پروژه نشان می‌دهد. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، هایپرپلان بهینه را در فرامکانی جدید برای تمایز طبقات ایجاد می‌کند، در حالی که ماشین بردار پشتیبان متغیر هدف را با حداقل ریسک تجربی تخمین می‌زند.

ب- روش کیوبیست^۲

کیوبیست الگوریتم رگرسیون درختی پیشرفته است که ساختارهای مختلفی از داده‌های آموزشی را ارائه می‌دهد. قوانین مدل توسط الگوریتم کیوبیست بر مبنای روند کاهشی اهمیت، رتبه‌بندی می‌شوند. به این معنا که قانون اول بالاترین و آخرین قانون پایین‌ترین دخالت را در دقت پیش‌بینی مدل دارد. تعداد قوانین بر مبنای مدل رگرسیون بهترین برازش تعیین می‌گردد. بسته کیوبیست درصد شرکت متغیرها را بر مبنای اهمیت بیان می‌کند و متغیر هدف را بر مبنای متغیرهای مؤثر تخمین می‌زند (Holmes et al., 1999).

ج- جنگل تصادفی^۳

جنگل تصادفی (RF) یک روش یادگیری گروهی است که توسط برایمن (Breiman, 2001) ارائه گردید. از ویژگی بارز مدل جنگل تصادفی عملکرد بالای آن‌ها برای اندازه‌گیری اهمیت متغیرها است که نقش هر متغیر را در پیش‌بینی مشخص می‌کند. این تکنیک دارای پارامترهای mtry و ntree است که به ترتیب تعداد متغیرهای استفاده شده در هر درخت بیانگر قدرت هر درخت مستقل و تعداد درخت‌هایی است که کاربر مدل می‌تواند تعیین و تغییر دهد. مدل‌سازی با روش جنگل تصادفی در ابتدا بر روی داده‌های آموزشی و سپس روی داده‌های اعتبارسنجی صورت می‌گیرد و در نهایت مدلی با کم‌ترین خطای نمونه های خارجی از سبد (OOB) انتخاب می‌گردد. برعکس سایر مدل‌های درختی که تعداد کمی درخت ترسیم می‌کنند، جنگل تصادفی صدها یا هزاران درخت تصمیم را تولید می‌کند (Breiman, 2001). این تکنیک به عنوان یکی از کارآمدترین تکنیک‌های یادگیری در نظر گرفته می‌شود و دسته‌بندی دقیق را برای بسیاری از مجموعه‌های داده ارائه می‌دهد. ویژگی مثبت این دسته‌بندی این است که روی مجموعه داده‌های گسترده به خوبی کار می‌کند. در پژوهش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک، روش جنگل تصادفی به صورت گسترده‌ای برای پیش‌بینی ویژگی‌های

خاک بکار رفته گرفته شده است (Grimm et al., 2008).

جمع‌آوری داده‌های کمکی

در این پژوهش، متغیرهای کمکی شامل داده‌های سنجش از دور، متغیرهای کمکی توپوگرافی حاصل از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، برخی داده‌های طبقه‌بندی شده (کاربری اراضی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی)، به عنوان متغیرهای کمکی پیش‌بینی‌کننده برای فرآیندهای مدل‌سازی مرتبط پیاده‌سازی شدند.

سنجش از دور تکنیکی است که در سال‌های اخیر گسترش فراوانی یافته و کاربرد آن در بررسی منابع زمینی رشد قابل توجهی داشته است. در بحث‌های مربوط به منابع زمینی، سنجش از دور به معنای بکارگیری عکس‌های هوایی و تصاویر تهیه شده از اطلاعات ماهواره‌ای و هواپیمایی برای تفسیر، شناسایی و کسب اطلاعات از پدیده‌های زمین است. در مقایسه با روش‌های نقشه‌برداری معمولی و سنتی خاک استفاده از داده‌های سنجش از دور باعث کاهش نمونه‌برداری در پژوهش‌های صحرایی و در نتیجه صرفه‌جویی در مقدار هزینه‌ها و کاهش زمان مورد نیاز برای پژوهش و افزایش دقت و سرعت می‌شود. برای استفاده از شاخص‌های سنجش از دور (باند‌های لندست -B2، B7)، شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI)، شاخص گیاهی ارتقا یافته (EVI)، شاخص گیاهی تبدیل شده (TVI)، شاخص گیاهی تغییر شکل یافته اصلاح شده (CTVI)، شاخص گیاهی سازگار با خاک (SAVI)، شاخص کربنات (CI)) تصویر ماهواره لندست ۸ با کمتر از ۱۰ درصد پوشش ابر در مهر ماه ۱۴۰۰، مصادف با تاریخ نمونه‌برداری از خاک از وبسایت USGS دانلود شد. SAGA GIS برای استخراج برخی از متغیرهای محیطی شرح داده شده پیاده‌سازی شد.

مدل رقومی ارتفاع نمایش عددی و رستری پیوسته‌ای از توپوگرافی سطح زمین است. مدل رقومی ارتفاع پایه‌ی اصلی بسیاری از تحلیل‌های مکانی است و اطلاعات مهمی برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک، هیدرولوژی و ژئومورفولوژی ارائه می‌دهد. دقت DEM به عواملی مانند دقت مکانی پیکسل‌ها، روش میان‌یابی، ساختار داده، تراکم و دقت نقاط ارتفاعی و پیچیدگی توپوگرافی وابسته است. در این مطالعه، DEM با تفکیک ۳۰ متر از پایگاه Aster GDEM تهیه و پارامترهای مانند ارتفاع، شیب، جهت شیب، تپه‌سازی تحلیلی، سطح پایه شبکه کانال، انحنا، مقطعی، شاخص موقعیت توپوگرافی، مساحت حوزه آبخیز، تجمع جریان، فاکتور LS، موقعیت شیب نسبی، شاخص همواری بالا، آمِدگی با درجه تفکیک بالا، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا، انحنا سطح، انحنا نیم‌رخ، انحنا کل، انحنا طولی، شاخص همگرایی، شاخص خیزی توپوگرافی، عمق دره، فاصله عمودی تا شبکه

3- Random forest

1- Support vector machine

2- Cubist

را نشان دهند، مدل دارای دقت اعتبار بیشتری است و هر چه مقادیر به صفر نزدیکتر باشد دقت بالاتر است (Matinfar et al., 2021). ریشه میانگین مربعات خطا نشان‌دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده چقدر به مقادیر مشاهده شده نزدیک هستند. ضریب تعیین بالاتر منعکس‌کننده این است که مدل عملکرد بهتر و برآورد دقیق‌تری با خطای کمتر نسبت به مدل‌های دیگر دارد و نسبت واریانس در متغیر هدف را نشان می‌دهد (Naimi et al., 2021).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(X_i) - Z(X_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(X_i) - \bar{Z}(X))^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [Z(X_i) - Z^*(X_i)]^2}{N} \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [|Z(X_i) - Z^*(X_i)|] \quad (12)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Z}(X)} \times 100 \quad (13)$$

که در معادلات بالا $Z^*(X_i)$ و $Z(X_i)$ به ترتیب مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده هستند، N تعداد اندازه‌گیری‌ها، $Z(X)$ میانگین مقادیر مشاهده شده است (Naimi et al., 2021).

نقشه شدت فرسایش خاک

برای شناسایی منطقه مطالعاتی از نظر شدت فرسایش خاک و تعیین مکان‌های با اولویت بالا برای حفاظت از خاک، حوزه آبخیز مطالعاتی در پنج کلاس مختلف شدت فرسایش خاک: فرسایش ناچیز (کمتر از ۰/۵ تن در هکتار در سال)، فرسایش ضعیف (۰/۵-۳ تن در هکتار در سال)، فرسایش شدید (۳-۱۲ تن در هکتار در سال)، فرسایش شدید (۱۲-۵۰ تن در هکتار در سال) و فرسایش بسیار شدید (بیشتر از ۵۰ تن در هکتار در سال) طبقه‌بندی شدند (EUROSTAT, 2017) و در نهایت الگوی مکانی شدت از دست دادن خاک برای برنامه‌ریزی حفاظتی و تصمیم‌گیری پیشنهاد شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی ویژگی‌های خاک و فرسایش‌پذیری خاک

در جدول ۱ نتایج آنالیزهای برخی ویژگی‌های خاک و فرسایش‌پذیری خاک گزارش شده است. با توجه به بافت خاک منطقه مطالعاتی، میانگین درصد رس، سیلت و شن به ترتیب ۳۱/۲، ۵۱/۴ و ۱۷/۴ است. همچنین ماده‌آلی خاک بین ۰/۳۵ تا ۳/۲۵ درصد متغیر بود که کمترین مقدار را خاک‌های نزدیک به اراضی بدون پوشش گیاهی و بیشترین مقدار مربوط به مناطق کشاورزی بود. همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) با ضریب تغییرات ۸۳ درصد بیش‌ترین میزان تغییرات را در منطقه مطالعاتی نشان داد Ks از ۶ تا ۳۰۶ میلی‌متر در ساعت متغیر بود که بالاترین Ks در مرکز منطقه مطالعاتی که بیش‌تر در این قسمت‌ها کشاورزی آبی و دیم با روش‌های خاک‌ورزی فشرده انجام می‌شد، مشاهده شد. خواص هیدرولیکی خاک تحت تأثیر عوامل زیادی

کانال آب با استفاده از نرم‌افزار SAGA استخراج شد. همچنین نقشه‌های کاربری اراضی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی به عنوان متغیرهای کمکی در طبقه‌بندی استفاده شدند. از آنجاکه برخی متغیرهای کیفی یا طبقه‌ای هستند، با تبدیل آن‌ها به متغیرهای ساختگی امکان استفاده در مدل‌های آماری که ورودی عددی نیاز دارند فراهم شد.

در مطالعات گذشته از متغیرهای کمکی گوناگونی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی فاکتور K استفاده شده است که این متغیر کمکی شامل شاخص‌های توپوگرافی و سنجش از دور و حتی نقشه‌های کمکی مانند کاربری اراضی و زمین‌شناسی بوده است در این پژوهش از سه سناریو برای تعیین قابلیت داده‌های سنجش از دور، ویژگی‌های توپوگرافی و داده‌های طبقه‌بندی شده برای پیش‌بینی عامل K، مورد استفاده قرار گرفت تا اهمیت داده‌های کمکی متنوع مشخص شود و بهترین سناریو در ترکیب این متغیرها ارائه گردد.

سناریو (i) استفاده از متغیرهای توپوگرافیکی به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع (DEM)،

سناریو (ii) استفاده از تمام پارامترهای سناریو (i) + داده‌ها و شاخص‌های سنجش از دور،

سناریو (iii) استفاده از تمام پارامترهای سناریو (ii) + نقشه‌های

موضوعی شامل نقشه کاربری اراضی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی. عامل تورم واریانس (VIF) برای هر متغیر مورد بررسی قرار گرفت تا آثار هم‌خطی چندگانه در هر مدل Multiple Linear (MLR) Regression) شناسایی شود و متغیرهایی با VIF بیش‌تر از ۱۰ از مجموعه داده حذف شدند (Guo et al., 2020). در مرحله بعد از رویکرد بوروتا برای انتخاب مهم‌ترین متغیرها برای پیش‌بینی متغیرهای مورد نظر استفاده شد. روابط مختلف بین متغیرهای کمکی و مشاهدات خاک منجر به کشف الگوهای مختلف خاک می‌شود. در یادگیری ماشین، هیچ فرض صریحی در مورد شکل عملکردی رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته وجود ندارد. در مقابل، مدل‌های یادگیری ماشین به دنبال پیش‌بینی شکلی از رابطه هستند که الگوهای موجود در داده‌ها را بر اساس برخی شاخص‌ها به بهترین شکل و با دقت و صحت زیاد شناسایی و توصیف کند (Wadoux et al., 2020).

ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های SVM، Cu و RF از آماره های ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربع خطای نرمال شده و میانگین قدرمطلق خطا (معادلات ۱۰-۱۳) استفاده شد. برای اعتبار سنجی، ۸۰ درصد نمونه‌ها (n=۸۰) به صورت تصادفی و یکنواخت به عنوان مجموعه آموزشی انتخاب شدند و ۲۰ درصد نمونه های باقی مانده (n=۲۰) به عنوان مجموعه آزمون استفاده شد. هرچه ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدرمطلق خطا مقدار کوچکتری

از جمله بافت، ساختمان، چگالی ظاهری و محتوای کربن آلی خاک است. کاربری اراضی و مدیریت خاک می‌تواند با تغییر این ویژگی‌ها بر هدایت هیدرولیکی خاک تأثیر بگذارد (Zhou et al., 2008). کمترین میزان فرسایش‌پذیری خاک ($0.02 \text{ ton.ha.h/ha.MJ.mm}$) در قسمت‌های جنوب شرقی به سمت بخش‌های مرکزی منطقه مشاهده شد. قسمت‌های جنوبی منطقه که بیشتر اراضی مرتع و بدون پوشش را تشکیل می‌دهند، دارای بالاترین میزان K (ton.ha.h/ha.MJ.mm) هستند. فرسایش‌پذیری خاک منطقه مطالعاتی بدلیل چرای بی‌رویه دام، مقدار متوسط تا زیاد را نشان داد. با افزایش چرای کنترل نشده دام، ساختمان خاک تخریب یافته و باعث می‌شود خاک‌های مراتع بیشتر مستعد فرسایش باشند. ایوبی و همکاران (Ayoubi et al., 2014) گزارش کردند که چرای بی‌رویه مهم‌ترین عاملی است که منجر به کاهش کربن آلی خاک در مراتع با اقلیم‌های نیمه‌خشک مانند کشور ایران می‌شود. بنابراین، تخریب ویژگی‌های خاک از طریق فشار بیش از حد و چرای بیش از حد دام، نقش اصلی بر میزان حساسیت خاک به فرسایش آبی را در اکوسیستم نیمه‌خشک دارد (Madenoglu et al., 2020).

پارامترهای مدل RUSLE

شدت و مدت بارندگی از مهم‌ترین پارامترهای بارندگی هستند. میزان بارندگی ۳۰ سال گذشته در حوزه آبخیز مورد مطالعه از ۱۰۲ میلی‌متر در سال در سال ۱۳۸۸ در ایستگاه سد زاینده‌رود تا ۶۳۰ میلی

متر در سال در سال ۱۳۷۳ در ایستگاه قلعه شاهرخ متغیر بود. میزان بارش‌ها در بخش غربی حوضه بیشتر مقدار و هرچه به سمت شرق حرکت کنیم میزان آن کاهش پیدا می‌کند. ضریب R محاسبه شده از $53/7$ تا $116/2$ (MJ.mm/ha.h.yr) با مقدار متوسط $82/3$ (MJ.mm/ha.h.yr) متغیر بود (شکل ۲ الف). بنابراین، ضریب R تنوع بالایی را در حوزه آبخیز مطالعاتی نشان داد. توزیع مکانی فاکتور R در شمال غرب و بخش میانی منطقه مطالعاتی مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد و قسمت‌های شرقی حوزه آبخیز میزان بارندگی کمتری را دارد. این روند بیشتر به توزیع مکانی میانگین بارندگی بستگی دارد. از این رو، تغییرات مکانی و زمانی در از دست دادن خاک به تغییرات فاکتور R وابسته است (Shin et al., 2019).

مناطق با شیب‌های تند نرخ فرسایش خاک بسیار بالاتری نسبت به مناطق با شیب ملایم دارند. نتایج نشان می‌دهد که میانگین شیب حوزه آبخیز ۸ درجه بوده و از ۰ تا $45/4$ درجه شیب متغیر است (شکل ۲ ب)، که منطقه دارای تنوع زیادی از لحاظ توپوگرافی می‌باشد. بیش از ۳۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در شیب‌های بالاتر از ۸ درجه است و این شیب‌ها میزان فرسایش را افزایش می‌دهد. نرخ توزیع تلفات خاک به صورت خطی با افزایش شیب در سراسر حوضه افزایش می‌یابد. حوزه آبخیزهای با شیب بالاتر از ۳۰ درصد، نرخ تلفات خاک منطقه بین ۴۰ تا ۹۰ تن در هکتار در سال را دارد. این موضوع نشان‌دهنده این است که شیب نقش مهمی در افزایش فرسایش خاک دارد.

جدول ۱- توصیف برخی از ویژگی‌های خاک و عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) در حوزه آبخیز مورد مطالعه ($N=100$)

Table 1- Description of some soil properties and soil erodibility factor (K) in the studied watershed ($N=100$)

Variable	Unit	Min	Max	Mean	SD	CV (%)	Skewness	Kurtosis
ویژگی	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشییدگی
رس Clay	%	17	45	31.20	6.10	20	-0.34	-0.13
سیلت Silt	%	36	73	51.40	6.41	12	-0.09	0.98
شن Sand	%	4.50	47	17.40	9.64	55	1.11	0.77
ماده آلی خاک Soil organic matter	%	0.35	3.25	0.89	0.50	56	2.48	7.93
هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated hydraulic conductivity	(mm/h)	6	306	66.70	55.40	83	2.08	4.93
فاکتور K K-factor	(ton.ha.h/ha.MJ.mm)	0.02	0.07	0.04	0.007	19	1.16	4.59

دارند باید در اولویت اقدامات حفاظتی و آبخیزداری قرار گیرند. ضریب LS با افزایش طول و درصد شیب در بوجود آمدن جریان‌های متمرکز رواناب تأثیرگذار است. با افزایش طول شیب، میزان رواناب و غلظت

با انجام کارهای حفاظتی در حوزه آبخیزهای میزان طول شیب کاهش پیدا نموده و به طبع آن میزان فرسایش خاک کاهش پیدا می‌کند. در گام نخست مناطقی که کلاس‌های شیب بالا را در حوزه آبخیز

از ماهیت مدل‌های مبتنی بر درخت تصمیم است، این مدل‌ها ذاتاً توانایی بالایی در مدیریت روابط غیرخطی پیچیده و تعاملات چندگانه بین ویژگی‌های ورودی و متغیر هدف دارند که در پارامترهای محیطی مانند K غالب است، در حالی که مدل‌های مبتنی بر توابع کرنل مانند (SVM) یا مدل‌های مبتنی بر قوانین مانند (Cubist) در تعمیم دادن به داده‌های چند بعدی و ناهمگن با چالش بیشتری مواجه می‌شوند، این برتری به‌طور کمی با بهترین نتایج ضریب تعیین ($R^2=0.317$) و پایین‌ترین خطاهای مطلق ($MAE=0.0042$) در میان تمام مدل‌های آزمایش شده تأیید کننده این موضوع است. ضریب K از 0.28 تا 0.52 (ton.ha.h/ha.MJ.mm) در سناریو سوم مدل جنگل تصادفی متغیر بود (شکل ۲ ت)). بیش‌ترین مقدار فرسایش‌پذیری خاک در مرکز منطقه مطالعاتی که کشت آبی انجام می‌شود، مشاهده گردید. در مناطقی که کشاورزی صورت می‌گیرد تردد ماشین‌آلات کشاورزی باعث کاهش نفوذپذیری خاک و شخم زیاد منجر به تخریب ساختمان خاک می‌شود. همچنین میزان ماده‌آلی خاک به دلیل فشار بیش از حد و کشت هر ساله در زمین‌های کشاورزی کاهش می‌یابد که مجموع این موارد فرسایش‌پذیری خاک در مناطق مرتعی کم‌ترین مقدار را داشت. چلیک (Celik, 2005) بیان کرد که با کاهش ماده‌آلی خاک، پایداری خاکدانه‌های در حالت مرطوب، نفوذپذیری و تخریب خاک در هنگام تغییر کاربری از مرتع یا جنگل به زمین‌های کشاورزی، فرسایش‌پذیری خاک به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. مقدار بیشتر فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در زمین‌هایی که زیر کشت هستند و عمدتاً خاک‌ورزی فشرده در آن‌ها انجام می‌شود اتفاق می‌افتد. سینگ و خرا (Singh & Khara, 2009) گزارش کردند که فرسایش‌پذیری خاک به‌ترتیب در زمین‌های کشاورزی < زمین بایر < مرتع < جنگل بیش‌ترین به کم‌ترین مقدار است.

جنگل تصادفی می‌تواند با ادغام مقدار زیادی از داده‌های محیطی، اطلاعات دقیقی در مورد فاکتور K در طیف وسیعی ایجاد کند. تنگ و همکاران (Teng HongFen et al., 2019) به این نتیجه رسیدند که در مقایسه با کریجینگ معمولی، مدل جنگل تصادفی نه تنها خطا و جهت‌گیری احتمالی را کاهش می‌دهد، بلکه وضوح مکانی دقیق‌تر (۹۰ متر) و نتایج پیش‌بینی توزیع مکانی قابل اعتمادتری را تولید می‌کند. از نقاط قوت عمده جنگل تصادفی در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌توان به ماهیت غیر پارامتری مدل ایجاد شده، قابلیت مدیریت و استفاده از مجموعه‌های کمکی بسیار بزرگ با انواع متغیرهای کمکی، عملکرد پیش‌بینی زیاد، انتخاب تصادفی متغیرهای کمکی در طول ساخت درخت و توانایی مدیریت داده‌های تحریف شده اشاره کرد. بنابراین، جنگل تصادفی روش عملی برای به‌دست آوردن ضریب K و برآورد مدل فرسایش خاک در مناطق بزرگ ارائه می‌کند. شایان ذکر است که عامل K تحت تأثیر متقابل عوامل بسیاری قرار دارد و تأثیر متقابل

رسوب نیز افزایش می‌یابد (Wischmeier & Smith, 1978; Ghosal & das Bhattacharya, 2020). فاکتور طول و درصد شیب نسبت به طول شیب به تنهایی تأثیر بیشتری بر فرسایش خاک دارد (Ghosal & das Bhattacharya, 2020).

یکی از مهم‌ترین عوامل مدل RUSLE که به راحتی می‌توان آن را برای کاهش تلفات خاک مدیریت کرد، فاکتور پوشش گیاهی است (Renard et al., 1991). با توجه به تغییرات زمانی پوشش گیاهی، میانگین توزیع مکانی فاکتور C برای سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ در شکل ۲ (پ) ارائه شده است. فاکتور C برای میانگین ده ساله در نظر گرفته شده (۱۳۸۸ - ۱۳۹۷) از 0.25 تا 0.49 متغیر است. روند کلی مکانی فاکتور C برای زمان‌های مشخص شده تقریباً مشابه است. میانگین پوشش گیاهی ده ساله نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و نزدیک به رودخانه که در آن کشاورزی انجام می‌شود، کم‌ترین مقدار و در مناطق دور از رودخانه که دارای رخنمون سنگی یا مناطق مرتعی که پوشش گیاهی مرتع به دلیل چرای بیش از حد دام از بین رفته بود، دارای بیش‌ترین مقدار فاکتور C است. مقادیر بالای فاکتور C نشان‌دهنده آسیب‌پذیری و حساسیت بیش‌تر در برابر فرسایش خاک است. مقادیر فاکتور C از نزدیک به صفر برای خاک بسیار محافظت شده با پوشش گیاهی زیاد تا نزدیک به ۱ برای خاک‌های مستعد فرسایش و بدون پوشش گیاهی متفاوت است (Renard et al., 1991). بنابراین، مقادیر صفر و نزدیک به صفر C برای بخش‌های مرکزی بود که در آن کشاورزی صورت می‌گیرد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که تغییر در توزیع مکانی فاکتور C از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ را می‌توان تا حدی به تغییر پوشش یا کاربری اراضی در طول دوره مورد نظر نسبت داد.

کشت بر روی خطوط تراز، کشت نواری و تراس‌بندی از مؤثرترین شیوه‌های حفاظت خاک هستند. در سراسر حوزه آبخیز مطالعاتی اقدامات حفاظتی برای کاهش فرسایش خاک صورت نگرفته است و کشاورزان از روش‌های ذکر شده برای کاهش فرسایش استفاده نمی‌کنند. محصولات زراعی عمدتاً غلات هستند و شخم و شیار به‌ندرت موازی با خطوط تراز داده می‌شود. تلاش‌هایی در خصوص احیای جنگل‌ها در منطقه صورت گرفته است اما این اقدامات بر روی خطوط تراز صورت نگرفته است. بنابراین مقدار فاکتور P برای کل منطقه مطالعاتی ۱ در نظر گرفته شد.

خواص فیزیکی و شیمیایی خاک به مقاومت خاک در برابر جدا شدن توسط قطرات باران و انتقال توسط رواناب تأثیر می‌گذارد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K) در این پژوهش با روش‌های مختلف یادگیری ماشین تهیه گردید. بین سه مدل کاربردی استفاده شده، مدل جنگل تصادفی نسبت به دو مدل کوبیست و ماشین بردار پشتیبان در سناریو سوم بهترین عملکرد را داشت (جدول ۲). برتری عملکرد مدل جنگل تصادفی بر مدل‌های دیگر نظیر Cubist و SVM در تخمین عامل فرسایش‌پذیری خاک مستقیماً ناشی

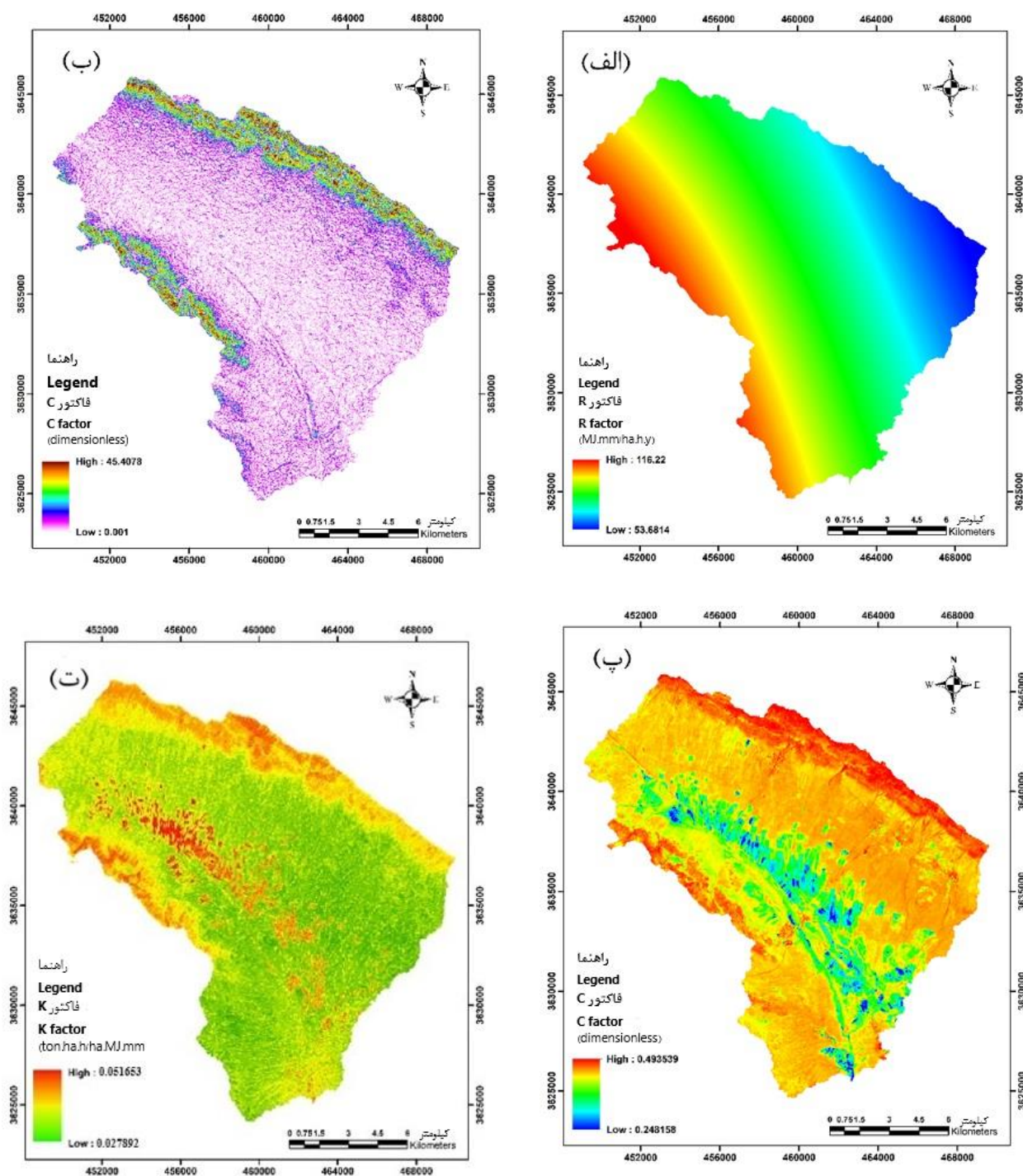
عوامل تأثیرگذار مرتبط در مناطق مختلف متفاوت است.

با افزودن شاخص‌های سنجش از دور به ویژگی‌های توپوگرافی، مقدار R^2 برای پیش‌بینی ضریب K در این رویکرد تقریباً ۷۲٪ افزایش یافت، در حالی که گنجاندن نقشه‌های موضوعی به سناریوی II مقدار R^2 را تا ۶۸٪ بهبود داد (جدول ۲). آلابوز و همکاران (Alaboz et al., 2021) در مطالعه نقشه‌برداری رقومی عامل فرسایش‌پذیری خاک بر اساس درخت تصمیم، از الگوریتم CART استفاده کردند و بیان کردند که متغیرهای سیلت و رس با تشکیل گره‌ها ۹۰/۶ درصد برآورد شدند. گوپتا و همکاران (Gupta et al., 2024)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را بر اساس دو رویکرد محاسبه کرد (i: نفوذپذیری خاک برآورد شده توسط رس $[K_{Wischmeier}]$ و ii: و مشتق از $[K_{Ksat}]$ و سپس آنها را با متغیرهای محیطی با استفاده از یک مدل جنگل تصادفی پیش‌بینی کرده و دریافتند که مدل RF دارای مقدار ضریب تبیین ۹۳ درصد برای K_{Ksat} و مقدار ضریب تبیین ۹۸ درصد برای $K_{Wischmeier}$ بود. یو و همکاران (Yu et al., 2023) برای پیش‌بینی فاکتور K با استفاده از متغیرهای کمکی محیطی در جنوب شرقی تبت نشان دادند که مدل جنگل تصادفی مقدار ضریب تبیین بیش‌تر از ۰/۹ ایجاد کرد و اطلاعات دقیقی در مورد توزیع مکانی مقادیر فاکتور K ، به‌ویژه در مناطق بزرگ نمونه‌برداری نشده ارائه می‌کند.

تحلیل اهمیت متغیر

برای دستیابی به درک کامل متغیرهای محیطی که در پیش‌بینی فرسایش‌پذیری خاک اهمیت بیشتری داشتند، نتایج تحلیل اهمیت متغیرها در شکل ۳ گزارش شده است. با توجه به روش تحلیل اهمیت متغیر (VIA)، سطح پایه شبکه کانال (CNBL)، ارتفاع، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شیب، سطح حوزه آبخیز و شاخص MRRTF شناسایی شدند و بیش‌ترین تأثیر را بر فاکتور K داشتند. همان‌طور که در پژوهشی نشان داده شده است (Ye et al., 2022)، ویژگی‌های توپوگرافی مانند ارتفاع، سطح حوزه آبخیز، عامل LS، و شاخص‌های هیدرولوژیکی به‌دست آمده از DEM به‌طور معنی‌داری بر ویژگی‌های خاک مانند ماده‌آلی و توزیع اندازه ذرات اولیه تأثیر دارند که به‌طور غیرمستقیم حساسیت خاک به فرسایش را کنترل می‌کنند. فرایندهای فرسایش/رسوب خاک، و همچنین تولید رواناب و جدا شدن خاک، با متغیرهای توپوگرافی، مانند ارتفاع و درجه و طول شیب همبستگی نزدیکی دارند. در پژوهشی که توسط گو و همکاران (Gu et al., 2021) در یک منطقه کوهستانی، در استان یوننان چین انجام شد، این دانشمندان نشان دادند که ضریب K در شیب‌های کمتر از ۱۵ درجه روند روبه افزایشی دارند، اما با افزایش شیب تا زاویه‌های بیشتر از ۱۵ درجه روند افزایشی زیاد نیست. گوپتا و همکاران (Gupta et al., 2024) به‌دنبال مدل‌سازی مکانی فاکتور K توسط EF، تجزیه و

تحلیل حساسیت را انجام داده و نشان دادند که برای $K_{Wischmeier}$ برخی از ویژگی‌های خاک (شن، رس و ماده‌آلی خاک) و همچنین برخی از عوامل اقلیمی و شاخص رطوبت توپوگرافی به‌عنوان ۱۰ متغیر برتر شناسایی شدند. از میان شاخص‌های سنجش از دور، شاخص کربنات (CI) مهم‌ترین و تأثیرگذارترین متغیر بود. تنگ و همکاران (Teng et al., 2016) داده‌های سنجش از دور را به‌عنوان پیش‌بینی کننده‌های مهم فرسایش‌پذیری خاک شناسایی کردند. یو و همکاران (Yu et al., 2023) با توجه به متغیرهای مهم مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک نشان دادند که ترکیبی از ویژگی‌های خاک (بعد فراکتالی و MWD)، اقلیم و توپوگرافی آثار قابل توجهی بر فرسایش‌پذیری خاک داشتند، در حالی که تأثیر پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی حداقل بود. بسیاری از پژوهشگران فاکتور K را در مقیاس‌های کرت استاندارد یا دامنه تپه ارزیابی کرده‌اند. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2022)، تمرکز زیادی بر تأثیر ویژگی‌های خاک مانند بافت، محتوای کربن آلی و توزیع اندازه خاکدانه بر عامل K داشته‌اند. با این حال، عدم قطعیت‌های قابل توجهی باقی می‌ماند، زیرا عوامل محیطی که تا حدی ویژگی‌های فیزیکی خاک را تعیین می‌کنند، در نظر گرفته نمی‌شوند. کاربری اراضی نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای کمکی برای پیش‌بینی تغییرپذیری K در منطقه مورد بررسی شناسایی شد. استفاده از زمین به دلیل آثار آن بر ویژگی‌های خاک، به‌ویژه ماده‌آلی خاک، تراکم خاک و نفوذپذیری خاک، می‌تواند عامل K را کنترل کنند (Oguike et al., 2023). باشکان (Baskan, 2022) بیان کردند که ویژگی‌های منظر زمین‌ها، از جمله شیب، جهت شیب، ارتفاع و کاربری و پوشش زمین معمولاً عوامل غالبی هستند که بر مقدار ماده‌آلی خاک در مناطقی با مواد مادری یکنواخت تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، پایداری خاکدانه‌ها یکی از مؤثرترین پارامترهای کنترل‌کننده فرسایش خاک تحت تأثیر کاربری اراضی است (Cerdà, 1996).

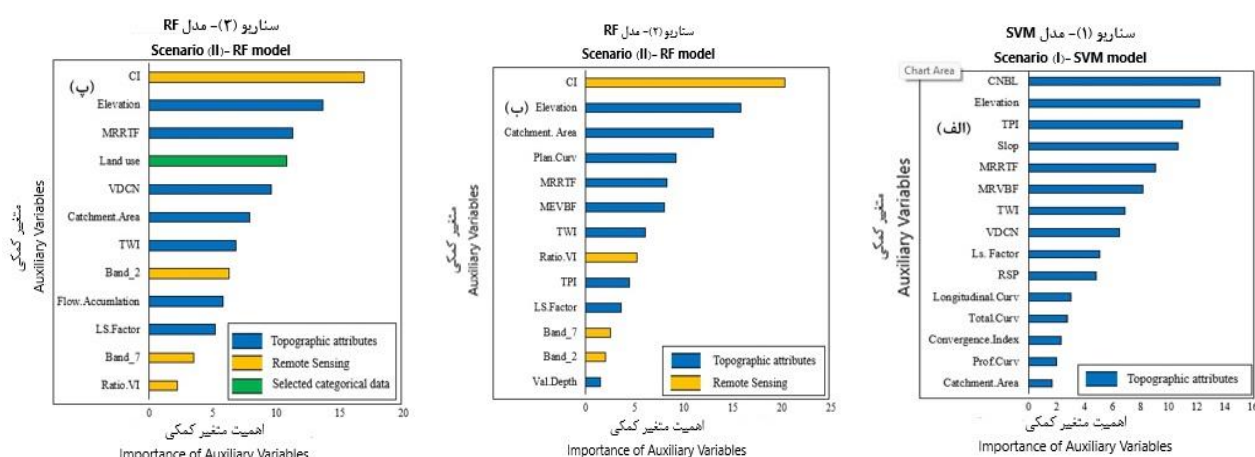


شکل ۲- فاکتورهای ورودی مدل RUSLE: (الف) عامل فرساینده‌ی باران (ب) عامل طول و درصد شیب (پ) عامل پوشش گیاهی (ت) عامل فرسایش‌پذیری خاک

Figure 2- The input factors for the RUSLE model: R factor (a), LS factor (b), C factor (c), K factor (d)

جدول ۲- معیارهای اعتبارسنجی برای پیش‌بینی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K)، با استفاده از سه مدل یادگیری ماشین

Model مدل	Scenario I سناریو ۱				Scenario II سناریو ۲				Scenario III سناریو ۳			
	R ²	RMSE	MAE	nRMSE	R ²	RMSE	MAE	nRMSE	R ²	RMSE	MAE	nRMSE
RF	0.078	0.0076	0.0052	21.03	0.283	0.0063	0.0044	17.38	0.317	0.0061	0.0042	16.88
Cu	0.153	0.0083	0.0056	19.60	0.266	0.0067	0.0047	16.40	0.282	0.0064	0.0047	17.62
SVM	0.167	0.0062	0.0048	17.11	0.255	0.0056	0.0046	15.45	0.231	0.0069	0.0048	19.04



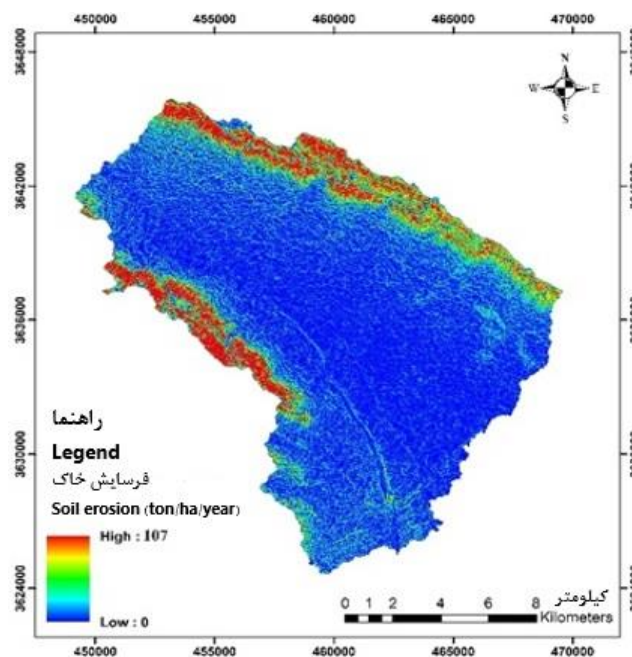
شکل ۳- اهمیت نسبی متغیرهای کمکی محیطی (%) برای پیش‌بینی عامل فرسایش‌پذیری خاک: (الف) سناریو (i)، (ب) سناریو (ii)، (پ) سناریو (iii)

Figure 3- Relative importance of environmental covariates (%) for predicting soil erodibility factor: (a) Scenario (i), (b) Scenario (ii), (c) Scenario (iii)

نشان‌دهنده اثر متقابل فرسایش‌پذیری و فرسایش در میزان فرسایش است و لزوماً هر دو عامل در تعیین مقدار فرسایش خاک در نظر گرفته می‌شود. در مناطق مرکزی عوامل فرسایش کم‌ترین مقدار را داشته است که میزان فرسایش خاک کم‌ترین مقدار گزارش شده است. همچنین عوامل مختلفی در مقدار فرسایش خاک نقش دارند که عامل فرسایش‌پذیری خاک یکی از این عوامل است. فرسایش بیشتر در دامنه کوه‌ها به دلیل کشت در دامنه شیب، از بین رفتن پوشش گیاهی، شیوه‌های ضعیف مدیریت اراضی و چرای بیش از حد دام باشد (Habtu & Jayappa, 2022). اگرچه عوامل زیادی در مقدار فرسایش خاک نقش دارند، اما توپوگرافی و پوشش گیاهی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر نرخ فرسایش خاک هستند. با افزایش طول و درجه شیب، عمق جریان کاهش می‌یابد و در نتیجه فرسایش افزایش می‌یابد (Wang et al., 2022). به‌طور کلی، عملکرد بهتر مدل RUSLE برای پیش‌بینی فرسایش بلندمدت خاک به دلیل توانایی آن در تخمین متوسط بلندمدت نرخ سالانه فرسایش خاک با در نظر گرفتن عوامل متعدد و ارائه دستورالعملی برای توسعه طرح‌های حفاظتی و انجام عملیات‌های مدیریتی برای کاهش فرسایش خاک است.

پیش‌بینی میزان فرسایش خاک

مدل RUSLE با استفاده از پنج عامل آب و هوا، خاک، توپوگرافی و کاربری اراضی طراحی شده است. مدل RUSLE بر این فرض استوار است که فرسایش خاک یک فرآیند بلندمدت است که در طی چندین سال یا چند دهه رخ می‌دهد و تحت تأثیر اثرات تجمعی عوامل مختلف مانند بارندگی، نوع خاک و کاربری اراضی قرار می‌گیرد. تلفات خاک در میانگین بلندمدت ۳۰ ساله (۱۳۶۸-۱۳۹۷) که در شکل ۴ نمایش داده شده است، ۸/۲۷ تن در هکتار در سال است. توزیع مکانی تلفات خاک از نزدیک به صفر تن در هکتار در مناطق مرکزی، جنوب شرقی و دشت تا بیش از ۵۰ تن در هکتار در دره‌ها و شیب‌های تند حوضه متغیر است (شکل ۴). این یافته‌ها در حدود سطح آستانه فرسایش خاک (۵-۱۲ تن در هکتار در سال) است (Hurni, 2002). تلفات خاک در شیب‌های تند که شامل رشته کوه‌های دو طرف منطقه مطالعاتی است بیش‌ترین مقدار خود بود، اما در مناطق مرکزی و دشت‌های احاطه شده توسط دو رشته کوه اطراف که از شمال غربی به جنوب شرقی امتداد دارند، کمتر در معرض فرسایش خاک بودند. در مناطق مرکزی عامل فرسایش‌پذیری خاک بیش‌ترین میزان را نسبت به کل منطقه مطالعاتی داشت. این امر

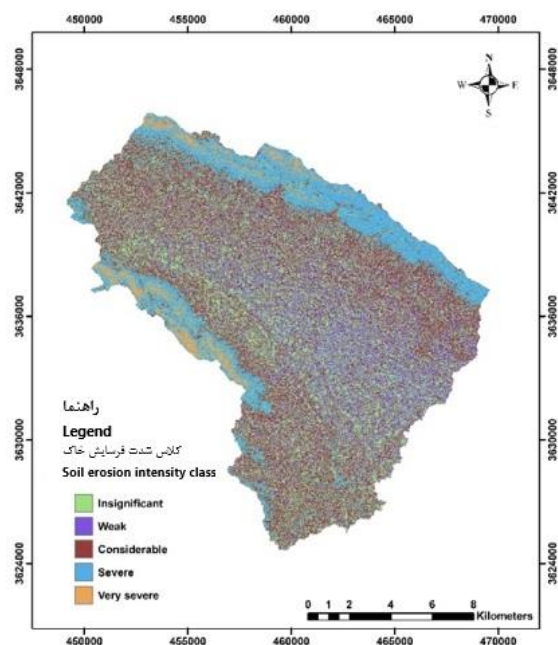


شکل ۴- فرسایش خاک در حوزه آبخیز مورد مطالعه
Figure 4- Soil erosion in the studied watershed

برای برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات حفاظتی می‌باشد (Gashaw *et al.*, 2018). منطقه مورد مطالعه در پنج کلاس شدت فرسایش طبقه‌بندی شد.

نقشه شدت فرسایش خاک

بدلیل منابع محدود در دسترس اولویت‌بندی اراضی بر اساس حساسیت به فرسایش برای مدیران و سیاست‌گذاران امری ضروری



شکل ۵- کلاس شدت فرسایش خاک بر اساس مدل RUSLE در حوزه آبخیز مورد مطالعه
Figure 5- Soil erosion intensity class based on RUSLE model in the studied watershed

پشتیبان نتایج بهتری برای پیش‌بینی ارائه داد. در همه موارد، ترکیب همه متغیرهای محیطی شامل شاخص‌های سنجش از دور، ویژگی‌های توپوگرافی و نقشه‌های موضوعی (سناریو سوم)، منجر به بیش‌ترین عملکرد مدل‌سازی مکانی شد. میانگین فرسایش خاک با استفاده از مدل $RUSLE \ 8/27$ تن در هکتار در سال برآورد شد. همچنین نقشه کلاس شدت فرسایش حوزه آبخیز مورد مطالعه تهیه گردید که نشان می‌دهد ۲۱ درصد منطقه دارای فرسایش شدید و بسیار شدید است که باید برای اقدامات مدیریتی در اولویت کارهای آبخیزداری و کنترل فرسایش قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود محقق‌ها در مطالعات آینده برای دستیابی به تخمین دقیق‌تر پارامتر فرسایش‌پذیری خاک و گسترش کاربرد مدل، با غنی‌سازی مجموعه داده‌ها از طریق ادغام داده‌های سنجش از دور با تفکیک فضایی- زمانی بالاتر و پارامترهای هیدرولوژیکی محلی به منظور افزایش توانایی مدل‌های SVM و Cubist در جذب تغییرات محیطی کوچک مقیاس بهره بگیرند و همچنین، ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری عمیق (Deep Learning)، به‌ویژه شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) یا شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) در صورت وجود داده‌های سری زمانی، برای مقایسه کارایی آن‌ها با مدل‌های مبتنی بر درخت مانند جنگل تصادفی در شرایط داده‌های غنی‌تر استفاده کنند.

حدود ۳۳ درصد از منطقه در کلاس فرسایش ناچیز (کمتر از ۵/۰ تن در هکتار در سال) طبقه‌بندی شده است. حدود ۲۰ درصد کل منطقه در کلاس فرسایش ضعیف است. ۲۶ درصد در کلاس متوسط (۳-۱۲ تن در هکتار در سال) قرار گرفت. ۱۸ درصد از منطقه مطالعاتی در کلاس خطر فرسایش شدید (۱۲-۵۰ تن در هکتار در سال) و ۳ درصد از کل منطقه در کلاس خطر فرسایش بسیار شدید (بیشتر از ۵۰ تن در هکتار در سال) طبقه‌بندی شد. مناطقی که با خطرات فرسایش شدید و بسیار شدید هستند باید در اولویت اقدامات حفاظتی خاک برای مدیران و سیاست‌گذاران قرار بگیرد (شکل ۵). تعمیم‌پذیری نتایج پیش‌بینی فرسایش خاک به حوزه آبخیزهای مجاور، منوط به شباهت قابل توجه در عوامل کنترل‌کننده اصلی است. اگر اراضی جدید از نظر تیپ غالب خاک، الگوی بارش و کاربری اراضی با منطقه مورد مطالعه تفاوت فاحشی نداشته باشند، مدل می‌تواند به‌عنوان یک تخمین اولیه قابل اتکا باشد. با این حال، به‌دلیل حساسیت عامل K به شرایط محلی، توصیه می‌شود که مدل برای تضمین دقت بالا، حداقل با نمونه‌برداری کنترل‌شده‌ای در منطقه جدید اعتبارسنجی شود.

نتیجه‌گیری

برای پیش‌بینی مکانی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در حوزه آبخیز مندرجان با تکنیک یادگیری ماشین، بین سه مدل استفاده شده مدل جنگل تصادفی نسبت به دو مدل کیوبیست و ماشین‌های برداری

References

- Abdo, H., & Salloum, J. (2017). Mapping the soil loss in Marqya basin: Syria using RUSLE model in GIS and RS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), 114. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6424-0>
- Alaboz, P., Dengiz, O., Demir, S., & Şenol, H. (2021). Digital mapping of soil erodibility factors based on decision tree using geostatistical approaches in terrestrial ecosystem. *Catena*, 207, 105634. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105634>
- Arnoldus, H.M.J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco.
- Ayoubi, S., Emami, N., Ghaffari, N., Honarjoo, N., & Sahrawat, K.L. (2014). Pasture degradation effects on soil quality indicators at different hillslope positions in a semiarid region of western Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(1), 375-381. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2440-x>
- Bagarello, V., Di Stefano, C., Ferro, V., Giuseppe, G., & Iovino, M. (2009). A pedotransfer function for estimating the soil erodibility factor in Sicily. *Journal of Agricultural Engineering*, 40(3), 7-13. <https://doi.org/10.4081/jae.2009.3.7>
- Baskan, O. (2022). Analysis of spatial and temporal changes of RUSLE-K soil erodibility factor in semi-arid areas in two different periods by conditional simulation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(12), 1698-1710. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1922673>
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (R) USLE: With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059-6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- 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>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learnin*, 45, 5-32.
- Celik, I. (2005). Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.001>

11. Cerdà, A. (1996). Soil aggregate stability in three Mediterranean environments. *Soil Technology*, 9(3), 133-140. [https://doi.org/10.1016/s0933-3630\(96\)00008-6](https://doi.org/10.1016/s0933-3630(96)00008-6)
12. Chou, W.C. (2010). Modelling watershed scale soil loss prediction and sediment yield estimation. *Water Resources Management*, 24(10), 2075-2090. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9539-6>
13. EUROSTAT. (2017). Regional statistics by NUTS classification.
14. Gashaw, T., Tulu, T., & Argaw, M. (2018). Erosion risk assessment for prioritization of conservation measures in Geleda watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 6(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40068-016-0078-x>
15. Gayen, A., Saha, S., & Pourghasemi, H.R. (2020). Soil erosion assessment using RUSLE model and its validation by FR probability model. *Geocarto International*, 35(15), 1750-1768. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1581272>
16. Gholami, V., Booi, M.J., Tehrani, E.N., & Hadian, M.A. (2018). Spatial soil erosion estimation using an artificial neural network (ANN) and field plot data. *Catena*, 163, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.027>
17. Ghosal, K., & Das Bhattacharya, S. (2020). A review of RUSLE model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(4), 689-707. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01097-0>
18. Grimm, R., Behrens, T., Märker, M., & Elsenbeer, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146(1-2), 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.008>
19. Gu, Z., Huang, Y., Feng, D., Duan, X., Xue, M., Li, Y., & Li, Y. (2021). Towards mapping large scale soil erodibility by using pedological knowledge. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(6), 809-821. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1759799>
20. Guo, L., Fu, P., Shi, T., Chen, Y., Zhang, H., Meng, R., & Wang, S. (2020). Mapping field-scale soil organic carbon with unmanned aircraft system-acquired time series multispectral images. *Soil and Tillage Research*, 196, 104477. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104477>
21. Gupta, S., Borrelli, P., Panagos, P., & Alewell, C. (2024). An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity. *Science of the Total Environment*, 908, 168249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168249>
22. Habtu, W., & Jayappa, K.S. (2022). Assessment of soil erosion extent using RUSLE model integrated with GIS and RS: the case of Megech-Dirma watershed, Northwest Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5), 318. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09965-y>
23. Holmes, G., Hall, M., & Frank, E. (1999, December). Generating rule sets from model trees. In Australasian joint conference on artificial intelligence (pp. 1-12). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-46695-9_1
24. Hurni, H. (2002). Current international actions for furthering the sustainability use of soils. In: Symposium paper no. 63 on 17th WCSS, 14–21 August 2002, pp 8.
25. Iaaich, H., Moussadek, R., Baghdad, B., Mrabet, R., Douaik, A., Abdelkrim, D., & Bouabdli, A. (2016). Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province–Northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.07.001>
26. Jiang, Y., You, Q., Chen, X., Jia, X., Xu, K., Chen, Q., ... & Shi, Z. (2022). Preliminary risk assessment of regional industrial enterprise sites based on big data. *Science of the Total Environment*, 838, 156609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156609>
27. Kutra, I. (2020). Soil erosion by wind and dust emission in semi-arid soils due to agricultural activities. *Agronomy*, 10(1), 89. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010089>
28. Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods* 5, 635-662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
29. Lastoria, B., Miserocchi, F., Lanciani, A., & Monacelli, G. (2008). An estimated erosion map for the Aterno-Pescara river basin. *European Water*, 21(22), 29-39.
30. Lin, C.Y., Lin, W.T., & Chou, W.C. (2002). Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil and Tillage Research*, 68(2), 143-152. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(02\)00114-9](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(02)00114-9)
31. Madenoglu, S., Atalay, F., & Erpul, G. (2020). Uncertainty assessment of soil erodibility by direct sequential Gaussian simulation (DSIM) in semiarid land uses. *Soil and Tillage Research*, 204, 104731. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104731>
32. Matinfar, H.R., Maghsodi, Z., Mousavi, S.R., & Rahmani, A. (2021). Evaluation and prediction of topsoil organic carbon using machine learning and hybrid models at a Field-scale. *Catena*, 202, 105258. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105258>
33. McCool, D.C., Foster, G.R., Renard, K.G., Yoder, D.C., & Weesies, G.A. (1995). The revised universal soil loss equation. Department of Defense/Interagency Workshop on Technologies to Address Soil Erosion on Department of Defense Lands San Antonio, TX, June 11–15, 1995. <https://doi.org/10.1201/9780203739358-5>
34. Minasny, B., & McBratney, A.B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of

- ancillary information. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1378-1388. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009>
35. Minasny, B., McBratney, A.B., & Hartemink, A.E. (2010). Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, 155(3-4), 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.024>
 36. Moore, I.D., & Burch, G.J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294-1298. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
 37. Naimi, S., Ayoubi, S., Zeraatpisheh, M., & Dematte, J.A.M. (2021). Ground observations and environmental covariates integration for mapping of soil salinity: a machine learning-based approach. *Remote Sensing*, 13(23), 4825. <https://doi.org/10.3390/rs13234825>
 38. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties, 9, 539-579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
 39. Oguike, P.C., Onwuka, B.M., & Obalum, S.E. (2023). Soil organic matter control of water transmission properties of coarse-textured soils under contrasting land-use types in tropical rainforest. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 16(1), 93-106. <https://doi.org/10.1504/ijhst.2023.131833>
 40. Pan, J., & Wen, Y. (2014). Estimation of soil erosion using RUSLE in Caijiamiao watershed, China. *Natural Hazards*, 71(3), 2187-2205. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1006-2>
 41. Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., & Geetha, N.J.G.F. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>
 42. Ravi, S., Breshears, D.D., Huxman, T.E., & D'Odorico, P. (2010). Land degradation in drylands: interactions among hydrologic-aeolian erosion and vegetation dynamics. *Geomorphology*, 116(3-4), 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.023>
 43. Refahi, H.Gh. (2015). *Water erosion and conservation*. University of Tehran Press. 2298. 7th Edition.
 44. Renard, K.G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(00\)00178-1](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(00)00178-1)
 45. Renard, K.G., & Freimund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 287-306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
 46. Renard, K.G., Foster, R., Weesies, G., & Porter, G. (1991). C" RUSLE: Revised universal soil loss equation,". *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 30-33. <https://doi.org/10.1080/00224561.1991.12456571>
 47. Sch"auble, H. (2005). AVErosion 1.0 für ArcView 3.x. Analyse der Bodenerosion nach den Modellen USLE und MUSLE87. Erweiterung für ArcView 3.x und den Spatial Analyst 1.x.
 48. Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O.A., & McArthur, D. (2003). Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography*, 27(2), 171-197. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp366ra>
 49. Shin, J.Y., Kim, T., Heo, J.H., & Lee, J.H. (2019). Spatial and temporal variations in rainfall erosivity and erosivity density in South Korea. *Catena*, 176, 125-144. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.005>
 50. Singh, M.J., & Khera, K.L. (2009). Physical indicators of soil quality in relation to soil erodibility under different land uses. *Arid Land Research and Management*, 23(2), 152-167. <https://doi.org/10.1080/15324980902817147>
 51. Teng HongFen, T.H., Hu Jie, H.J., Zhou Yue, Z.Y., Zhou LianQing, Z.L., & Shi Zhou, S.Z. (2019). Modelling and mapping soil erosion potential in China. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(18\)62045-3](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(18)62045-3)
 52. Teng, H., Rossel, R.A.V., Shi, Z., Behrens, T., Chappell, A., & Bui, E. (2016). Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia. *Environmental Modelling & Software*, 77, 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.024>
 53. Tian, Z., Liu, F., Liang, Y., & Zhu, X. (2022). Mapping soil erodibility in southeast China at 250 m resolution: Using environmental variables and random forest regression with limited samples. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(1), 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.005>
 54. UN. (2011). Global Drylands. United Nations Environment Management Group: 132. Wang, G., Gertner, G., Liu, X., & Anderson, A. (2001). Uncertainty assessment of soil erodibility factor for revised universal soil loss equation. *Catena*, 46, 1-14. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(01\)00158-8](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(01)00158-8)
 55. Vaezi, A.R., Sadeghi, S.H.R., Bahrami, H.A., & Mahdian, M.H. (2008). Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97(3-4), 414-423. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.017>
 56. Vapnik, V. (1998). *Statistical learning theory* wiley-interscience. New York.
 57. Wadoux, A.M.C., Samuel-Rosa, A., Poggio, L., & Mulder, V.L. (2020). A note on knowledge discovery and machine learning in digital soil mapping. *European Journal of Soil Science*, 71(2), 133-136. <https://doi.org/10.1111/ejss.12909>
 58. Wang, G., Gertner, G., Singh, V., Shinkareva, S., Parysow, P., & Anderson, A. (2002). Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall-runoff erosivity R factor. *Ecological Modelling*, 153(1-2), 143-155. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(01\)00507-5](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(01)00507-5)
 59. Wang, Q., Li, F., Zhao, X., Zhao, W., Zhang, D., Zhou, X., ... & Chen, J. (2022). Runoff and nutrient losses in alfalfa

- (*Medicago sativa* L.) production with tied-ridge-furrow rainwater harvesting on sloping land. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 308-323. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.005>
60. Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
61. Ye, Y., Jiang, Y., Kuang, L., Han, Y., Xu, Z., & Guo, X. (2022). Predicting spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen in a typical human impacted area. *Geocarto International*, 37(15), 4465-4482. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886344>
62. Yu, W., Jiang, Y., Liang, W., Wan, D., Liang, B., & Shi, Z. (2023). High-resolution mapping and driving factors of soil erodibility in southeastern Tibet. *Catena*, 220, 106725. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106725>
63. Zhou, X., Lin, H.S., & White, E.A. (2008). Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *Catena*, 73(2), 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.09.009>

Research Article

Vol. 39, No. 5, Dec. 2025-Jan. 2026, p. 499-514

Water Productivity of Commercial Bread Wheat Cultivars in Southern Warm and Dry Zone

M. Moayeri^{1*}, S.M. Tabib Ghafari², M. Esmailzadeh Moghadam³

1- Agricultural Engineering Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education And Extension Organization (AREEO), Dezful, Iran

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

2- Agricultural and Horticultural Sciences Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education And Extension Organization (AREEO), Dezful, Iran

3- Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 04 November 2025

Revised: 23 December 2025

Accepted: 05 January 2026

Available Online: 05 January 2026

How to cite this article:

Moayeri, M., Tabib Ghafari, S.M., & Esmailzadeh Moghadam, M. (2026). Water productivity of commercial Bread wheat cultivars in southern warm and dry zone. *Journal of Water and Soil*, 39(5), 499-514. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.96227.1507>

Introduction

Wheat is the principal crop in Iran in terms of both production and cultivated area. Enhancing its production is critically important for the economy and national food security. Assessing the water productivity of commercial wheat varieties is key to achieving more efficient water use. Previous studies have demonstrated that wheat water productivity is influenced by cultivar type and irrigation amount, with different varieties exhibiting varying grain yields under both water deficit and surplus conditions. Increasing yield and water productivity depend on several factors, most notably the selection of high-yielding, improved cultivars with lower water requirements, coupled with irrigation management strategies tailored to the characteristics of these varieties, especially in hot and arid climates.

Materials and Methods

A two-year field experiment was conducted during the 2021-2022 and 2022-2023 growing seasons at the Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, using a randomized complete block design with three replications. The experimental treatments consisted of five irrigation levels (25%, 50%, 75%, 100%, and 125% of crop evapotranspiration) as the horizontal factor and six bread wheat cultivars (Azadegan, Ouj, Barat, Jalal, Darion, and Mehregan) as the vertical factor.

Following land preparation, fertilization with macronutrients was applied before planting and during the vegetative growth stage, based on soil test recommendations. Sowing was performed using a Wintersteiger row planter, and irrigation was supplied via a T-tape drip irrigation system. Water was sourced from the Dez irrigation and drainage network. The designated irrigation treatments were implemented starting from the third irrigation event, with water volumes measured using volumetric water meters. Crop evapotranspiration was calculated using the evaporation pan method, and soil moisture balance was monitored by auger sampling and the gravimetric method. Weed control was achieved through appropriate herbicide applications.

Results and Discussion

In the first and second years, total evapotranspiration (ET) was 310 mm and 300 mm, while total rainfall was 145 mm and 289 mm, respectively. Accounting for effective rainfall, the irrigation treatments supplied 42, 62, 82, 102, and 122% of the crop ET in the first year, and 60, 76, 89, 103, and 117% in the second year. A combined



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.2026.96227.1507>

analysis of variance revealed a significant year effect. The grain yield of the cultivars in response to ET showed maximum variations of 10% and 30% in the first and second years, respectively. Water productivity, measured as grain yield per millimeter of water consumed, ranged from 18.43 to 22.38 kg ha⁻¹ mm⁻¹. By selecting an appropriate cultivar and managing deficit irrigation, the applied water productivity and crop water productivity indices increased by 63% and 93%, respectively. The relationship between plant water supply and grain yield followed a quadratic function. Based on this model, the optimal deficit irrigation strategy was to supply 70% of wheat ET, which resulted in an acceptable grain yield reduction of approximately 15%. Across irrigation treatments in both years, the Darion, Mehregan, and Jalal cultivars exhibited higher average grain yield and crop water productivity than the mean of all cultivars. A cluster analysis was performed using R software, based on the regression coefficients of the grain yield, relative water supply, and evapotranspiration data. The cultivars were grouped into distinct clusters, and practical, cluster-specific management recommendations are provided.

Conclusion

Hot and dry climates are characterized by high variability in evaporation, precipitation patterns, and crop water requirements across different wheat growth stages. Consequently, to achieve sustainable production and enhance water productivity within the genetic potential of wheat varieties, breeding programs should target the development of cultivars capable of producing more than 24 kg of grain per hectare per millimeter of water consumed.

Keywords: Applied water, Productivity, Production function, Water consumption, Yield

بهره‌وری آب ارقام تجاری گندم نان در اقلیم گرم و خشک جنوب

منصور معیری^{۱*} - سید محمود طبیب غفاری^۲ - محسن اسماعیل زاده مقدم^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

به منظور ارزیابی و مقایسه ارقام تجاری موجود گندم نان از نظر عملکرد و بهره‌وری آب، آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی به مدت دو سال زراعی از ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۲ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی آباد اجرا شد. در این آزمایش تیمار افقی شامل پنج سطح مقادیر آب (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۵٪ نیاز آبیاری و تیمارهای عمودی شامل شش رقم گندم آزادگان، اوج، برات، جلال، داریون و مهرگان با سه تکرار بود. نیاز آبی بر اساس روش تشت تبخیر محاسبه و اعمال تیمارهای آبیاری با استفاده از روش آبیاری نواری - قطره‌ای (تیپ) انجام شد. در تجزیه واریانس مرکب اثر سال به دلیل شرایط اقلیمی هر سال به‌ویژه در مقدار و پراکنش بارش مؤثر، معنی‌دار شد. حداکثر تغییرات عملکرد دانه ارقام در تأمین نیاز آبی طی دو سال به ترتیب ۱۰ و ۳۰ درصد و مقدار تولید دانه به‌ازای هر میلی‌متر آب مصرفی ارقام در محدوده ۱۸/۴۳ تا ۲۲/۳۸ کیلوگرم در هر هکتار بود. در تیمارهای آبیاری مجزای هر دو سال، میانگین صفات عملکرد دانه و بهره‌وری آب مصرفی به ترتیب در ارقام داریون، مهرگان و جلال از متوسط کل ارقام بالاتر بود. میانگین دوساله بهره‌وری آب این ارقام در آبیاری کامل به ترتیب ۲/۵۷، ۲/۴۶ و ۲/۴۳ کیلوگرم در متر مکعب آب مصرفی اندازه‌گیری شد. با انتخاب رقم و مدیریت کم آبیاری متناسب آن، شاخص‌های بهره‌وری آب کاربردی و آب مصرفی به ترتیب تا ۶۳ و ۹۳ درصد افزایش داشت. در تجزیه کلاستر در محیط نرم‌افزار R بر اساس ضرایب مدل‌های رگرسیون عملکرد دانه - تأمین نسبی آب و نیاز آبی، ارقام خوشه‌بندی و توصیه‌های کاربردی برای هر خوشه ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: آب کاربردی، آب مصرفی، بهره‌وری، تابع تولید، عملکرد

مقدمه

نیاز مزارع آبی و دیم است. چالش تولید محصول بیشتر با محدودیت‌های فزاینده آب، افزایش تولید محصول به ازای واحد حجم آب مصرفی را می‌طلبد (Kijne et al., 2003). در سطح کشور و جهان تحقیقات زیادی در زمینه تعیین آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید گندم انجام شده‌است. ارزیابی‌های بهره‌وری آب (که عبارت است از نسبت عملکرد دانه به کل آب کاربردی) و سایر صفات وابسته، در ارقام تجاری دوروم و نان گندم ما را به استفاده بهینه‌تر از آب محدود قابل دسترس هدایت می‌کند (Kang et al., 2002; Sharma et al., 1986; Richards et al., 2002). مطالعه ۸۴ منبع تحقیقاتی در سال‌های

سطح زیر کشت گندم در ایران ۷/۶ میلیون هکتار است که ۴/۸ میلیون هکتار آن کشت دیم و ۲/۸ میلیون هکتار آن کشت آبی است و متوسط عملکرد گندم دیم و آبی به ترتیب ۱۶۰۶ و ۳۸۹۲ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (Anonymous, 2025). بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای (Baghani et al., 2018) این سطح زیر کشت آبی، ۱۵۲۷۴ میلیون متر مکعب آب قابل استحصال کشور را به خود اختصاص می‌دهد، اهمیت بهبود بهره‌وری گندم در جایگاه و ارزش اقتصادی، معیشتی، غذایی، سطح زیر کشت و همچنین مقدار آب مورد

۱- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی آباد دزفول، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران (*- نویسنده مسئول: Email: Man_moayeri@yahoo.com)

۲- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی آباد دزفول، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران

۳- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

برآورد مقدار آب آبیاری و تعیین بهره‌وری آب آبیاری گندم توسط سامانه نیاز آب^۱ را با نتایج اندازه‌گیری این مزارع مقایسه و گزارش کردند که سامانه نیاز آب نتایج قابل قبولی در تعیین مقدار آب آبیاری و بهره‌وری آب گندم در سطح مزارع کشور برآورد می‌کند. استان خوزستان به همراه استان‌های هرمزگان، بوشهر، قسمت‌های جنوبی استان‌های فارس، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، کرمان و سیستان و بلوچستان، کرمانشاه و یزد، اقلیم گرم و خشک جنوب کشور را تشکیل داده که در محدوده جغرافیایی ۲۵ تا ۳۸ درجه عرض شمالی واقع شده‌اند و با وجود دشت‌های مستعد و منابع آب فراوان در بعضی از مناطق (خوزستان، فارس، کرمان و ...) انتظار می‌رود عملکرد و به تبع آن تولید گندم در این اقلیم بیش از مقدار فعلی (میانگین عملکرد ۳۰۴۰ کیلوگرم در هکتار) باشد. آب و هوای گرمسیری و خشک، زمستان‌های ملایم، بهار کوتاه و گرم، فصل گرم طولانی با حداکثر ۵۰ درجه سانتی‌گراد و حداقل ۵ - درجه سانتی‌گراد و حداکثر تعداد روزهای یخبندان کمتر از یک ماه از ویژگی‌های این اقلیم است (Esmailzadeh et al., 2020). بر اساس آمار نامه کشاورزی سال ۱۴۰۳-۱۴۰۲، سطح زیر کشت گندم آبی در استان خوزستان ۷۵۱ هزار هکتار و تولید گندم (تحویلی به سیلو) بیش از ۱۷۹۵ هزار تن است و از این جهت استان خوزستان بالاترین سطح زیر کشت و تولید گندم را در کشور به خود اختصاص داده است (Anonymous, 2025). متوسط بهره‌وری آب کاربردی در مزارع کشاورزان استان خوزستان حدود ۰/۸۴ (Moayeri, 2011b) و ۰/۹۲ (Baghani et al., 2018) گیلوگرم در متر مکعب آب (آبیاری و بارش مؤثر) گزارش شده‌است و طبق اندازه‌گیری‌های موردی در مزارع کشاورزان این متوسط می‌تواند به دو برابر ارتقا پیدا کند (Moayeri, 2011a). یکی از اهداف مهم کشاورزی پایدار بهینه‌سازی تولید براساس نهاده‌های محدود مانند آب است (Kang et al., 2002; Wojcik, 1990). این موضوع لزوم اجرای آزمایشاتی در زمینه بررسی روابط واقعی بین میزان آب مصرفی گیاه و عملکرد تولیدی (محصول استراتژیکی مثل گندم) را توجیه می‌کند. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که عملکرد می‌تواند با آب مصرفی کمتر، ثابت باقی‌مانده حتی کیفیت محصول نیز تا حدی افزایش یابد (Fapohunda et al., 1984; Kang et al., 2002; Siddique et al., 1989; Wojcik, 1990; Sammis & Smeal, 1983). سیاهپوش و ابراهیمیان (Siahpoosh & Ebrahimian, 2005) در سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۸۲ هشت رقم مختلف گندم استان فارس را با استفاده از روش آبیاری تک شاخه‌ای ارزیابی و گزارش کردند که معادله بین عملکرد دانه و تبخیر تعرق تابع توزیع خطی است. باغانی و همکاران (Baghani et al. 2003) در استان خراسان رضوی و همچنین کیانی

۲۰۰۴-۱۹۷۹ میلادی در سطح جهان نشان داد که متوسط شاخص بهره‌وری آب گندم، ۱/۰۹ و دامنه آن ۱/۷-۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب آب کاربردی بود (Zwart & Bastiaansen, 2004). فولی و همکاران (Foley et al., 2019) با استفاده از روش متاآنالیز، بهره‌وری آب مصرفی گندم (نسبت متوسط عملکرد به آب مصرفی گیاه یا نیاز آبی) ۶۸ سایت را در کشورهای مختلف تحلیل کردند در این بررسی گزارش شد که در نیمکره شمالی و در عرض‌های بالاتر، بهره‌وری آب مصرفی افزایش می‌یابد و در گروه‌بندی انجام شده سه طبقه بهره‌وری آب مصرفی کم (کوچک‌تر از ۰/۷۵ کیلوگرم در متر مکعب)، متوسط (از ۰/۷۵ تا ۱/۱۰ کیلوگرم در متر مکعب) و زیاد (بزرگ‌تر از ۱/۱۰ کیلوگرم در متر مکعب) معرفی کردند. در این مطالعه کشورهای امریکا، چین، مصر، ترکیه، هلند، مکزیک و فلسطین را دارای بالاترین مقادیر بهره‌وری آب مصرفی گندم و کشور ایران را بر اساس مطالعه واقفی و همکاران با میانگین بهره‌وری آب مصرفی گندم ۰/۹۴ کیلوگرم در متر مکعب در طبقه متوسط گزارش کردند (Ashraf: Foley et al., 2019). مقادیر بهره‌وری آب ۱۰ محصول زراعی انتخابی با استفاده از نتایج ۶۷ طرح تحقیقاتی انجام‌شده طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۶ در ایستگاه‌های تحقیقاتی ۱۳ استان کشور بررسی شد و میانگین بهره‌وری آب گندم، ۱/۶۲ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش شد (Montazar & Kosari, 2007). عزیزی‌زهان و همکاران (Azizizahan et al., 2014) با تعریف سه شاخص بهره‌وری کمی، اقتصادی و اشتغالی آب در تولید گندم، به بررسی شرایط مزارع گندم در سطح ایستگاه‌های تحقیقاتی ایران و جهان در یک دوره ۲۰ ساله از سال زراعی ۷۳-۱۳۷۲ تا ۹۳-۱۳۹۲ پرداختند. دامنه تغییرات نتایج آن‌ها در بهره‌وری آب کشاورزی برای محصول گندم بین ۰/۳ تا ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که غالب تکرارهای آن بین ۰/۶ تا ۱/۸ قرار داشته‌اند (Azizizahan et al., 2014). باغانی و همکاران (Baghani et al., 2018) با اندازه‌گیری مستقیم در ۲۴۱ مزرعه کشاورزان استان‌های خوزستان، فارس، خراسان رضوی، گلستان، اردبیل، کرمانشاه، قزوین، جنوب کرمان، سمنان، همدان، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی، تفاوت عملکرد، حجم آب مصرفی و شاخص بهره‌وری مصرف آب در تولید گندم در استان‌های مختلف را معنی‌دار گزارش کردند. در این بررسی بیشترین و کمترین عملکرد به‌ترتیب ۶۱۳۸ و ۴۲۲۶ کیلوگرم در هکتار در اقلیم نیمه‌خشک معتدل و نیمه‌خشک گرم و میانگین عملکرد گندم، حجم آب مصرفی، بهره‌وری مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب به اضافه بارش مؤثر ده ساله در سطح کشور به‌ترتیب ۵۱۷۱ کیلوگرم در هکتار، ۵۴۵۵ متر مکعب در هکتار و ۱/۰۱ و ۰/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کردند (Baghani et al., 2018). در ادامه این بررسی، ابراهیمی‌پاک و همکاران (Ebrahimipak et al., 2022)

مواد و روش‌ها

این آزمایش مزرعه‌ای باهدف مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ارقام تجاری گندم با استفاده از نوارهای خردشده^۱ در متن اصلی طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۲ اجرا شد. پنج تیمار مقدار آب آبیاری (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۵٪ نیاز آبیاری) با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای - نواری (تیپ) در کرت افقی و شش رقم تجاری گندم آزادگان، اوج، برات، جلال، داریون و مهرگان در کرت‌های عمودی بود. هر کرت خرد شده دارای طول ۶ متر با عرض ۴ پشته با فواصل ۶۱ سانتی‌متر بود. انتخاب روش آبیاری قطره‌ای نواری به‌عنوان ابزار یا روشی جهت اعمال یکنواخت با بازده آبیاری بالا و اطمینان از اعمال حجم یا عمق آبیاری تیمارها نسبت به سایر روش‌های آبیاری بود. نوارهای آبیاری (تیپ) با قطر ۱۶ میلی‌متر و فاصله قطره‌چکان ۱۰ سانتی‌متر با آبدهی ۱/۷ الی ۲/۱ لیتر در ساعت در فشار یک اتمسفر استفاده شد. بدین منظور در نیمه پاییز هر سال عملیات تهیه زمین مطابق عرف منطقه انجام گرفت سپس از خاک محل آزمایش تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری جهت تعیین برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌گیری به‌عمل آمده (جدول ۱) و بر اساس آزمون خاک کودهای شیمیایی تعیین، تقسیم و داده شد (به‌طور متوسط ۲۵۰ الی ۳۰۰ کیلوگرم اوره - ۵۰ کیلو پایه مابقی در سه قسط تا قبل از گلدهی، ۱۵۰ الی ۲۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل - پایه و ۵۰ الی ۹۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم - پایه). آب موردنیاز از شبکه آبیاری دز تأمین شد. کشت با ردیف‌کار آزمایشی غلات (سه خط روی پشته‌های با فواصل ۶۰ سانتی‌متری) و برای هر تیمار بر اساس وزن هزار دانه (برحسب ۴۰۰ دانه در متر مربع) در تاریخ ۱۸ الی ۲۱ آذر انجام گرفت. پس از کشت آبیاری‌های اول و دوم به‌صورت یکنواخت و با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ - به‌ازای هر پشته یک نوار) انجام و پس از استقرار گیاهچه‌ها، از آبیاری سوم به بعد تیمارهای آبیاری (مقادیر آبیاری) اعمال شد. در اعمال آبیاری‌ها سعی شد تا هیچ‌گونه رواناب ناشی از بیشتر بودن ریزش آب در مقایسه با نفوذ آب به خاک اتفاق نیفتاد. جهت کنترل علف‌های هرز باریک‌برگ و پهن‌برگ از سموم علف‌کش پوماسوپر و گرانستار به مقادیر ۱/۲ و ۲۰ گرم در هکتار در اواسط بهمن یا اوایل اسفندماه (قبل از شروع طویل شدن ساقه) استفاده شد. در طول فصل رشد ضمن ثبت مراحل رشد ارقام گندم نیاز آبی روزانه (ET_{ci}) با استفاده از روش تشتک تبخیر - (حاصل ضرب تبخیر روزانه تشتک تبخیر (E_{pi}) در ضریب تشتک (K_{pi}) و ضرایب گیاهی (K_{ci}) مراحل رشد گندم در معادله ۱) محاسبه (Allen et al., 1998) شد و در فواصل بارش‌ها و قبل از آبیاری‌های موردنیاز، رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری و برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس

و کلاته عربی (Kiani & Kalateharabi, 2012) در استان گلستان، به بررسی واکنش ارقام مختلف گندم نسبت به آب، پرداختند و گزارش کردند که عملکرد گندم تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و ارقام است و تغییرات عملکرد در برابر آب مصرفی (تابع تولید) ارقام مختلف از نوع درجه دوم است.

تا کنون هدف‌گذاری برنامه به‌نژادی در اقلیم گرم و خشک، ارزیابی پایداری فتوتیپی و تحلیل اثر متقابل فنوتیپ و محیط برای گزینش ارقام با ظرفیت عملکرد بالا، تحمل نسبتاً خوب به گرمای آخر فصل، زودرسی نسبی، مقاومت قابل‌قبول به بیماری زنگ زرد و قهوه‌ای و ریزش دانه بوده است (Esmaeilzadeh et al., 2020). در فعالیتهای به‌نژادی گندم و معرفی ارقام جدید ضروری است تا به شاخص بهره‌وری آب توجه خاص نمود در این خصوص طی ۱۵۰ سال فعالیت‌های به‌نژادی گندم دیم در استرالیا، بهره‌وری آب ارقام از ۲۰ کیلوگرم دانه در هکتار در ۱ میلی‌متر به مقدار ۲۴ کیلوگرم دانه در ۱ میلی‌متر رسیده است در این بررسی نیاز آبی یا آب مصرفی توسط گیاه، معادل مجموع کاهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه و در کل فصل رشد بود (Sadras & Lawson, 2013). عبدالرحمان (El-Rahman, 2009) در کشور مصر بهره‌وری آب کاربردی سه واریته گندم را در روش آبیاری قطره‌ای، متفاوت و برابر ۱/۲۰، ۱/۱۷ و ۱/۱۳ کیلوگرم دانه در متر مکعب آب گزارش کرد. معیری با هدف بررسی و کاهش تأثیر تنش‌های خشکی و گرمایی در پژوهشی سه ساله، شش رقم و لاین امیدبخش گندم دوروم و نان تحت آبیاری بارانی تک‌شاخه‌ای را بررسی کرد در این پژوهش سه ساله مشخص شد که بهره‌وری آب متأثر از رقم و مقدار آب بود و ارقام در بیش و کم آبیاری‌ها واکنش‌های متفاوتی داشتند (Moayeri, 2019). بالابردن عملکرد محصول و بهره‌وری آب تابع عوامل خاصی است که مهمتر از همه انتخاب و کشت ارقام اصلاح‌شده پر محصول با مقدار مصرف آب کمتر و همچنین مدیریت آبیاری منطبق با خصوصیات ارقام تجاری گندم بویژه در اقلیم گرم و خشک جنوب است. از این‌رو در این بررسی سطوح مختلف آب بر خصوصیات فیزیولوژیک منابع پَرظرفیت ژنتیکی گندم، ارزیابی و با تعیین تابع تولید هر رقم، معادله آب - عملکرد تعیین و توصیه‌های کاربردی در این خصوص ارائه می‌شوند. انتظار است نتایج این مطالعه بتواند از یک‌سو، راهگشای مطالعه بهره‌وری آب و اجزای متشکله آن در شرایط مزرعه برای محققین و به‌نژادگران و از سوی دیگر راهنمای مؤثری برای کشاورزان از نظر انتخاب ارقام مناسب برای مناطق مختلف با توجه به زمان بحران رطوبتی منطقه کشت آن‌ها باشد.

تحقیقات هواشناسی کشاورزی واقع در مزرعه محل اجرای آزمایش، به دست آمد. در برداشت نهایی بوته‌های ۴/۸ متر از هر کرت برداشت و وزن دانه و ماده خشک تولیدی تعیین شده با توجه به عملکرد، میزان آب آبیاری و بارش مؤثر در طول کل دوره رشد گندم، شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی آب تعیین شد.

در این بررسی بر اساس روش فائو حداکثر بارش مؤثر در عمق توسعه ریشه گیاه تعیین و در محاسبات استفاده شده است و بهره‌وری آب کاربردی (معادله ۴) که عبارت است از نسبت عملکرد دانه یا کل ماده خشک تولیدی (Y) بر مجموع بارش مؤثر (R_e) و آب آبیاری (I) و بهره‌وری آب مصرفی (معادله ۶) که عبارت است از نسبت عملکرد دانه یا کل ماده خشک تولیدی (Y) بر آب خالص مصرفی (ET_a) - معادله ۵) در هر تیمار/رقم محاسبه شدند. سپس مقایسه میانگین‌های عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب تیمارهای مختلف با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

$$Wp = \frac{Y}{(I+R_e)} \quad (4)$$

$$ET_a = I_n + R_e \quad (5)$$

$$CWP = 100 \times \frac{Y_a}{ET_a} \quad (6)$$

تعیین ضرایب معادله رگرسیون خطی و غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تجزیه کلاستر این مدل‌ها در محیط نرم‌افزار R انجام شد.

نیاز آبیاری متناسب شرایط آب‌وهوایی

در شکل ۱، تبخیر، نیاز آبی محاسباتی، بارش کل و نیاز آبیاری تجمعی (شرایط رطوبتی خاک بدون آبیاری) به همراه تغییرات رطوبت خاک (بیان رطوبتی خاک در تیمار آبیاری کامل) در عمق توسعه ریشه گیاه در تیمار آبیاری برابر نیاز آبی از جوانه‌زنی تا رسیدگی فیزیولوژیکی گندم هر دو سال نمایش داده شده است.

نیاز آبی با بیان روزانه (روز i ام) رطوبت خاک (S) برآورد شده (تدقیق محاسبات تغییرات روزانه عمق آب خاک (S_{i+1}) با منظور کردن بارش مؤثر روزانه (R_{ei}) در عمق توسعه ریشه در محیط نرم‌افزار اکسل (نمودار قرمز رنگ شکل ۱) در تیمار آبیاری کامل مقایسه شد (معادله ۳). بارش مؤثر عبارت بود از ۸۰ درصد بارش با شرط اینکه در عمق توسعه ریشه گیاه ظرفیت ذخیره وجود داشته باشد. اندازه‌گیری رطوبت خاک (تا چهار نوبت و هر نوبت حداقل دو نقطه) با استفاده از روش وزنی و با نمونه‌گیری توسط آگر و در اعماق متناوب ۱۵ سانتی‌متری تا عمق ۱۰۵ سانتی‌متری در تیمار آبیاری کامل انجام شد. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز از ایستگاه سینوپتیک/ تحقیقات هواشناسی کشاورزی صفی‌آباد واقع در مزرعه محل اجرای آزمایش، تهیه شد. بر اساس تفاضل آب در دسترس گیاه (ΔS) بین دو آبیاری، سطح سایه‌انداز بوته‌های گندم (P_s) و بازده کاربرد آب (E_a) حجم آب (نیاز آبیاری یا حجم ناخالص هر آبیاری - I_g) در معادله ۳ تیمارهای آبیاری (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد از I_g × مساحت نوار آزمایشی) با دور آبیاری حدود ۵ ± ۳۵ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر اعمال شد.

$$ET_{ci} = E_{pi} \times K_{pi} \times K_{ci} \quad (1)$$

$$S_{i+1} = S_i + I_{gi} + R_{ei} - ET_{ci} \quad (2)$$

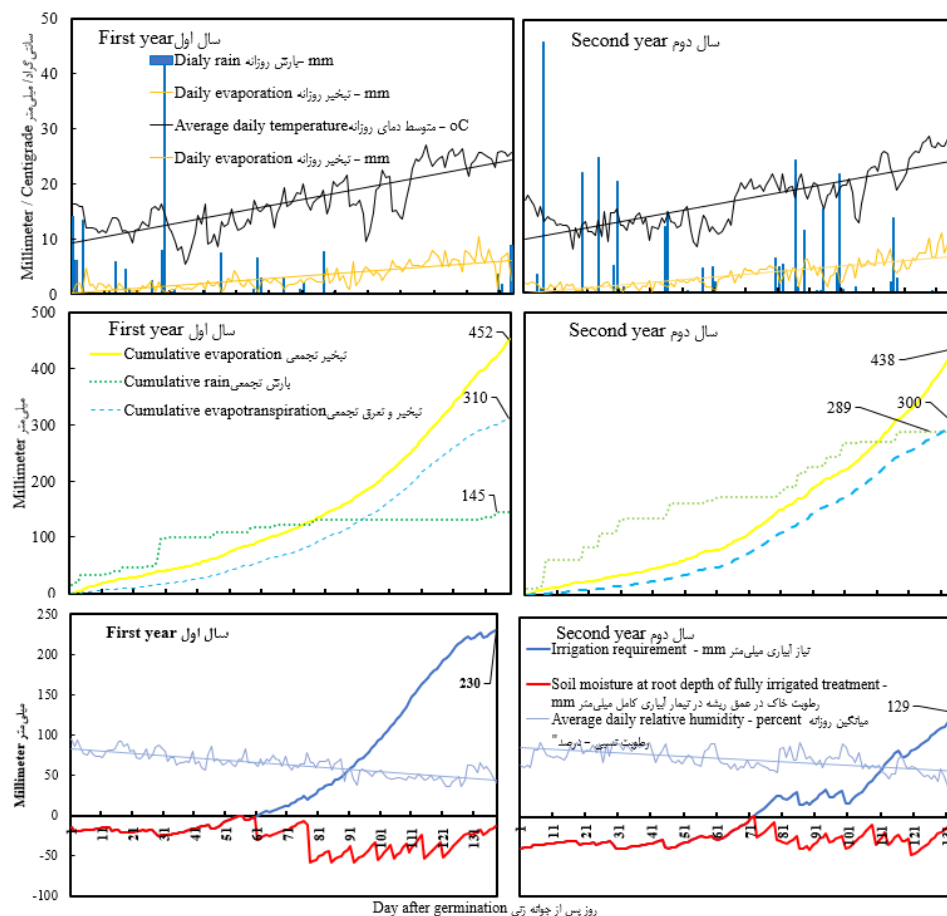
$$I_g = \frac{\Delta S}{E_a} \times [P_s + 0.15 \times (1 - P_s)] \quad (3)$$

در فواصل بارش‌ها و قبل از آبیاری‌های مورد نیاز، رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری و برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس نیاز آبی با بیان رطوبت خاک برآورد شده (تدقیق محاسبات تغییرات روزانه عمق آب خاک در عمق توسعه ریشه در محیط نرم‌افزار اکسل - نمودار قرمز رنگ شکل ۱) در تیمار آبیاری کامل مقایسه شد. اندازه‌گیری رطوبت خاک (تا چهار نوبت و هر نوبت حداقل دو نقطه) با استفاده از روش وزنی و با نمونه‌گیری توسط آگر و در اعماق متناوب ۱۵ سانتی‌متری تا عمق ۱۰۵ سانتی‌متری در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی انجام شد. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز از ایستگاه سینوپتیک/

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Some soil physical and chemical properties of the experiment field

عمق	بافت	کربن آلی	اسیدیته	شوری	جرم مخصوص ظاهری
Depth (cm)	Texture	Organic carbon (%)	PH	Electrical conductivity (dS/m)	Apparent specific gravity (cm ³ /gr)
0-20	Loam	0.73	7.59	3.0	1.59
20-40	Loam Silt & Loam	0.55	7.63	1.7	1.69
40-60	Loam Clay	0.28	7.58	1.8	1.69
60-80	Loam Clay Silt	0.23	7.66	1.8	1.60
80-100	Loam Clay Silt & Loam Clay	0.19	7.69	1.4	1.59



شکل ۱- تبخیر، بارش، نیازآبی و نیازآبیری تجمعی به همراه تغییرات رطوبت خاک تیمار شاهد

Figure 1- Evaporation, precipitation, evapotranspiration and cumulative irrigation requirement along with soil moisture changes in the control treatment

و در مجموع کل ۱۱ آبیاری انجام شد. بر اساس نیازآبی محاسبه شده به روش تشتک تبخیر نیازآبی گندم در این سال ۳۱۰ میلی‌متر بدست آمد که با توجه به بارش کل ۱۲۵ میلی‌متری نیازآبیری حدود ۲۴۸ میلی‌متر، در ۱۱ نوبت آبیاری برای مزرعه (۴۱۵ میلی‌متر آب کاربردی در تیمار برابر نیاز آبی) تأمین شد. در سال دوم نیز دو آبیاری برای جوانه زنی (۱۴۰/۹/۲۷) و استقرار بوته گندم انجام شد از خاکآب تا قبل از خوشه‌دهی حدود ۱۷۴ میلی‌متر بارش طی بیست روز متناوب بارانی ثبت شد و در وقفه بارش‌ها در ابتدای سنبله‌دهی دو آبیاری (روز ۷۲ ام پس از جوانه‌زنی به بعد) و از مرحله شیری شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی سه آبیاری و در مجموع هفت آبیاری (دو آبیاری جوانه‌زنی و استقرار بعلاوه پنج آبیاری از سنبله‌دهی تا رسیدگی) انجام شد. بر اساس نیازآبی محاسبه شده به روش تشتک تبخیر نیازآبی گندم در این سال ۳۰۰ میلی‌متر بدست آمد که با توجه به بارش کل ۲۸۹ میلی‌متری در دوره رشد گندم، نیازآبیری حدود ۱۲۹ میلی‌متر در ۷ نوبت آبیاری برای مزرعه (۳۷۳ میلی‌متر آب کاربردی در تیمار برابر نیاز آبی) تأمین شد. در سال‌های اول و دوم میزان تبخیر تجمعی در دوره رشد گندم

در هر دو سال آزمایش از ۶۰ الی ۷۰ روز پس از جوانه‌زنی که مصادف با انتهای دوره رشد رویشی و آغاز رشد زایشی گندم است شرایط آب‌وهوایی (افزایش دما و تبخیر روزانه و کاهش رطوبت نسبی) برای تنش رطوبتی مهیا شده است. آمار هواشناسی و ترسیم روند میانگین دما و تبخیر روزانه در طول دوره رشد گندم نشان از همسان بودن این دو پارامتر در هر دو سال داشت؛ اما میانگین رطوبت نسبی سال دوم در ابتدای فصل از جوانه‌زنی گندم به‌طور متوسط ۵ درصد بیشتر و در مراحل انتهایی تا رسیدگی دانه به حدود ۱۰ درصد رسید به‌عبارت‌دیگر سال دوم رطوبت نسبی ۵ الی ۱۰ درصد بیشتر از سال اول بود همچنین بارش مرحله انتهای از ساقه‌دهی تا رسیدگی گندم طی سال دوم بیشتر از سال اول بود.

طی سال اول برای جوانه‌زنی (۱۴۰۰/۹/۲۷) و سبز شدن مزرعه دو آبیاری با فواصل چهار روزه انجام شد و از مراحل رویشی جوانه‌زنی و استقرار بوته‌ها تا ساقه‌دهی، حدود ۱۱۲ میلی‌متر بارش فصلی اتفاق افتاد اما پس از آن و تا رسیدگی فیزیولوژیکی فقط ۱۳ میلی‌متر بارش ثبت شد با این توصیف (از روز ۶۶ ام پس از جوانه‌زنی به بعد) ۹ آبیاری

به ترتیب ۴۵۲ و ۴۳۷ میلی متر بود.

در شرایط اقلیمی دو سال اجرای آزمایش و بر اساس تجزیه واریانس انجام شده:

تجزیه واریانس مرکب دو سال آزمایش

نتایج تجزیه واریانس در صفات ماده خشک تولیدی، عملکرد دانه، شاخص های بهره‌وری آب کاربردی و آب مصرفی بر اساس ماده خشک تولیدی و عملکرد دانه در جدول ۲ ارائه شده است در تجزیه مرکب انجام شده اثرات سال، اثرات ساده آبیاری، رقم، اثرات مرکب سال در مقادیر آبیاری، اثرات سال در ارقام گندم (به جز در صفات ماده خشک تولیدی و بهره‌وری آب مصرفی - ماده خشک تولیدی)، اثرات آبیاری در رقم و همچنین اثرات سال در آبیاری در رقم در سطح یک یا پنج درصد دارای اختلاف معنی دار شدند. تیمارهای آبیاری تابع مقدار بارش ها و پراکنش مختلف (با نسبت آب مصرفی به نیاز آبی) اثرات متفاوتی داشتند به گونه ای که در سال اول تیمارهای آبیاری اعمال شده ۴۲، ۶۲، ۸۲، ۱۰۲ و ۱۲۲ درصد نیاز آبی و در سال دوم ۶۰، ۷۶، ۸۹، ۱۰۳ و ۱۱۷ درصد نیاز آبی بود.

صفات ماده خشک تولیدی، بهره‌وری آب کاربردی - ماده خشک تولیدی به ترتیب تحت تأثیر شرایط اقلیمی سالانه، مقادیر آبیاری متفاوت و سپس ویژگی های رقم، نتایج متفاوت با اختلاف معنی دار آماری داشتند.

در شاخص های بهره‌وری آب کاربردی و مصرفی بر اساس عملکرد دانه، ابتدا تحت تأثیر مقادیر آبیاری سپس ویژگی های ارقام و نهایتاً شرایط اقلیمی سالیانه اختلاف معنی دار آماری داشت.

با توجه نتایج تجزیه واریانس مرکب، تفاوت مقادیر آب تیمارهای آبیاری و عملکرد دانه آنها، اثر سال در میانگین صفت بهره‌وری آب کاربردی و آب مصرفی عملکرد دانه (به عنوان مهم ترین پارامتر انتخاب و توسعه) ارقام گندم در سطح یک در صد معنی دار شد. برای بررسی تغییرات عملکرد دانه و بهره‌وری آب مصرفی ارقام در تیمارهای آبیاری هر سال در شکل ۲ ارائه شده است.

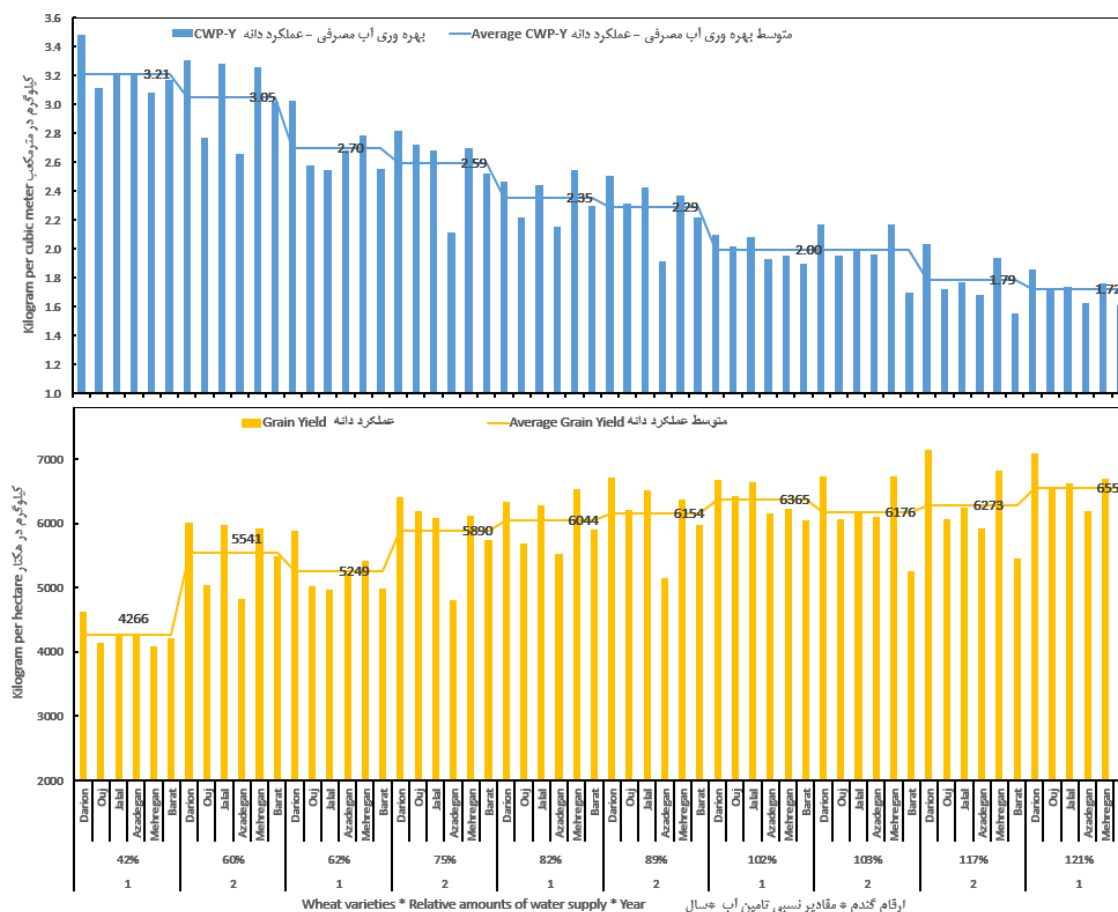
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مرکب دو سال

Table 2- Results of the two-year compound analysis of variance (mean square)

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد	وزن خشک زیست توده	بهره‌وری آب کاربردی - عملکرد	بهره‌وری آب کاربردی - ماده خشک	بهره‌وری آب مصرفی - عملکرد	بهره‌وری آب مصرفی - ماده خشک
S.O.V.	df	Yield	Biomass dry weight	Water productivity - Yield	Water productivity - Biomass	Crop water productivity - Yield	Crop water productivity - Biomass
سال Year	1	4366762**	316646167**	0.157**	21.156**	0.130**	13.795**
سال × تکرار Y*R	4	46574	967309	0.003	0.082*	0.005	0.149*
آبیاری Irrigation	4	13756765**	72746367**	2.078**	17.795**	10.587**	86.073**
سال × آبیاری Y*I	4	3765519**	18872569**	0.068**	0.935**	0.068**	0.893**
اشتباه Error	16	65992	269761	0.005	0.023	0.009	0.042
رقم Variety	5	3894307**	14005024**	0.341**	1.266**	0.598**	2.301**
سال × رقم Y*V	5	517455**	1079373	0.055**	0.131	0.095**	0.247
اشتباه Error	20	83599	708265	0.006	0.062	0.010	0.111
آبیاری × رقم I*V	20	228239**	1252455**	0.020**	0.136**	0.037**	0.274**
سال × آبیاری Y*I*V	20	237723**	1199224**	0.024**	0.114**	0.046**	0.214**
اشتباه Error	80	93541	448297	0.007	0.039	0.013	0.072
ضریب تغییرات CV (%)	-	5.23	4.28	4.84	4.19	4.81	4.23

ns, ** و * به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

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



شکل ۲- عملکرد دانه و بهره‌وری آب مصرفی - عملکرد دانه در تیمارهای مرکب دو سال
Figure 2- Grain yield and crop water productivity – yield in composite treatments of two year

از متوسط کل ارقام هر دو سال بالاتر بود.

آب مصرفی - عملکرد دانه ارقام

ضرایب تعیین منحنی‌های درجه دوی نسبت تأمین آب به عملکرد دانه ارقام به‌ترتیب در سال اول ۰/۹۱ الی ۰/۹۷، سال دوم ۰/۶۰ الی ۰/۸۱ و متوسط دو ساله ۰/۶۵ الی ۰/۹۰ بود (جدول ۳). نتایج تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تأمین آب ارقام گندم در مدل رگرسیون جدول ۳ و ضرائب متغیرها در معادله رگرسیون برای متغیر وابسته عملکرد دانه نشان داد که میزان نوسانات متغیر وابسته نسبت تأمین آب، ۶۵ الی ۹۰ درصد ($0.65 \leq R \leq 0.9$) نوسانات متغیر وابسته عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار را تبیین کردند. همچنین در تمامی ارقام، مدل رگرسیون انتخابی و ضرائب معادلات (A و B) در تبیین عملکرد دانه بر اساس نسبت تأمین آب، سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). از منحنی‌های متوسط دو ساله برای شناخت و بررسی

متوسط کل عملکرد ارقام در سال اول ۵۶۹۵ کیلوگرم در هکتار با بهره‌وری آب مصرفی ۲/۳۴ کیلوگرم دانه در متر مکعب و در سال دوم عملکرد با افزایش ۵ درصدی به ۶۰۰۷ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری با افزایش ۲ درصدی به ۲/۴۰ کیلوگرم دانه در متر مکعب رسید. در شکل ۲ مشاهده می‌شود که در ترتیب تیمارهای آبیاری و به‌ازای افزایش تأمین نسبی آب مصرفی گیاه از ۴۲ الی ۱۲۱ درصد، شاخص بهره‌وری آب مصرفی از ۳/۲۱ به ۱/۷۲ کیلوگرم در متر مکعب رسید اما میانگین عملکرد دانه کل ارقام در تیمار ۶۲ درصد تأمین نسبی آب در سال اول در مقایسه با تیمار ۶۰ درصد تأمین نسبی آب سال دوم کاهش حدود ۵ درصد داشت به نظر می‌رسد این افت عملکرد در دو تیمار آبیاری تقریباً مشابه به علت افزایش ۵ الی ۱۰ درصدی رطوبت نسبی هوا و بارش‌های در مرحله زایشی سال دوم نسبت به سال اول در این تیمارهای کم آبیاری باشد. در نمودارهای ترسیم شده مشهود است که میانگین صفات عملکرد دانه و بهره‌وری آب مصرفی به‌ترتیب در ارقام داریون، مهرگان و جلال

مقایسه‌ای ظرفیت تولید دانه، پایداری تولید در کم تا بیش آبیاری‌ها، تعیین نیاز آبی و خوشه‌بندی ارقام با استفاده از تجزیه کلاستر در محیط نرم‌افزار R بر اساس سه پارامتر نیاز آبی و ضرائب رگرسیون A و B انجام شد (شکل ۳). بر اساس تجزیه کلاستر انجام شده، در فاصله اقلیدسی (جذر مجموع مجذور تفاوت مقادیر ضرائب مدل رگرسیونی و درصد نیاز آبی) صفر به شش خوشه، صفر تا نیم به پنج خوشه، در فاصله نیم تا یک به چهار خوشه، در فاصله یک الی یک و نیم به دو خوشه و در فاصله ۴ به یک خوشه تقسیم‌بندی می‌شوند. تغییرات عملکرد دانه در تیمارهای برابر و بیشتر از نیاز آبی که به نظر می‌رسد ناشی از تفاوت بارش دو سال اجرای پروژه در مراحل رشد زایشی گندم بویژه در دو رقم برات و جلال بود ضرورت اصلاح این خوشه‌بندی براساس تأثیرپذیری عملکرد ارقام از شرایط متغیر آب هوایی سالانه در مشخص می‌کند.

متوسط عملکرد دانه در ارقام اوج و آزادگان به ترتیب حدود ± 200 و 6300 ± 100 کیلوگرم در هکتار با تأمین آب مورد نیاز ۴، درصد بیشتر نسبت به رقم مهرگان و داریون و از ۱۴ درصد بیشتر نسبت به رقم برات بود که در خوشه‌بندی کلاستر انجام شده در فاصله اقلیدسی یک الی یک و نیم به ترتیب با ظرفیت ۱۹/۹۰ و ۱۸/۴۳

کیلوگرم دانه در هکتار به ازای هر میلی‌متر آب مصرفی در یک خوشه آماری و در فواصل اقلیدسی کمتر از یک در دو خوشه متفاوت از هم قرار گرفتند. از کم آبیاری تا تأمین نیاز آبی کامل، رقم اوج عملکرد بالاتر و شیب منحنی عملکرد دانه- آب مصرفی تندتری نسبت به رقم آزادگان داشت (شکل ۴- A) از طرفی در سال دوم و مصادف با بارش‌های بویژه پایان فصل رشد، هر دو رقم کاهش عملکرد را داشتند و از این جهت رقم آزادگان، جزو ارقام حساس یا کاملاً حساس و رقم اوج، بین دو رقم جلال و مهرگان قرار گرفت.

در ارقام مهرگان و داریون با تأمین نیاز آبی به‌طور متوسط حدود ۱۰ درصد بیشتر از رقم برات و ۴ درصد کمتر از ارقام اوج و آزادگان به‌ترتیب متوسط عملکرد حدود 100 ± 6700 و 150 ± 7000 کیلوگرم بود. این دو رقم در خوشه‌بندی کلاستر انجام شده در فاصله اقلیدسی نیم الی یک (همراه رقم جلال) در یک خوشه آماری و در فواصل اقلیدسی کمتر از نیم در دو خوشه متفاوت از هم قرار گرفتند. با در نظر گرفتن کم‌بارشی سال اول آزمایش و بارش‌های پایان فصل رشد در سال دوم، رفتار عملکرد- آب مصرفی هر دو سال بسیار مشابه بود و از این جهت این ارقام محدودیت‌های بیش آبیاری را مثل ارقام اوج و آزادگان را ندارند.

جدول ۳- تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تأمین نیاز آبی در مدل رگرسیون دو ساله برای متغیر وابسته درصد تولید دانه ارقام گندم

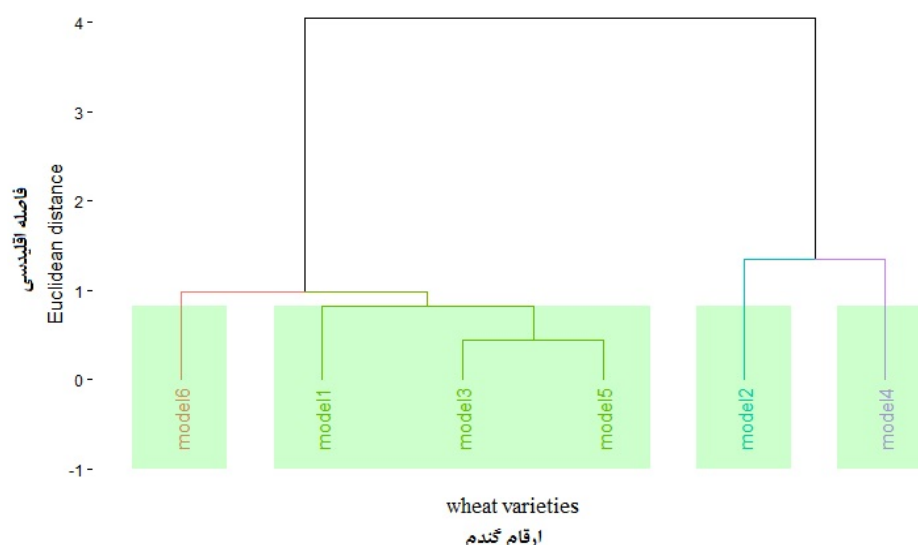
Table 3- Analysis of variance of the independent variable, percentage of wheat water requirement, in a two-year regression model for the dependent variable, percentage of grain yield of wheat varieties

خطای استاندارد	ضریب تعیین	خطای استاندارد ضرایب رگرسیون	رگرسیون ضرایب	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر	رقم گندم	مدل
Std. Error of the Estimate	R Square	Std. Error of Reg. Coe.	Regression Coefficients	Mean Square	d.f.	Sources of change	Wheat variety	Model
233.203	0.899	3.986	A 130.860**	2.046E8**	2	مدل Model	داریون	
		0.040	B -0.612**	54383	9	خطا Error	Darion	1
					11	کل Total		
247.306	0.898	4.227	A 116.436**	1.672E8**	2	مدل Model	اوج	
		0.042	B -0.534**	61160	9	خطا Error	Ouj	2
					11	کل Total		
312.496	0.834	5.341	A 125.979**	1.807E8**	2	مدل Model	جلال	
		0.053	B -0.607**	97653	9	خطا Error	Jalal	3
					11	کل Total		
383.123	0.672	6.548	A 107.959**	1.479E8**	2	مدل Model	آزادگان	
		0.065	B -0.486**	146783	9	خطا Error	Azadegan	4
					11	کل Total		
255.592	0.903	4.368	A 125.163**	1.884E8**	2	مدل Model	مهرگان	
		0.043	B -0.583**	65327	9	خطا Error	Mehregan	5
					11	کل Total		
344.148	0.658	5.882	A 123.315**	1.533E8**	2	مدل Model	برات	
		0.058	B -0.636**	118437	9	خطا Error	Barat	6
					11	کل Total		

ns, ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

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

$$Y = A \left(\frac{ET_a}{ET_c} \times 100 \right)^2 + B \left(\frac{ET_a}{ET_c} \right)$$



شکل ۳- دندروگرام خوشه‌بندی ارقام گندم بر اساس ضرایب مدل رگرسیونی و نیاز آبی

Figure 3- Clustering dendrogram of wheat cultivars based on regression model coefficients and Evapotranspiration

این آزمایش متوسط عملکرد حدود 200 ± 6100 کیلوگرم در تأمین آب مورد نیاز این رقم دست‌یافتنی است. این رقم تجاری کاهش عملکرد در کم‌آبیاری‌ها و بیش‌آبیاری‌های همسانی دارد. نکته حائز اهمیت در این رقم، نوسان عملکرد دو سال این آزمایش و کاهش نسبتاً شدید عملکرد در سال دوم که مصادف با بارش‌های بویژه پایان فصل رشد بود به نظر می‌رسد که این رقم در بیش‌آبیاری‌ها بویژه در مراحل زایشی حساس باشد. شیب منحنی متوسط دو ساله این رقم در کم‌آبیاری‌ها از میانگین ارقام این بررسی کمتر است و نشان از این دارد که برات پایداری عملکرد خوبی در کم‌آبیاری‌ها داراست و از این جهت در گروه ارقام متحمل به تنش کم‌آبی قرار می‌گیرد. رقم برات ظرفیت $21/19$ کیلوگرم دانه در هکتار به‌ازای هر میلی‌متر آب مصرفی را داشت و از این جهت نسبت به میانگین کل ارقام این بررسی بالاتر بود.

برای اجتناب از کاهش عملکرد، ارقام اوج، آزادگان، برات و جلال ناشی از بارش‌های پایان فصل رشد، به نظر می‌رسد که کشت خطی روی پشته و برنامه‌ریزی آبیاری با عمق خالص کم تا متوسط در مراحل رشد زایشی گندم مؤثر است.

مصرف بهینه آب در ارقام

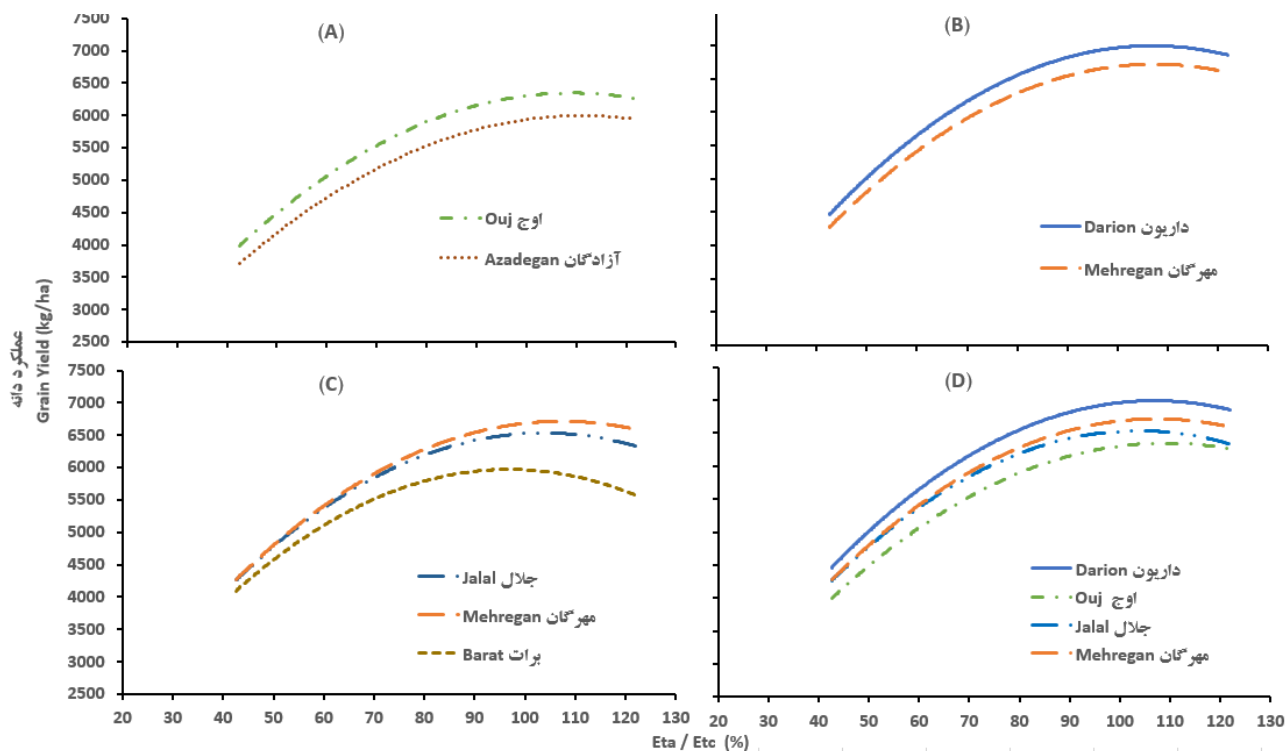
در شکل ۵ منحنی بدون بعد متوسط دو ساله تغییرات نسبت آب تأمین شده ارقام گندم به درصد تحقق عملکرد هر تیمار به مقادیر بیشینه بدست آمده در همان سال ترسیم شده‌است. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تأمین آب ارقام گندم و ضرایب متغیر وابسته عملکرد دانه در مدل رگرسیون (جدول ۴) نشان داد که میزان نوسانات متغیر وابسته نسبت تأمین آب، ۷۸ درصد ($R^2 \leq 0.78$)

نیاز آبی، رفتار عملکرد- آب مصرفی از کم تا بیش‌آبیاری موجب شد تا این دو در یک گروه قرار گیرند (شکل ۴- B) که البته عملکرد داریون همواره بیشتر از رقم مهرگان بود. شیب منحنی در کم‌آبیاری‌ها در این دو رقم نسبت به میانگین ارقام این بررسی بیشتر بود از این‌رو به نظر می‌رسد که ویژگی خاص این ارقام کاهش عملکرد شدیدتر در کم‌آبیاری‌ها نسبت به بیش‌آبیاری‌ها بود. ارقام مهرگان و داریون به‌ازای هر میلی‌متر آب خالص مصرفی به‌ترتیب با ظرفیت تولید $21/40$ و $22/38$ کیلوگرم دانه در هکتار از این حیث جزء ارقام برتر بودند ضمن اینکه در متوسط عملکرد دو ساله، از کم تا بیش‌آبیاری بین ارقام این بررسی داریون و مهرگان عملکرد بالاتری را نسبت به سایر ارقام داشتند (شکل ۴- D). رقم جلال در تأمین نیاز آبی به‌طور متوسط در حدود ۷ درصد بیشتر از رقم برات، متوسط عملکرد حدود 200 ± 6400 کیلوگرم تولید می‌کند. دو منحنی سالانه در کم‌آبیاری‌ها کمتر متأثر از بارش‌های فصلی اما در بیش‌آبیاری‌ها تحت تأثیر شرایط خشک و ترسالی قرار می‌گیرد (شکل ۴- D). شیب منحنی این رقم در کم‌آبیاری‌ها در حد رقم مهرگان و به لحاظ پایداری عملکرد در کم‌آبیاری تا تأمین نیاز آبی مشابه رقم مهرگان بود (شکل ۴- C) اما با کاهش نسبی عملکرد در سال دوم که مصادف با بارش‌های بویژه پایان فصل، به‌نظر می‌رسد که این رقم در بیش‌آبیاری‌ها بویژه در مراحل زایشی بین دو رقم حساس برات و متحمل مهرگان قرار گیرد (شکل ۴- C). رقم جلال ظرفیت $21/58$ کیلوگرم دانه در هکتار به‌ازای هر میلی‌متر آب مصرفی را داشت. و از این جهت جزء سه رقم برتر این بررسی شد.

نیاز آبی رقم برات به‌طور متوسط حدود ۱۰ درصد کمتر از میانگین ارقام نان مثل مهرگان و داریون است. بر اساس نتایج دو سال آزمایش

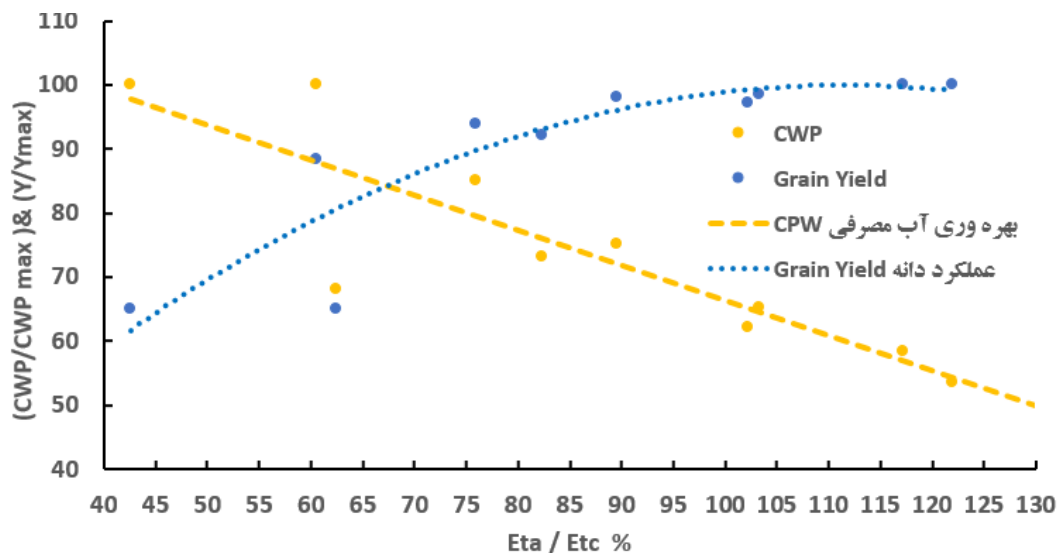
طبق این مدل، حداکثر تولید دانه در تیمار چهارم یا برابر نیاز آبی و به‌ازای کم یا بیش‌آبیاری، عملکرد کاهش می‌یافت.

نوسانات متغیر وابسته نسبت عملکرد دانه را تبیین کرد و نتایج مدل رگرسیون انتخابی و ضرایب معادله (A و B) در تبیین درصد تولید دانه بر اساس درصد تأمین آب، در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).



شکل ۴- مقایسه روند تغییرات نسبت تأمین آب به عملکرد دانه ارقام گندم

Figure 4- Comparison of trend Changes in the ratio of water supply to grain yield of wheat cultivars



شکل ۵- متوسط تغییرات نسبی عملکرد دانه و بهره‌وری آب به ازای درصد تأمین نیازآبی گندم

Figure 5- Average relative changes of grain yield and water productivity per percentage of supply wheat water requirement

جدول ۴- تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تامین نیاز آبی گندم در مدل رگرسیون برای متغیرهای وابسته

Table 4- Analysis of variance of the independent variable, percentage of wheat water requirement, in the regression model for dependent variables

خطای استاندارد	ضریب تعیین	خطای استاندارد ضرایب رگرسیون	ضرایب رگرسیون	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر	مدل	متغیر وابسته
Std. Error of the Estimate	R Square	Std. Error of Reg. Coe.	Regression Coefficients	Mean Square	d.f.	Sources of change	Model	Dependent Variables
6.347	0.781	0.108	1.793**	41006.9**	2	Model	$y = Ax^2 + Bx$	$Y_a \times 100 / Y_{max}$
		0.001	-0.008**	40.3	9	Error		
					11	Total		
8.3669	0.765	9.608	121.217**	1818.6**	1	Model	$y = ax + b$	$CWP \times 100 / CWP_{max}$
		0.108	-0.549**	70.0	8	Error		
					9	Total		

ns, ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

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

نیاز آبیاری ۱۲۹ میلی‌متر و تیمارهای آبیاری عملاً ۶۰، ۷۶، ۸۹ و ۱۰۳ درصد آب خالص را در اختیار گیاه قرار دادند. بروز شرایط محیطی متفاوت (در مراحل رشدی مؤثر شامل پنجه دهی، ساقه‌دهی، گل‌دهی و پرشدن دانه) دو سال، به‌ویژه رطوبت نسبی هوا، بارش‌های فصلی یا دمای روزانه هوا موجب تیمارهای متفاوت مقدار تامین آب شده، اثرات سال، سال در آبیاری، سال در ارقام و سال در آبیاری در رقم را معنی‌دار کرده است.

براساس تجزیه واریانس انجام شده عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری با اولویت‌های و ترتیب‌های مختلفی تحت‌تأثیر شرایط اقلیمی سالانه، مقادیر آبیاری و ویژگی‌های رقم، اختلاف معنی‌دار آماری در سطح یک و پنج درصد داشتند.

متوسط شاخص‌های بهره‌وری آب کاربردی بر اساس عملکرد دانه در تامین نیاز آبی ارقام در سال اول و دوم به‌ترتیب ۱/۵۳ و ۱/۶۶ کیلوگرم در متر مکعب بود که با انتخاب رقم و مدیریت کم‌آبیاری متناسب آن تا ۶۳ درصد قابل افزایش بود.

متوسط شاخص‌های بهره‌وری آب مصرفی بر اساس عملکرد دانه در تامین نیاز آبی ارقام در سال اول و دوم به‌ترتیب ۲/۰۰ و ۱/۹۹ کیلوگرم در متر مکعب بود که با اعمال کم‌آبیاری‌های متناسب هر رقم گندم نان از ۸۷ الی ۹۳ درصد قابل افزایش بود.

معادله تامین آب موردنیاز گیاه و عملکرد دانه از منحنی درجه‌دو تبعیت می‌کند و در کم و بیش آبیاری مزرعه نسبت به نیاز گیاه موجب خسارت در عملکرد می‌شود.

باهدف دستیابی به عملکرد دانه و بهره‌وری آب بهینه، بهترین توصیه کم‌آزاری در شرایط کمبود منابع آب در مناطق گرم جنوب کشور کاهش ۳۰ درصدی یا تامین ۷۰ درصد نیاز آبی گندم با قبول حدود ۱۵ درصد کاهش عملکرد دانه گندم است.

متوسط تغییرات نسبت بهره‌وری آب مصرفی به مقدار بیشینه در مقابل درصد تامین نیاز آبی متوسط دو سال که به‌صورت خطی رسم شده است (شکل ۵). نتایج تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تامین آب ارقام گندم در مدل رگرسیون و ضرایب متغیرها در معادله رگرسیون برای متغیر وابسته عملکرد دانه (جدول ۴) نشان داد که میزان نوسانات متغیر وابسته، ۷۶ درصد ($r \leq 0.76$) نوسانات متغیر وابسته را تبیین کرد. همچنین مدل رگرسیون انتخابی و ضرایب معادله (a و b) در تبیین درصد بهره‌وری آب مصرفی بصورت تابعی خطی از درصد تامین آب، در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). شیب خط متوسط دو سال منفی و معادل ۰/۵۵ (کاهش بهره‌وری به ازای افزایش آب مصرفی)، وابسته به شرایط اقلیمی بویژه بارش مؤثر در فصل رشد گندم و نیاز آبیاری هر سال زراعی است.

تقاطع منحنی تولید نسبی دانه گندم با خط بهره‌وری نسبی مصرف آب نشان‌دهنده مختصاتی است که به‌ازای آن می‌توان عملکرد دانه و بهره‌وری آب بهینه‌ای را از مزرعه گندم انتظار داشت. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در این دو سال اجرای آزمایش تامین نسبی آب خالص مصرفی به نیاز آبی در حد ۶۷ درصد با کاهش حدود ۱۶ درصدی در عملکرد دانه و بهره‌وری آب خالص مصرفی - عملکرد دانه محل تقاطع منحنی تولید دانه و بهره‌وری آب گندم نان است که برای کم‌آبیاری ملایم مزارع گندم قابل توصیه است.

نتیجه‌گیری

- در سال اول، نیاز آبی ۳۱۰ میلی‌متر، بارش کل ۱۴۵ میلی‌متر و نیاز آبیاری ۲۳۰ میلی‌متر و تیمارهای آبیاری عملاً ۴۲، ۶۲، ۸۲ و ۱۰۲ درصد آب خالص را در اختیار گیاه قرار دادند.
- در سال دوم، نیاز آبی ۳۰۰ میلی‌متر، بارش کل ۲۸۹ میلی‌متر و

به ازای هر میلی متر آب مصرفی در گزینش و معرفی ارقام جدید هدف گذاری (رسیدن به ارقام با ظرفیت تولید بالاتر از ۲۴ کیلوگرم تولید دانه در هکتار ما به ازای هر میلی متر آب خالص) و برنامه ریزی شود.

- هر ساله با توصیه های به روز شده، نیاز آبیاری مزارع اعلام شود
- لازمه این چنین توصیه ای کشت ارقام مختلف در مراکز تحقیقاتی در مناطق و قطب های تولید با نظارت محققین و متخصصین کشت و آشنا به مراحل رشد ارقام تجاری گندم است.

دستورالعمل فنی و توصیه ترویجی

- توسعه کشت رقم تجاری برات (که نیاز آبی کمتر و خسارت کمتر در تنش های خشکی دارد) در سال های با پیش بینی خشکسالی یا در مناطقی با احتمال بروز تنش آبی و همچنین مزارعی با عمق خاک زراعی کم یا دارای بافت سبک خاک می تواند خسارات ناشی از خشکسالی یا تنش های خشکی را به حداقل رسانده پایداری در تولید را تضمین کند.
- در سال های با احتمال وقوع بارش های بهاره بیشتر (بارش در فصل زایشی مزارع گندم) و همچنین دشت های کشاورزی با احتمال سطح ایستابی بالاتر (اما بدون محدودیت شوری)، کشت ارقام برات و آزادگان توصیه نمی شود.
- در سال های با احتمال وقوع بارش های بهاره بیشتر (بارش در فصل زایشی مزارع گندم) و همچنین دشت های کشاورزی با احتمال سطح ایستابی بالاتر (اما بدون محدودیت شوری)، کشت ارقام مهرگان و داریون و سپس جلال و اوج توصیه می شود.
- تأمین صد درصد نیاز آبی مزارع مهرگان و داریون توصیه می شود و بهتر است تا این ارقام در مزارعی کشت شود که در معرض تنش های آبی نباشند از این رو می بایست در مزارع با بافت خاک سبک یا مزارعی که عمق خاک زراعی کمی دارند از کشت آنها صرف نظر شود.
- باتوجه به تقارن فصل کشت گندم با بارش های فصلی و احتمال بیشتر نیاز به انجام آبیاری از اواخر رشد رویشی (انتهای راه رفتن) تا رسیدگی کامل، پیشنهاد می شود تا توصیه های مدیریت آبیاری (روش کاشت، روش و عمق آبیاری) متناسب بافت، تسطیح، شیب و طول زمین، عمق سطح ایستابی در مزرعه اعمال شوند (Moayeri, 2018).

- در بررسی رفتار ارقام گندم در تأمین آب مصرفی نسبت به نیاز آبی سالانه و تولید دانه در تأمین نیاز آبی و کم آبیاری های تا ۴۲ درصد نیاز آبی گروه های زیرمشخص شد:
- رقم برات، متحمل به خشکی و کم آبیاری با حساسیت بالا نسبت به سال های پربارش، به ویژه در مراحل زایشی رشد.
- ارقام مهرگان و داریون با نیاز آبی حدود ۱۰ درصد بیشتر از برات، متحمل به بیش آبیاری در مراحل رشد زایشی.
- رقم جلال با نیاز آبی حدود ۷ درصد بیشتر از رقم برات، در کم آبیاری کمتر اما در بیش آبیاری ها تحت تأثیر بارش های سالیانه قرار می گیرد.
- ارقام آزادگان و اوج با نیاز آبی حدود ۱۴ درصد بیشتر از رقم برات، حساس یا کاملاً حساس به بیش آبیاری در تر سالی ها،
- بر اساس نتایج دو سال اجرای این آزمایش، ارقام به بارش های از مرحله زایشی تا رسیدگی فیزیولوژیکی پاسخ های (عملکرد دانه) متفاوتی نشان دادند به نظر می رسد که در بیش آبیاری ها دوره زایشی، رقم آزادگان کاملاً حساس، رقم برات حساس، ارقام اوج و جلال نسبتاً حساس و ارقام مهرگان، داریون متحمل باشند.
- ارقام داریون و مهرگان از کم آبیاری تا بیش آبیاری برتر از ارقام این آزمایش بودند و در شرایط ترسالی ها به ویژه سال های با بارش پایان فصل رشد مناسب و قابل توصیه هستند.
- حداکثر تغییرات عملکرد دانه ارقام در تیمار برابر نیاز آبی در سال اول و دوم به ترتیب ۱۰ و ۳۰ درصد بود که نشان دهنده تفاوت معنی دار در ظرفیت تولید ارقام گندم تجاری موجود داشت، که با توجه به تفاوت های در نیاز آبی این ارقام، به طور متوسط، به ازای هر میلی متر آب مصرفی تولید ۱۸/۴۳ الی ۲۲/۳۸ (نوسان ۲۱ درصدی) کیلوگرم دانه در هر هکتار از داشتند.
- بررسی وضعیت آب و هوایی متغیر اراضی شمال استان خوزستان (محل برخورد دو توده هوای گرم و مرطوب جنوبی و کوهستانی شمالی) گویای این نکته اساسی است که ویژگی اقلیم گرم و خشک در تغییرات غیریپوسته در مراحل رشد گندم است این تغییرات در تبخیر، مقدار و پراکنش بارش، نیاز آبی و ... مراحل رشد این واقعیت را بیان می کند که برای دستیابی به تولید پایدار گندم و حصول بهره وری آب کاربردی در حد ظرفیت ارقام در اقلیم گرم جنوب می بایست:
- در فرآیند به نژادی گندم صفت کیلوگرم تولید دانه در هکتار

References

1. Anonymous. (2015). The program of the resistance economy for the production of basic products (the self-reliance plan for the production of wheat in the country) in the years 1404- 1394. Deputy of Agricultural Affairs of the Ministry of Jihad and Agriculture. Publications of the Ministry of Jihad and Agriculture. 28 pages. (In Persian)
2. Anonymous. (2025). Agricultural Statistics of 2023-2024. Ministry of Jihad for Agriculture, Deputy for Planning

- and Economy, Information and Communication Technology Office. Volume 1, Crops. 120 pp. (In Persian)
3. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome, 300*(9), D05109. <https://doi.org/10.32614/cran.package.meto>
4. Ashraf Vaghefi, S., Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Srinivasan, R., & Arnold, J.G. (2017). Modeling crop water productivity using a coupled SWAT-MODSIM model. *Water*, 9(3), 157. <https://doi.org/10.3390/w9030157>
5. Azizizahan, A., Shahabifar, M., Ebrahimi Pak, N.A., Razavi, R., Ghalibi, S., Saraie Tabrizi, M., Toloui, R. & Piri, R. (2014). Evaluation of water use efficiency of wheat in Iran and the world. First National Conference on Soil and Water Management in Wheat Production, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil and Water Research Institute. (In Persian). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.78.183>
6. Baghani, J., Hashemi, H., & Ghodsi, M. (2003). Investigation of the effects of irrigation deficiency on the quantitative and qualitative characteristics of wheat and determination of the production function in the sprinkler irrigation method. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 290. (In Persian with English abstract)
7. Baghani, J., Moayeri, M., Varjavand, P., Salamati, N., Eslami, A., Shahrokhnia, M.A., Kiani, A.R., Ghadami-Firoozabadi, A., Haqej-Moghaddam, A., Khosravi, H., Akhavan, K., Bahramlou, R., Naseri, A., Abbasi, F., Akbari, M., Abbasi, N., Mousavi-Fadl, S.H., Taifeh-Rezaei, H., Hosseinzadeh-Ajirlou, S., Ghafari, Z., Aghaei, M.J., Dehghanian, S.A., Yousef-Gomrakchi, A., Moghbal-Damane, A., Eslami, A.R., Nakhjavani-Moghaddam, M.M., & Nemati, Sh. (2018). Determining the water consumption of wheat in the country. Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 53636. (In Persian with English abstract)
8. Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Abbasi, F., & Baghani, J. (2022). Estimation of the actual amount of wheat irrigation water using the NIAZAB system and comparing with the farm measurement. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2075-2092. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346273.669328>
9. El-Rahman, A. (2009). Water use efficiency of wheat under drip irrigation systems at Al-Maghara area, North Sinai, EGYPT. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 34(3), 2537-2546. <https://doi.org/10.21608/jssae.2009.90464>
10. Esmaeilzadeh Moghaddam, M., Najafian, G., Mahmoudi, K., Akbari Moghaddam, H., Sayahfar, M., Tahmasebi, S., Aineh, G.L., Amir Bakhtiar, N., Farhadi Sadr, M., Abedini Esfahlani, M., Afshari, F., Dalvand, M., Zakeri, A.K., Tabatabaei, N.A., Yasaei, M., Roohparvar, R., & Kia, S. (2020). Khalil, a new bread wheat cultivar, for cultivation in southern warm and dry zone of Iran. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, 9(1), 79-88. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/rafhc.2021.125762.1189>
11. Fapohunda, H.O., Aina, P.O., & Hossain, M.M. (1984). Water use—Yield relations for cowpea and maize. *Agricultural Water Management*, 9(3), 219-224. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(84\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0378-3774(84)90004-0)
12. Foley, D.J., Thenkabail, P.S., Aneece, I.P., Teluguntla, P.G., & Oliphant, A.J. (2020). A meta-analysis of global crop water productivity of three leading world crops (wheat, corn, and rice) in the irrigated areas over three decades. *International Journal of Digital Earth*, 13(8), 939-975. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1651912>
13. Kang, S., Zhang, L., Liang, Y., Hu, X., Cai, H., & Gu, B. (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 55(3), 203-216. [https://doi.org/10.1016/s0378-3774\(01\)00180-9](https://doi.org/10.1016/s0378-3774(01)00180-9)
14. Kiani, A.R., & Kalateharabi, M. (2012). Effect of different amount of irrigation water on yield and water use efficiency of various wheat cultivars in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*, 16(3), 85-102. (In Persian with English abstract)
15. Kijne, J.W., Tuong, T.P., Bennett, J., Bouman, B.A.M. & Oweis, T. (2003). Ensuring food security via crop water productivity improvement. In: Background Papers-Challenge Program for Food and Water. CGIAR-IWMI, Colombo, Sri Lanka, pp. 1-42.
16. Moayeri, M. (2011a). Improving the efficiency of water use for wheat irrigation in a selected site in the south of Karkheh basin, final report of the research project. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 594. (In Persian with English abstract)
17. Moayeri, M. (2011b). Determining water use efficiency and evaluating effective factors in water use efficiency of wheat and corn irrigation in a selected site in the south of Karkheh basin. final report of the research project. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 39151. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1177/11786221241274019>
18. Moayeri, M. (2018). Water management and irrigation of wheat fields in Khuzestan Province. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Education and Extension Institute. Extension publication. No. 54101. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.1.10>

19. Moayeri, M. (2019). Determining the application model of irrigation water - wheat yield in the north of Khuzestan Province. final report of the research project. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 55785. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.1.10>
20. Montazar, A., & Kosari, H. (2007). Water productivity analysis of some irrigated crops in Iran. In *Proceedings of the international conference Water Saving in Mediterranean Agriculture & Future Research Needs. Italy*.
21. Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Condon, A.G., & Van Herwaarden, A. (2002). Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Science*, 42(1), 111-121. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1110>
22. Sadras, V.O., & Lawson, C. (2013). Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *European Journal of Agronomy*, 46, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.11.008>
23. Sammis, T.W., & Smeal, D. (1983). WRRI Report. No.179 January 1983.72 p.
24. Siahpoosh, M.R., & Ebrahimian, S.A. (2005). Evaluation of water use efficiency and its components as selection criteria in the production of drought-tolerant varieties in wheat breeding programs. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 455. (In Persian with English abstract)
25. Sharma, P.N., & Neto, F.B.A. (1986). Water production function of sorghum for northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, 11(2), 169-180. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(86\)90029-6](https://doi.org/10.1016/0378-3774(86)90029-6)
26. Siddique, K.H.M., Belford, R.K., Perry, M.W., & Tennant, D. (1989). Growth, development and light interception of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40(3), 473-487. <https://doi.org/10.1071/ar9890473>
27. Wójcik, S. (1990). Variability of biometric traits, yield and technological quality of sugarbeet under conditions of different nitrogen fertilization.
28. Zwart, S.J., & Bastiaanssen, W.G. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115-133. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>

Research Article

Vol. 39, No. 5, Dec. 2025-Jan. 2026, p. 515-527

Reducing Phosphorus Fertilizer Consumption and Increasing Sesame (*Sesamum indicum*) Yield by Using an Appropriate Variety in Calcareous Soils of Southern Fars

F. Nourgholipour^{1*}, M. Rajai²

1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: f.nourgholi@areeo.ac.ir)

2- Fars Province Agricultural and Natural Resources Research Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Darab, Iran

Received: 18 December 2025

Revised: 19 February 2026

Accepted: 28 February 2026

Available Online: 28 February 2026

How to cite this article:Nourgholipour, F., & Rajai, M. (2026). Reducing phosphorus fertilizer consumption and increasing sesame (*Sesamum indicum*) yield by using appropriate variety in calcareous soils of southern Fars. *Journal of Soil and Water*, 39(5), 515-527. (In Persian with English abstract).<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97072.1514>

Introduction

Phosphorus (P) is an essential nutrient for plant growth. In calcareous soils, the presence of calcium carbonate affects the availability of phosphorus to plants. Due to the special behavior of phosphorus and its low availability in calcareous soils of Iran, the need to identify crop varieties that are efficient in absorbing and utilizing this nutrient is vital. On the other hand, following the global fertilizer crisis and the sharp increase in input prices, focusing on efficient fertilization strategies has become an important priority. Among oilseed plants, sesame (*Sesamum indicum*) ranks fifth in the world and second in Iran in terms of oil production. Despite its economic importance, sesame has received less attention in phosphorus nutrition management studies. Therefore, this research was designed and implemented with the aim of providing a practical solution to improve yield per unit of phosphorus consumed, as a necessary step towards increasing farmers' profitability and strengthening the country's food security.

Materials and Methods

This study was conducted as a factorial experiment in a randomized complete block design at Darab Agricultural Research Station, Fars Province, for two years during the 2019 and 2020 growing seasons. Soil available phosphorus was below the optimal range and the irrigation system used was drip irrigation. The soil texture was relatively heavy, the percentage of soil organic carbon was low, and the equivalent calcium carbonate was high. The soil was non-saline and the amount of available phosphorus and zinc was insufficient. The irrigation water was non-saline. The treatments studied included five phosphorus levels (0, 5, 10, 15, and 20 kg ha⁻¹ of phosphorus from a triple superphosphate source with 20% phosphorus) and two sesame cultivars, Darab 14 and Darab 1. The phosphorus levels, along with 50% of nitrogen fertilizer, 50 kg ha⁻¹ potassium sulfate and 30 kg ha⁻¹ of zinc sulfate were applied before planting. The remaining required nitrogen fertilizer (50 kg ha⁻¹ of urea) was applied before flowering. At the harvest stage, yield and yield components, phosphorus and micronutrients concentrations in the grain were measured. Nutrient uptake in the grain, seed oil percentage, and phosphorus efficiency indices of the grain were also determined.

Results and Discussion



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.2026.97072.1514>

Based on the two-year average results, the grain and oil yield of the Darab 14 cultivar were 20.4% and 30.6% higher than those of the Darab 1 cultivar, respectively. The number of capsules per plant, the number of seeds per capsule, grain yield, and oil yield increased significantly up to the application level of 10 kg of phosphorus per hectare (by 23.5%, 20.4%, 42.7%, and 52.9%, respectively), although they showed no significant difference compared with the 5 kg P ha⁻¹ treatment. Therefore, for these cultivars, the application of 5 kg P ha⁻¹ is recommended in terms of grain and oil yield. Measurement of seed phosphorus concentration at different phosphorus levels indicated that a range of 0.25% to 0.28% can be considered as the seed phosphorus sufficiency threshold for these cultivars. Over the two-year average, the uptake of phosphorus, nitrogen, iron, manganese, and zinc was higher in Darab 14 than in Darab 1. The maximum uptake of nitrogen was recorded at 10 kg P ha⁻¹ (49.3 kg ha⁻¹), which was significantly different from the control treatment (36.3 kg ha⁻¹). However, with further increase in phosphorus application, the amount of nitrogen uptake decreased. The maximum uptake of iron occurred at 10 kg P ha⁻¹, but was not significantly different from the level of 5 kg P ha⁻¹. For the elements manganese, zinc, and copper, the maximum uptake was also recorded at 10 kg phosphorus/ha. Further increase in phosphorus application rate decreased the uptake of these elements. The uptake of zinc at 20 kg P ha⁻¹ decreased by about 4.9% compared to the control treatment. At all phosphorus application levels, Darab 14 outperformed Darab 1 in terms of grain yield, phosphorus uptake, and phosphorus use efficiency. Darab 14 produced a higher yield per unit of phosphorus applied compared to Darab 1. Sesame seed yield was positively and significantly correlated with seed phosphorus uptake (0.82**). Sesame is known for its strong root system and low nutrient requirements, but the present study showed that sesame's ability to uptake phosphorus is limited at this level of available phosphorus (8.2 mg kg⁻¹). Seed yield was significantly correlated with nitrogen uptake (0.82**), iron uptake (0.59**), manganese uptake (0.86**), zinc uptake (0.75**), and copper uptake (0.73**).

Conclusion

By cultivating phosphorus-deficiency tolerant cultivars such as Darab 14, along with minimal phosphorus fertilizer application (5 kg ha⁻¹ under the present experimental conditions), farmers can not only achieve optimal yield but also significantly enhance profitability and increase resource use efficiency in calcareous soils with phosphorus deficiency.

For farmers, grain yield is more important than oil yield because sesame seeds are purchased based on seed weight rather than oil content. This results in a more favorable profit-to-cost ratio based on the harvested seed weight.

Acknowledgements

This project was part of the National Project of the Soil and Water Research Institute. The cooperation of this institute, as well as the cooperation of the Darab Agricultural Research Station of Fars Province, and the General Directorate of Cotton and Oilseeds of the Ministry of Agricultural Jihad for providing project fundings gratefully acknowledged.

Keywords: Benefit-to-cost ratio, Efficiency, Oil, Phosphorus uptake, Yield components

کاهش مصرف کود فسفر و افزایش عملکرد کنجد با به کارگیری رقم مناسب در خاک‌های آهکی جنوب فارس

فریدون نورقلی پور^{۱*} - مجید رجایی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

چکیده

کمبود فسفر در خاک‌های آهکی، یکی از موانع اصلی تولید دانه‌های روغنی در ایران و مناطق نیمه‌خشک است. از طرفی کمبود جهانی کودهای فسفره و افزایش قیمت آن، تعیین راهبردهای مدیریتی کم‌هزینه و اقتصادی را ضروری می‌سازد. از این رو آزمایشی مزرعه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی به مدت دو سال (۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹) در منطقه داراب استان فارس روی دو رقم کنجد (داراب ۱۴ و داراب ۱) در پنج سطح فسفر (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل) در خاکی با فسفر قابل دسترس کم در سه تکرار اجرا شد تا رقم کارا برای جذب فسفر با عملکرد بهینه مشخص شود. عملکرد دانه و روغن، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، غلظت و جذب عناصر فسفر، نیتروژن، روی، آهن، منگنز و مس دانه، شاخص‌های کارایی مصرف فسفر، کارایی جذب فسفر، کارایی فسفر و نسبت سود به هزینه در ارقام محاسبه شد. بر اساس نتایج میانگین دوساله، عملکرد دانه و روغن داراب ۱۴ به ترتیب ۲۰/۴ و ۳۰/۶ درصد بیشتر از رقم داراب ۱ بود. تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، عملکرد دانه و عملکرد روغن تا سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به طور معنی‌داری افزایش یافت (به ترتیب ۲۳/۵، ۲۰/۴، ۴۲/۷ و ۵۲/۹ درصد) که البته با تیمار ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار، تفاوت معنی‌داری نداشت. بنابراین، برای این ارقام مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار از نظر عملکرد دانه و روغن قابل توصیه است. اندازه‌گیری فسفر دانه در سطوح مختلف فسفر نشان داد که می‌توان برای این ارقام غلظت ۰/۲۵ تا ۰/۲۸ درصد را به عنوان مقدار کفایت فسفر دانه در نظر گرفت. در میانگین دو سال، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز و روی در رقم داراب ۱۴ بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود. در تمامی سطوح فسفر مصرفی، رقم داراب ۱۴ از نظر عملکرد دانه، جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر نسبت به رقم داراب ۱ برتری داشت. رقم داراب ۱۴ نسبت به رقم داراب ۱ مقدار عملکرد بیشتری به ازای هر واحد فسفر مصرفی تولید کرد. نسبت سود به هزینه در رقم داراب ۱۴ بیشتر از داراب ۱ بود. در مجموع با کشت ارقام متحمل به کمبود فسفر همچون داراب ۱۴ همراه با مصرف حداقلی فسفر (۵ کیلوگرم فسفر در هکتار در شرایط آزمایش حاضر) می‌توان علاوه بر دستیابی به عملکرد بهینه، سودآوری و کارایی مصرف منابع را در خاک‌های آهکی دارای کمبود فسفر به طور چشمگیری افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: اجزای عملکرد، جذب فسفر، روغن، کارایی، نسبت سود به هزینه

مقدمه

می‌شود. علت اصلی این رویداد تشکیل ترکیبات فسفات کلسیم با خلالت بسیار کم در چنین خاک‌هایی است (Raiesi et al., 2022; Nourgholipour et al., 2022). این محدودیت در سطح وسیعی از اراضی زراعی ایران به گونه‌ای است که غلظت فسفر قابل دسترس در بسیاری از موارد، پایین‌تر از سطح بحرانی (۱۵ میلی گرم در کیلوگرم) گزارش شده است (Tehrani et al., 2012).

فسفر (P) از عناصر ضروری برای رشد گیاهان به شمار می‌رود (Raiesi et al., 2022). در خاک‌های آهکی، وجود کربنات کلسیم بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی تأثیر گذاشته (Taalab et al., 2019) و سبب کاهش قابلیت دسترسی عناصر به‌ویژه فسفر برای گیاهان

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

*- نویسنده مسئول: Email: f.nourgholi@areeo.ac.ir

۲- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، داراب، ایران

کمتر در مطالعات مدیریت تغذیه فسفر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، این پژوهش باهدف ارائه راهکاری عملی برای بهبود عملکرد در ازای هر واحد فسفر مصرفی، بهعنوان گامی ضروری در راستای افزایش سودآوری کشاورزان و تقویت امنیت غذایی کشور، طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی داراب، استان فارس (عرض جغرافیایی ۲۶° ۵۴' شمالی، طول جغرافیایی ۴۴° ۲۸' شرقی، ارتفاع ۱۰۸۰ متر از سطح دریا) اجرا شد. خاک مورد مطالعه در رده‌بندی سامانه طبقه‌بندی خاک وزارت کشاورزی ایالات متحده از تیپ Carbonatic, Hyperthermic Aridic Calcustepts بود. میانگین بارش سالانه منطقه کمتر از ۲۸۰ میلی‌متر است. رژیم رطوبتی منطقه خشک-یوستیک و رژیم حرارتی آن هایپرترمیک می‌باشد. میانگین دمای هوا در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر در سال اول آزمایش (۱۳۹۸) به‌ترتیب ۳۳/۵، ۳۳/۶، ۲۹/۷ و ۲۳/۹ و در سال دوم (۱۳۹۹) به ترتیب ۳۴/۳، ۳۳/۵، ۳۰/۲ و ۲۶ درجه سانتی‌گراد بود.

هر سال قبل از شروع آزمایش در ابتدای خرداد ماه نمونه‌برداری از خاک مزرعه انجام و خصوصیات خاک همچون قابلیت هدایت الکتریکی با هدایت‌سنج الکتریکی (Rhoades, 1982)، بافت خاک به‌روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، پی‌اچ در خمیر اشباع، کربنات کلسیم معادل (CCE) به‌روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک، کربن آلی به‌روش واکی بلاک (Nelson & Sommers, 1996)، فسفر قابل‌جذب به روش آبی آسکوربیک (Olsen & Sommers, 1982)، پتاسیم قابل‌دسترس (Sparks et al., 1996) و روی، مس، منگنز و آهن قابل استفاده به‌روش دی‌تی‌پی‌ا (Lindsay & Nortvell, 1987) اندازه‌گیری شد. همچنین خصوصیات آب چاه مورد استفاده در مزرعه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. آبیاری با نوار تیپ و دور آبیاری ۷ تا ۱۵ روز بود. به‌ترتیب در سال اول و دوم حجم کل آب مصرفی ۴۹۸۰ و ۵۰۶۰ متر مکعب بود. خصوصیات خاک و آب محل انجام آزمایش به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ذکر شده است.

در میان گیاهان دانه روغنی، کنجد (*Sesamum indicum*) از نظر تولید روغن در رتبه پنجم قرار دارد. سویا (*Glycine max* L.)، کلزا (*Brassica napus* L.)، آفتابگردان (*Helianthus annus* L.)، بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea* L.)، تخم پنبه و هسته نخل (palm kernel) در رتبه‌های بالاتری قرار دارند (Statista, 2023). سطح زیرکشت کنجد در ایران در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ مقدار ۵۸۱۷۵ هکتار و مقدار تولید دانه آن حدود ۶۱۶۲۷ تن بوده است (Anonymous, 2025).

بر اساس مطالعه انجام شده، کنجد حدود ۳۰ روز پس از کشت، فسفر کمی جذب می‌کند و پس‌از آن، نیاز گیاه به فسفر به سرعت افزایش می‌یابد. حداکثر نیاز گیاه به فسفر بین روزهای ۶۰ تا ۹۰ پس از کشت رخ می‌دهد. به‌طور کلی، برای تولید ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار دانه، کنجد به ۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ۱۴ کیلوگرم در هکتار اکسید فسفر و ۶۰ کیلوگرم در هکتار اکسید پتاسیم نیاز است (Ribeiro et al., 2019). نقش حیاتی فسفر بر عملکرد کنجد توسط محققین مختلفی گزارش شده است (Shehu et al., 2010 & 2014; Vora et al., 2018; Jat et al., 2020; Suchitha et al., 2021; Priyadarshini et al., 2021; Ibrahim et al., 2014; Arslan & Güre, 2018; Younis et al., 2020; Amare et al., 2019). مقدار بهینه فسفر خالص برای دستیابی به عملکرد مطلوب کنجد از ۲۵ تا ۸۰ کیلوگرم در هکتار متغیر است که این مقدار به مقدار فسفر قابل دسترس خاک بستگی دارد (Akhtar et al., 2015; Amare et al., 2019; Suchitha et al., 2021; Priyadarshini et al., 2021; Ibrahim et al., 2014; Arslan & Güre, 2018; Younis et al., 2020; El Mahdi, 2008). گیاهان در شرایط کمبود فسفر، سازوکارهای مختلفی را برای جذب فسفر اتخاذ می‌کنند (Korkmaz & Altıntaş, 2016). کارایی مصرف عناصر غذایی در گیاهان مختلف، با نوع عنصر، گونه‌ها/ارقام و محیط رشد مرتبط است (Adhikari et al., 2023).

با توجه به رفتار ویژه فسفر و زیست‌فراهمی پایین آن در خاک‌های آهکی ایران، شناسایی ارقام زراعی کارآمد از نظر جذب و استفاده از این عنصر، اهمیت به‌سزایی دارد. علاوه بر آن به‌دلیل بحران جهانی کود و افزایش شدید قیمت نهاده‌ها، تمرکز بر راه‌کارهای کوددهی کارآمد به یک اولویت ملی تبدیل شده است. گیاه کنجد باوجود اهمیت اقتصادی،

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical properties of the soil in experimental location

بافت Texture	Cu	Mn	Zn	Fe	P	K	OC	CCE	SP	EC	pH	سال Year
-			mg kg ⁻¹					%		dS m ⁻¹	-	
Silty loam	0.54	5.1	0.66	4.3	8.2	221	0.81	35	34	0.82	8.2	Year 1
Silty loam	0.41	4.3	0.51	5.6	8.5	230	0.76	32	36	0.86	8.1	Year 2

جدول ۲- نتایج تجزیه آب مورد استفاده در آزمایش
Table 2- Results of water analysis used in the experiment

SAR	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	pH	EC	سال Year
					meq l ⁻¹				-	dS m ⁻¹	
2.7	8.1	10.3	13.7	4.3	4.4	31.5	1.3	ناچیز Negligible	7.5	0.68	سال اول Year 1
2.77	7.2	9.9	14.9	5.1	4.8	30.5	1.2	ناچیز Negligible	7.2	0.78	سال دوم Year 2

استفاده از روش (Chapman & Pratt, 1962) و غلظت عناصر کم‌مصرف (میلی گرم بر کیلوگرم) با روش‌های استاندارد (Elmer & Conn, 1982; Walinga et al., 1989) اندازه‌گیری گردید. جذب عناصر غذایی در دانه نیز از طریق ضرب غلظت عنصر در عملکرد دانه محاسبه شد. درصد روغن دانه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج NMR (رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، بروکر، آلمان، سری ام کیو ۲۰) بر اساس روش استاندارد ISO ۱۰۵۶۵ (ISO organization, 1998) اندازه‌گیری شد. عملکرد روغن نیز از ضرب درصد روغن در عملکرد دانه، محاسبه گردید.

با استفاده از روش رز و ویسووا (Rose & Wissuw, 2012) با کارایی مصرف فسفر (PTE^۱) محاسبه شد (رابطه ۱). مقدار بالاتر PTE با تولید زیست‌توده بیشتر به ازای هر واحد جذب فسفر در گیاه مرتبط است. همچنین، کارایی جذب فسفر (PACE^۲) (رابطه ۲) و کارایی فسفر (PE^۳) (رابطه ۳) نیز مورد محاسبه قرار گرفتند (Nourgholipour et al., 2024).

کارایی فسفر یا نسبت عملکرد در حالت محدودیت به نسبت عملکرد در حالت کفایت، هر دو عامل کارایی در جذب و کارایی در مصرف فسفر را در نظر می‌گیرد.

کارایی مصرف فسفر (کیلوگرم بر کیلوگرم) = عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) / جذب فسفر (کیلوگرم در هکتار) در دانه (رابطه ۱)
کارایی جذب فسفر = جذب فسفر در تیمار شاهد (کیلوگرم در هکتار) / جذب فسفر (کیلوگرم در هکتار) در هر تیمار فسفر (رابطه ۲)
کارایی فسفر = عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) در تیمار شاهد

فسفر / عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) در هر تیمار فسفر (رابطه ۳)
$$PTE \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} = \text{grain yield (kg ha}^{-1}\text{)} / P \text{ uptake in grain (kg ha}^{-1}\text{)}$$

(۱)

$$PACE = P \text{ uptake in } P_0 \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} / P \text{ uptake in } P_{\text{treatment}} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}$$

(۲)

$$PE = \text{grain yield (kg ha}^{-1}\text{)} \text{ at } P_0 / \text{grain yield (kg ha}^{-1}\text{)} \text{ at } P_{\text{treatment}}$$

آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با ۳ تکرار در کرت‌هایی به مساحت ۱۰ متر مربع (با فاصله ردیف کاشت ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین دو بوته ۱۰ سانتی‌متر) و در دو سال در بازه ۱۳۹۸-۱۴۰۰ انجام شد. تیمارهای مورد بررسی شامل پنج سطح فسفر (سطوح ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص از منبع سوپر فسفات تریپل با ۲۰ درصد فسفر) و دو رقم کنگد بودند. ارقام کنگد مورد استفاده شامل داراب ۱۴ (رنگ بذر قهوه‌ای روشن، چند شاخه، شکوفا، ارتفاع بوته ۱۰۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر) و داراب ۱ (رنگ بذر قهوه‌ای روشن، چند شاخه، شکوفا، ارتفاع بوته ۱۵۰ تا ۱۳۰ سانتی‌متر) بودند که بذر این ارقام از مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. کشت به صورت دستی در سال اول در ۲۴ خرداد ماه و برداشت در ۲۱ مهر ماه انجام گرفت. برای سال دوم عملیات کاشت در ۲۰ خرداد ماه و برداشت در ۲۰ مهر ماه انجام گرفت.

کوددهی بر اساس آزمون خاک و دستورالعمل‌های مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای تغذیه کنگد انجام شد. ۵۰ درصد کود نیتروژن مصرفی (۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره)، مقادیر فسفر در هر تیمار، ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم و ۳۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی، پیش از کاشت مصرف شدند. پیش از مرحله گلدهی (مرحله رشد ۲/۰۱ بر اساس کد دو رقمی رشد زواره و همکاران (Zavareh et al., 2008)) باقی‌مانده کود نیتروژن مورد نیاز (۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره) مصرف شد. تنک کردن نیز در مرحله ۴ تا ۶ برگی انجام شد. برای کنترل علف‌های هرز، علف‌کش ترفلان به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار با استفاده از سم‌پاش پخش و پیش از کشت با خاک سطحی توسط دیسک سبک مخلوط شد.

عملیات برداشت در سال اول، ۱۲۰ روز و در سال دوم ۱۲۳ روز پس از کاشت انجام گرفت. در هر سال عملکرد دانه و اجزای عملکرد (تعداد کپسول در هر گیاه و تعداد دانه در هر کپسول) مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. برای تعیین غلظت نیتروژن، نمونه‌های گیاه هضم شدند و بر اساس تیتراسیون بعد از تقطیر توسط دستگاه کج‌دال مدل V40 اندازه‌گیری انجام شد (Lang, 1958). همچنین غلظت فسفر دانه (با

(۳)

تجزیه و تحلیل اقتصادی برای اندازه‌گیری‌های این مطالعه نیز انجام شد (Rehim et al., 2020, Kumar et al., 2017).

تحلیل آماری

تحلیل آماری ($p < 0.05$) با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج

عملکرد و اجزای عملکرد

جدول ۳ نشان می‌دهد که تیمارهای فسفر تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه و روغن و اجزای عملکرد (تعداد کپسول در هر بوته و تعداد دانه در هر کپسول) داشتند. همچنین عملکرد دانه و روغن به‌طور

معنی‌داری تحت تأثیر ارقام کنگد قرار گرفت. اثر متقابل سال $\times$ رقم بر عملکرد دانه و عملکرد روغن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر متقابل سال $\times$ سطوح فسفر و همچنین اثر متقابل سه‌گانه سال $\times$ رقم $\times$ سطوح فسفر بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد معنی‌دار نبود (جدول ۳).

عملکرد دانه رقم داراب ۱۴ در سال اول به‌طور معنی‌داری (۴۱/۷ درصد) بیشتر از رقم داراب ۱ بود، اما در سال دوم، تفاوت معنی‌داری بین دو رقم از نظر عملکرد دانه مشاهده نشد (جدول ۴). اثر متقابل رقم $\times$ سال بر عملکرد ممکن است به دلیل تفاوت در شرایط اقلیمی دو سال باشد که به رقم داراب ۱ کمک کرد تا در سال دوم عملکرد بیشتری تولید کند. روند مشابهی در رابطه با عملکرد روغن مشاهده شد به نحوی که عملکرد روغن رقم داراب ۱۴ در سال اول به‌طور معنی‌داری (۵۵/۹ درصد) از رقم داراب ۱ بیشتر بود. در میانگین دو سال، عملکرد دانه و روغن در رقم داراب ۱۴ به ترتیب ۲۰/۳ و ۳۰/۶ درصد بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده در رقم داراب ۱ بود (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر شاخص‌های عملکرد ارقام کنگد
Table 3- Composite analysis of variance for the studied treatments on the sesame cultivars yield parameters

منابع تغییر SOV	درجه آزادی df	تعداد کپسول در بوته Capsules per plant	تعداد دانه در کپسول Seeds in capsule	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد روغن Oil yield
سال Year (A)	1	5841**	1.29	34368 ^{ns}	275 ^{ns}
بلوک Block	2	81 ^{ns}	123*	108519*	41663**
Block بلوک در سال (year)	2	240	1.99	7603	135
رقم Cultivar (B)	1	8.07 ^{ns}	43.70 ^{ns}	582529**	238594**
A $\times$ B	1	2.40 ^{ns}	0.45 ^{ns}	473126**	102804**
P rate (C) مقدار فسفر	4	590**	185.50*	254158*	70569**
A $\times$ C	4	44.40 ^{ns}	3.70 ^{ns}	306905 ^{ns}	5346 ^{ns}
B $\times$ C	4	22.20 ^{ns}	76.80 ^{ns}	10221 ^{ns}	17459 ^{ns}
A $\times$ B $\times$ C	4	10.03 ^{ns}	0.93 ^{ns}	30537 ^{ns}	7004 ^{ns}
خطا Error	36	140	31.50	25421	6846
CV (%) ضریب تغییرات	-	15	9.30	15	17.5

علامت ** و * بیانگر معنی‌داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ^{ns} بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها.

** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference between the treatments

جدول ۴- تأثیر رقم و سال بر عملکرد دانه و روغن گیاه کنگد

Table 4- The influence of cultivar and year on the grain and oil yield of sesame

رقم Cultivar	عملکرد دانه Grain yield			عملکرد روغن Oil yield		
	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹		
	Year1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean
Darab 1 داراب ۱	900 b	1030 a	965 b	372 c	450 b	411 b
Darab 14 داراب ۱۴	1275 a	1050 a	1162 a	580 a	493 b	537 a

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشابه هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

The means in each column with the same statistical letters are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test.

معنی‌داری تشکیل اندام‌های زایشی را کاهش داده و در نتیجه عملکرد و اجزای عملکرد را کم می‌کند (Nourgholipour et al., 2022). وضعیت تولید کپسول در گیاه به‌عنوان یک شاخص مهم مرتبط با عملکرد دانه در نظر گرفته می‌شود (Jan et al., 2014) و تحت مدیریت تغذیه بهینه و افزایش محتوای فسفر قابل‌دسترس خاک، به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Iqbal et al., 2023). فسفر از طریق مسیرهای مختلف می‌تواند عملکرد دانه و روغن را بهبود بخشد (Wei et al., 2015; Da Silva et al., 2015).

محتوای فسفر و سایر عناصر غذایی دانه

تیمارهای مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری بر جذب فسفر و سایر عناصر غذایی شامل نیتروژن، آهن، روی، منگنز و مس داشتند (جدول ۶). اثر متقابل سال $\times$ رقم بر جذب نیتروژن، فسفر، آهن، روی، منگنز و مس دانه معنی‌دار بود (برای نیتروژن، فسفر، روی، منگنز و مس در سطح احتمال ۱ درصد و برای آهن در سطح احتمال ۵ درصد). اثر متقابل سال $\times$ سطوح فسفر، سطوح فسفر $\times$ رقم و همچنین اثر متقابل سه‌گانه سال $\times$ رقم $\times$ سطوح فسفر بر جذب عناصر غذایی، معنی‌دار نبود (جدول ۶).

در سال اول مطالعه، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز، روی و مس در رقم داراب ۱۴ به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود (جدول ۷). در سال دوم، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز، روی و مس بین دو رقم تفاوت معنی‌داری نداشت. در میانگین دو سال، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز و روی در رقم داراب ۱۴ بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود (جدول ۷). منابع علمی بیان می‌کنند که ارقام کنگد به‌دلیل تفاوت‌های ژنتیکی، توانایی متفاوتی برای جذب عناصر غذایی دارند (Wei et al., 2015).

مقایسه میانگین اثر اصلی فسفر بر عملکرد دانه، اجزای عملکرد و عملکرد روغن کنگد در جدول ۵ آورده شده است. با افزایش فسفر مصرفی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، عملکرد دانه و عملکرد روغن تا سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (به‌ترتیب ۲۳/۵، ۲۰/۴، ۴۲/۷ و ۵۲/۹ درصد) که البته با تیمار ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار تفاوت معنی‌داری نداشت. مصرف بیشتر فسفر، افزایش معنی‌داری در پاسخ‌های گیاهی یاد شده نسبت به سطوح ۵ و ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار ایجاد نکرد (جدول ۵). با توجه به نتایج به‌دست آمده، برای این ارقام و در شرایط آزمایش حاضر مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار از نظر عملکرد دانه و روغن به‌عنوان سطح بهینه قابل توصیه است.

علائم کمبود فسفر و کاهش عملکرد در خاک‌هایی با غلظت فسفر قابل‌دسترس کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم شایع است (Shehu et al., 2010 & 2014; Vora et al., 2018; Jat et al., 2020; Suchita et al., 2021; Priyadarshini et al., 2021; Ibrahim et al., 2014; Arslan & Gür, 2018; Younis et al., 2020). بنابراین افزایش عملکرد با مصرف فسفر در خاک محل انجام آزمایش به‌دلیل غلظت ناکافی فسفر قابل‌دسترس خاک (به‌ترتیب ۸/۲ و ۸/۵ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک برای سال اول و دوم) می‌باشد. عدم تغییر اجزای عملکرد و کاهش عملکرد دانه و روغن در تیمارهای فراتر از ۱۰ کیلوگرم در هکتار فسفر می‌تواند به‌دلیل برهمکنش منفی فسفر با سایر عناصر غذایی باشد (Colmer et al., 1995).

کنجد در مقایسه با سایر دانه‌های روغنی مانند گلرنگ، محتوای روغن بالاتری دارد. در کنار عامل ژنتیکی، عملکرد روغن به‌طور قابل توجهی با مدیریت کوددهی مرتبط است. تغذیه بهینه با فسفر، می‌تواند تولید اسیدهای چرب و در نتیجه تولید روغن را بهبود بخشد (Gao et al., 2025; Kumari & Saritha, 2017). کمبود فسفر به‌طور

جدول ۵- اثر اصلی مقادیر مختلف فسفر بر شاخص‌های عملکرد کنگد

Table 5- The main effects of different P rates on yield parameters of sesame

مقدار فسفر P rate kg ha ⁻¹	تعداد کپسول در بوته Capsules per plant	تعداد دانه در کپسول Seeds in capsule	عملکرد دانه Grain yield kg ha ⁻¹	عملکرد روغن Oil yield kg ha ⁻¹
0	68 b	54 b	871 d	376 d
5	75 ab	60 a	1115 ab	522 ab
10	84 a	65 a	1243 a	575 a
15	83 a	62 a	1072 bc	458 bc
20	83 a	60 a	979 cd	439 cd

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشابه هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

The means in each column with the same statistical letters are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test.

جدول ۶- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر جذب برخی از عناصر غذایی در دانه ارقام کنجد

Table 6- Composite analysis of variance for the studied treatments on the sesame nutrient uptake

منابع تغییر	df	جذب فسفر P uptake	جذب نیتروژن N uptake	جذب روی Zn uptake	جذب منگنز Mn uptake	جذب آهن Fe uptake	جذب مس Cu uptake
SOV							
سال Year (A)	1	1.19*	296*	282**	875*	3801 ^{ns}	20.8 ^{ns}
بلوک Block	2	0.4 ^{ns}	228*	219**	4902*	289551**	120**
Block(year)	2	0.22	39	4	316	55578	43
Cultivar (B)	1	3.74**	1115**	576**	10186**	88355*	65 ^{ns}
A × B	1	4.6**	956**	462**	7567**	79373*	221**
P rate (C)	4	2.6**	422**	295**	3836**	83901**	120**
A × C	4	0.21 ^{ns}	53 ^{ns}	72 ^{ns}	459 ^{ns}	13765 ^{ns}	15 ^{ns}
B × C	4	0.18 ^{ns}	40 ^{ns}	31 ^{ns}	313 ^{ns}	2885 ^{ns}	28 ^{ns}
A × B × C	4	0.2 ^{ns}	52 ^{ns}	17 ^{ns}	492 ^{ns}	4289 ^{ns}	13 ^{ns}
Error	36	0.24	52	37.4	433	11221	22
CV (%)	-	17	17	19	16	19	23

علامت *** و * بیانگر معنی داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ^{ns} بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین تیمارها.

** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference between the treatments.

جدول ۷- تأثیر رقم و سال بر جذب عناصر غذایی در دو رقم کنجد

Table 7- The influence of cultivar and year on N, P, and Mn uptake of two sesame cultivars

رقم Cultivar	N uptake			P uptake			Mn uptake		
	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹			g ha ⁻¹		
	Year 1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean
Darab 1	38 b	41 b	39.4 b	2.50 b	2.77 b	2.64 b	108 c	123 bc	116 b
Darab 14	54 a	42 b	48 a	3.55 a	2.72 b	3.13 a	157 a	127 b	142 a
Cultivar	Fe uptake			Cu uptake			Zn uptake		
	g ha ⁻¹			g ha ⁻¹			g ha ⁻¹		
	Year 1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean	Year 1	Year 2	Mean
Darab 1	482 b	538 b	510 b	18 b	21 ab	19.8 a	28 b	29 b	28.8 b
Darab 14	631 a	542 b	587 a	24 a	19 b	21.9 a	40 a	30 b	35 a

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشابه هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی دار هستند.

The means in each column with the same statistical letters are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test.

۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار حاصل شد که با مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۵)، می‌توان برای این ارقام غلظت ۰/۲۵ تا ۰/۲۸ درصد را به عنوان مقدار کفایت فسفر دانه در نظر گرفت (جدول ۸).

مقایسه میانگین اثر اصلی فسفر بر غلظت فسفر دانه و جذب عناصر غذایی مورد مطالعه در جدول ۸ آورده شده است. غلظت فسفر در دانه با افزایش مصرف فسفر تا سطح ۵ کیلوگرم در هکتار افزایش معنی داری یافت، اما در این رابطه بین سطوح فسفر تفاوت معنی داری مشاهده نشد (جدول ۸). با عنایت به اینکه بیشترین عملکرد دانه و روغن در سطح

جدول ۸- اثر اصلی تیمارهای فسفر بر غلظت فسفر و جذب عناصر غذایی فسفر، نیتروژن، آهن، مس و منگنز

Table 8- The effect of the P treatments on P concentration and nutrients uptake of P, N, Fe, Zn, Cu, and Mn

مقدار فسفر P rate	غلظت فسفر P concentration		جذب Uptake				
			P فسفر	N نیتروژن	Mn منگنز	Fe آهن	Cu مس
			kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	g ha ⁻¹	g ha ⁻¹	g ha ⁻¹
0	0.247b		2.16 c	36.3 c	107 d	433 b	16 c
5	0.252 a		2.81 b	49.3 a	144 ab	611 a	22 ab
10	0.280 a		3.48 a	49.7 a	149 a	624 a	24 a
15	0.283 a		3.03 b	43.8 ab	129 bc	586 a	22 ab
20	0.298 a		2.92 b	39.4 bc	115 cd	488 b	19 bc

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشابه هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی دار هستند.

The means in each column with the same statistical letters are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test.

غذایی شناخته می‌شود، اما مطالعه حاضر نشان داد که توانایی کنگد در جذب فسفر در این سطح از فسفر قابل دسترس ($8/2$ میلی گرم بر کیلوگرم) محدود است. عملکرد دانه همبستگی معنی داری با جذب نیتروژن ($0/82^{**}$)، جذب آهن ($0/59^{**}$)، جذب منگنز ($0/86^{**}$)، جذب روی ($0/75^{**}$) و جذب مس ($0/73^{**}$) داشت.

شاخص‌های جذب و کارایی فسفر

میانگین دو ساله عملکرد دانه، جذب فسفر و شاخص‌های کارایی فسفر در جدول ۹ نشان داده شده است. در تمامی سطوح فسفر مصرفی، داده‌ها بیانگر برتری رقم داراب ۱۴ از نظر عملکرد دانه، جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر، نسبت به رقم داراب ۱ بود. به عبارتی، رقم داراب ۱۴ نه تنها عملکرد بیشتری نسبت به رقم داراب ۱ داشت بلکه توانایی بیشتری در جذب فسفر و مقدار عملکرد تولیدشده به ازای هر واحد فسفر مصرفی داشت. با افزایش مقدار فسفر مصرفی، کارایی مصرف فسفر به طور قابل توجهی کاهش یافت (جدول ۹). چنین رویدادی در گیاه کلزا نیز مشاهده شده است (Nourgholipour et al., 2019). استفاده از کارایی مصرف فسفر به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای تفکیک ارقام کلزا در برخی مطالعات مورد توجه قرار گرفته است (Hu et al., 2015; Chen et al., 2010). کاهش کارایی مصرف فسفر در کرت‌هایی که کود فسفر دریافت کردند در مقایسه با شاهد، به این معنی است که این تیمارها، عملکرد زیست توده خشک کمتری به ازای هر واحد فسفر مصرفی، تولید نمودند (Akhtar et al., 2009). در رابطه با کارایی مصرف فسفر در نظر گرفتن این نکته ضروری است که این شاخص می‌بایست عمدتاً در محدوده غلظت عناصر غذایی کمتر از حد بهینه در گیاه مورد اندازه‌گیری قرار گیرد (Santa-Maria et al., 2015).

بیشینه جذب فسفر در دانه در سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار ثبت شد که در مقایسه با تیمار شاهد، افزایشی حدود $61/1\%$ داشت (جدول ۸). تغییرات در ساختار ریشه و ترشحات ریشه ممکن است به عنوان واکنش‌های احتمالی مرتبط با افزایش جذب فسفر تحت سطوح ۰ تا ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار در نظر گرفته شوند (Hunter et al., 2014). همچنین، به دلیل غلظت کم فسفر قابل دسترس در خاک اولیه که کمتر از ۱۵ میلی گرم در کیلوگرم بود، پاسخ گیاه به کاربرد فسفر مورد انتظار بود. اگر گیاهی در خاک با محتوای فسفر کم، رشد و توسعه بهینه داشته باشد، کوددهی با سطوح بالاتر هم منابع را هدر می‌دهد و هم به کیفیت و سلامت خاک و محیط زیست آسیب می‌رساند. افزایش مصرف فسفر از ۱۰ به ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، باعث افزایش جذب این عنصر نشد که ممکن است با برهمکنش فسفر و سایر عناصر غذایی در ارتباط باشد (Colmer et al., 1995).

تیمارهای فسفر مورد مطالعه، جذب نیتروژن، آهن، منگنز، روی و مس در دانه را نیز به طور معنی داری تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۸). بیشینه جذب نیتروژن در سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار ($49/7$ کیلوگرم در هکتار) ثبت شد که با تیمار شاهد ($36/3$ کیلوگرم در هکتار)، تفاوت معنی داری داشت ولی تفاوت معنی داری با سطح ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار نداشت. با افزایش بیشتر مصرف فسفر، مقدار جذب نیتروژن کاهش یافت. بیشینه جذب آهن، منگنز، روی و مس در سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار رخ داد، اما با سطح ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار، تفاوت معنی داری نداشت. افزایش بیشتر میزان مصرف فسفر، جذب این عناصر را کاهش داد (جدول ۸). با عنایت به نتایج به دست آمده، مقدار ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار برای جذب بهینه عناصر غذایی قابل توصیه است.

عملکرد دانه کنگد همبستگی مثبت و معنی دار با جذب فسفر دانه داشت ($0/82^{**}$). کنگد با سیستم ریشه‌ای قوی و نیاز کم به عناصر

جدول ۹- میانگین دو ساله کارایی مصرف فسفر (PUTE)، کارایی جذب فسفر (PACE) و کارایی فسفر (PE) متأثر از سطوح فسفر و ارقام کنگد

Table 9- Two-year mean of Phosphorus Acquisition Efficiency (PACE), Phosphorus Utilization Efficiency (PUTE), and Phosphorus Efficiency (PE) as influenced by phosphorus levels and sesame cultivars

رقم Cultivar	مقدار فسفر P rate	عملکرد دانه Grain yield	جذب فسفر P uptake	PUTE	PACE	PE
داراب ۱ Darab 1	0	819	2.07	396	-	-
	5	1067	2.71	393	0.76	0.77
	10	1122	3.15	356	0.66	0.73
	15	958	2.61	368	0.79	0.86
	20	875	2.63	332	0.79	0.94
داراب ۱۴ Darab 14	0	923	2.24	412	-	-
	5	1243	3.06	406	0.73	0.74
	10	1363	3.75	363	0.60	0.68
	15	1186	3.42	347	0.66	0.78
	20	1097	3.20	343	0.70	0.84

دارد و ممکن است بسته به شرایط حاکم تغییر کند. کشاورزان در هدف زراعی خود به کارایی اقتصادی توجه می‌کنند و اغلب محصول آن‌ها بر اساس وزن دانه و نه بر اساس ویژگی‌های کیفی محصول تولیدشده مانند درصد روغن دانه، قیمت‌گذاری می‌شود. بنابراین، کشاورزان نسبت سود به هزینه عملکرد دانه را انتخاب خواهند کرد. در این شرایط، رقم داراب ۱۴ کتجد با مصرف ۵ تا ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار (بسته به شرایط قیمت) گزینه بهتری خواهد بود.

• BCR (درآمد خالص تقسیم بر هزینه کود سوپر فسفات تریپل، TSP (سوپر فسفات تریپل دارای ۲۰ درصد فسفر)

• قیمت هر کیلوگرم کود سوپر فسفات تریپل برابر با ۷۰ هزار تومان و قیمت هر کیلوگرم دانه کتجد ۲۵۰ هزار تومان و برای هر کیلوگرم روغن کتجد ۴۷۵ هزار تومان در نظر گرفته شد. قیمت‌ها در تاریخ ۲۶ آذرماه ۱۴۰۴ استفاده شد.

• عملکرد دانه به‌ترتیب ۹۲۳ و ۸۱۹/۲ کیلوگرم در هکتار برای ارقام Darab 1 و Drab14 در تیمار P0 (بدون فسفر). عملکرد روغن به‌ترتیب ۴۰۶/۶ و ۳۴۵ کیلوگرم در هکتار برای ارقام Drab14 و Darab 1 در تیمار P0.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز و روی در رقم داراب ۱۴ بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود. در تمامی سطوح فسفر مصرفی، رقم داراب ۱۴ از نظر عملکرد دانه، جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر، نسبت به رقم داراب ۱ برتری داشت.

در هر دو رقم، کمینه مقادیر کارایی جذب فسفر (PACE) و کارایی فسفر (PE) در سطح ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار ثبت شد. در مقابل بیشینه مقادیر کارایی جذب فسفر در سطح ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار مشاهده شد (جدول ۹). مقادیر عددی کارایی فسفر در رقم داراب ۱ بیش‌تر از رقم داراب ۱۴ بود (جدول ۹). کارایی فسفر، همبستگی بیش‌تری با کارایی جذب فسفر دانه ($R^2=0.63^{**}$) در مقایسه با همبستگی با کارایی مصرف فسفر ($R^2=0.15^{**}$) داشت. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که در ارقام مذکور، کارایی جذب فسفر، حیاتی‌تر از کارایی مصرف فسفر است. در گیاه کلزا نیز مشاهده‌شده است که کارایی فسفر، بیش‌تر تحت تأثیر کارایی جذب فسفر است تا کارایی مصرف فسفر (Nourgholipour et al., 2019).

نسبت سود به هزینه برای عملکرد دانه و روغن

با کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، بیشینه افزایش عملکرد دانه و روغن ثبت شد که البته با مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار، تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۱۰). برای رقم داراب ۱۴، بهترین نسبت سود به هزینه برای دانه و روغن به‌ترتیب در سطح ۵ و ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار حاصل شد (۴۵/۷۱ و ۱۹/۴۱)، اما برای رقم داراب ۱، بهترین نسبت سود به هزینه برای دانه در سطح ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار (۳۵/۴۳) و برای روغن در سطح ۱۵ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌دست آمد (۲۳/۶۱). نسبت سود به هزینه دانه در رقم داراب ۱۴، برتر از رقم داراب ۱ بود، اما در مورد نسبت سود به هزینه روغن، رقم داراب ۱ برتری داشت (جدول ۱۰).

نسبت سود به هزینه تحت تأثیر قیمت کود و قیمت محصول قرار

جدول ۱۰- نسبت سود به هزینه (BCR) برای عملکرد دانه و عملکرد روغن در مقادیر مختلف فسفر

Table 10- The BCR of the grain and oil yields in different P rates

رقم Cultivar	مقدار فسفر P rate	هزینه فسفر Expense of P from TSP	افزایش عملکرد دانه Increased grain yield	افزایش عملکرد روغن Increased oil yield	سود خالص دانه Net income of grain	سود خالص روغن Net income of oil	سود به هزینه دانه BCR of grain	سود به هزینه روغن BCR of oil
		(Toman. ha ⁻¹)	(kg. ha ⁻¹)	(kg. ha ⁻¹)	(Toman. ha ⁻¹)	(Toman. ha ⁻¹)	-	-
Darab 1		-	-	-	-	-	-	-
	5	1750	248	75	62000	35625	35.43	20.36
	10	3500	303	149	75750	70775	21.643	20.22
	15	5250	139	261	34750	123975	6.62	23.61
	20	7000	41	165	10250	78375	-1.46	11.12
Darab 14		-	-	-	-	-	-	-
	5	25	320	51	80000	24225	45.71	13.84
	10	50	440	143	110000	67925	31.43	19.41
	15	75	263	136	65750	64600	12.52	12.30
	20	100	174	-1	43500	-475	-6.21	-0.07

The ratio of benefit-to-cost (BCR)

سود به هزینه عملکرد روغن برای رقم داراب ۱ تحت تیمار ۱۵ کیلوگرم فسفر در هکتار ثبت شد. باین‌حال، رقم داراب ۱۴ در تیمار ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، نسبت سود به هزینه روغن نسبتاً بیش‌تری ایجاد کرد. از آنجاکه عملکرد دانه برای کشاورزان مهم‌تر از عملکرد روغن است، رقم داراب ۱۴ می‌تواند به‌عنوان رقم برتر در شرایط کمبود فسفر در نظر گرفته شود و در سطح فسفر ۸/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مصرف ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار برای این رقم قابل توصیه است.

سپاسگزاری

این پروژه بخشی از پروژه ملی مؤسسه تحقیقات خاک و آب بود. از همکاری این مؤسسه و نیز همکاری ایستگاه تحقیقات کشاورزی داراب استان فارس و نیز اداره کل پنبه و دانه‌های روغنی وزارت جهاد کشاورزی برای تأمین اعتبار پروژه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

به عبارتی رقم داراب ۱۴ نسبت به رقم داراب ۱ مقدار عملکرد بیشتری به ازای هر واحد فسفر مصرفی، تولید کرد. با کشت ارقام متحمل به کمبود فسفر از جمله داراب ۱۴ همراه با مصرف حداقلی کود فسفر (۵ کیلوگرم در هکتار در شرایط آزمایش حاضر) می‌توان علاوه بر دستیابی به عملکرد بهینه، سودآوری و کارایی مصرف منابع را در خاک‌های آهکی دارای کمبود فسفر به‌طور چشمگیری افزایش داد. با در نظر گرفتن نتایج نسبت سود به هزینه، دو حالت برای انتخاب رقم برتر وجود دارد: ۱- رقم برتر بر اساس نسبت سود به هزینه دانه ۲- رقم برتر بر اساس نسبت سود به هزینه روغن. رقم داراب ۱۴ بر اساس حالت اول و در سطوح مختلف فسفر به‌عنوان رقم برتر انتخاب شد. نسبت سود به هزینه دانه برای رقم داراب ۱۴ بیش‌تر از رقم داراب ۱ بود و بیشترین مقدار در سطح ۵ کیلوگرم فسفر در هکتار ثبت شد. سطوح مختلف فسفر باعث ایجاد مقادیر متفاوت نسبت سود به هزینه برای عملکرد روغن در ارقام کنجد مورد مطالعه شدند. بیشینه نسبت

References

- Adhikari, S., Anuragi, H., Chandra, K., Tarte, S.H., Dhaka, S.R., Jatav, H.S., & Hingonia, K. (2023). Molecular basis of plant nutrient use efficiency-concepts and challenges for its improvement. In *Sustainable plant nutrition* (pp. 107-151). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00001-8>
- Akhtar, J., Baqa, S., Khan, S., Kakar, A.K., Abro, B.A., & Baloch, P.A. (2015). Effect of different levels of nitrogen and phosphorus on growth and yield of sesame. *International Journal of Biology and Biotechnology*, 12, 493-498. <https://doi.org/10.3390/agriculture9100227>
- Akhtar, M.S., Oki, Y., & Adachi, T. (2009) Mobilization and acquisition of sparingly soluble P sources by *Brassica* Cultivars under P-Starved Environment: I. Differential growth response, P-efficiency characteristics and P remobilization. *Journal of Integrative Plant Biology*, 51(11), 1008-1023. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2009.00874.x>
- Amare, M., Fisseha, D., & Andreassen, C. (2019). The effect of N and P fertilizers on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) in low-fertile soil of north-western Ethiopia. *Agriculture*, 9(10), 227. <https://doi.org/10.3390/agriculture9100227>
- Anonymous. (2025). Agricultural Statistics, Volume 1 (Crops). Statistics Center, Information and Communication Technology, Economic Planning Deputy, Ministry of Agricultural Jihad. Tehran, Iran. (In Persian)
- Arslan, H., & Gür, M.A. (2018). Effects of phosphorus and nitrogen application on sesame (*Sesamum indicum* L.) yield in semi-arid climatic conditions. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 4(4), 483-489. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JSTR/article/view/42714/44006>
- Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1962). Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93(1), 68.
- Chen, S., Ding, G., Wang, Z., Cai, H., & Xu, F. (2015). Proteomic and comparative genomic analysis reveals adaptability of *Brassica napus* to phosphorus-deficient stress. *Journal of Proteomics*, 117, 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2015.01.012>
- Colmer, T.D., Epstein, E., & Dvorak, J. (1995). Differential solute regulation in leaf blades of various ages in salt sensitive wheat and a salt tolerant wheat (*Lanphophyrum elongatum*). *Journal of Plant Physiology*, 108, 1714-1715. <https://doi.org/10.1104/pp.108.4.1715>
- Da Silva, C.J., da Silva, A.C., Zoz, T., Toppa, E.V.B., Silva, P.B., & Zanotto, M.D. (2015). Genetic divergence among accessions of *Carthamus tinctorius* L. by morpho-agronomic traits. *African Journal of Agricultural Research*, 10(25), 4825-4830. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9859>
- El Mahdi, A.R.A. (2008). Response of sesame to nitrogen and phosphorus fertilization in Northern Sudan. *Journal of Applied Biosciences*, 8(2), 304-308. [https://www.m.elewa.org/JABS/2008/8\(2\)/1.pdf](https://www.m.elewa.org/JABS/2008/8(2)/1.pdf)
- Elmer, P., & Conn, N. (1982). Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry. Perkin Elmer, Norwalk, CT.
- Gao, G., Zhang, L., Tong, P., Yan, G., & Wu, X. (2025). Enhancing oil content in oilseed crops: Genetic insights, molecular mechanisms, and breeding approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(15), 7390. <https://doi.org/10.3390/ijms26157390>

14. Gee, G., & Bauder, J. (1986). Particle-size Analysis. In: A. Klute, (ed), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. SSSA and ASA, Madison, WI, 383-411.
15. Hu, Y., Ye X., Shi, L., Duan, H., & Xu. F. (2010). Genotypic differences in root morphology and phosphorus uptake kinetics in *Brassica napus* under low phosphorus supply. *Journal of Plant Nutrition*, 33(6), 889-901. <https://doi.org/10.1080/01904161003658239>
16. Hunter, P.J., Teakle, G.R., & Bending G.D. (2014). Root traits and microbial community interaction on relation availability and acquisition, with particular reference to *Brassica*. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1- 18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00027>
17. Ibrahim, M., Hussain, M., Khan, A., Jamal, Y., Alie, M., & Malik, M.F.A. (2014). Effect of nitrogen and phosphorus on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.). *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 18(1), 95-101. <https://doi.org/10.13140/2.1.4456.8965>
18. Iqbal, A., Qiang, D., Xiangru, W., Huiping, G., Hengheng, Z., Xiling, Z., & Meizhen, S. (2023). Phosphorus and carbohydrate metabolism contributes to low phosphorus tolerance in cotton. *BMC Plant Biology*, 23(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04100-6>
19. ISO organization. (1998). Oilseeds . Simultaneous determination of oil and water contents. Method using pulsed nuclear magnetic resonance spectrometry. ISO 10565:1998, International Standards for Business, Government and Society. URL://:http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=26317.
20. Jan, A., Ali, S., Adail, M., & Khan, A. (2014). Growth and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) as influenced by phosphorus levels under different row spacing. *Growth*, 4(22), 150-154. <https://core.ac.uk/download/pdf/234663899.pdf>
21. Jat, M., Yadav, P., Singh, R., Tikkoo, A.B.H.A., & Dadarwal, R. (2020). Response of phosphorus in sesame (*Sesamum indicum* L.) on coarse textured soils of South West Haryana. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(1), 2098-2101. <https://www.phytojournal.com/archives/2020/vol9issue1/PartA1/9-1-438140.pdf>
22. Korkmaz, K., & Altıntaş, Ç. (2016). Phosphorus use efficiency in canola genotypes. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 4(6), 424-430. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v4i6.424-430.726>
23. Kumar, U.K., Vani, K.P., Srinivas, A., & Babu, P.S. (2017). Yield, nutrient uptake and economics of safflower as influenced by INM under irrigation and rainfed planting. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(10), 2178-2183. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.258>
24. Kumari, M., & Saritha, J. (2017). Effect of phosphorus fertilizers on oil seed crops. *Agriculture Update*, 12, 749-754.
25. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society American Journal*, 42, 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
26. Loeppert, R.H., & Suarez D.L. (1996). Carbonate and Gypsum. In: D. L. Sparks, (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, SSSA and ASA, Madison, W. I.; 437-474.
27. Lang, C.A. (1958). Simple microdetermination of Kjeldahl nitrogen in biological materials. *Analytical Chemistry*, 30, 1692-1694.
28. Nelson, D., & Sommers, L. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: D. L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA and ASA, Madison, W. I, 961-1010. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
29. Nourgholipour, F., Mousavi, S.M., Zamani, S., & Ahmadi Adli, R. (2024). Growth, yield, and phosphorus efficiency of safflower cultivars as affected by phosphorus application in East Azerbaijan Province, Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2305840>
30. Nourgholipour, F., Hosseini, H.M., Tehrani, M.M., Motesharezadeh, B., Moshiri, F., & Mousavi, S.M. (2022). Phosphorus fractionation affected by root induced changes of two canola cultivars. *Eurasian Soil Science*, 55, 819–829. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060102>
31. Olsen, S.R., & Sommers L.E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page et al. (eds.), *Methods of soil analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI., 403-430. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24>
32. Priyadarshini, A., Umesha, C., & Meshram. M.R. (2021). Influence of phosphorus and potassium levels on growth, yield and economics of sesame (*Sesamum indicum* L.) under eastern Uttar Pradesh condition. *Biological Forum – An International Journal*, 13, 645-50. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36152.06409>
33. Raiesi, T., Moradi, B., & Mousavi, S.M. (2022). Alterations of P fractions and some biochemical features in rhizosphere soil induced by the root activities of citrus rootstocks with different P acquisition efficiency. *Eurasian Soil Science*, 55, 212-220. <https://doi.org/10.1134/S1064229322020107>
34. Rehim, A., Khan, M., Imran, M., Bashir, M.A., Ul-Allah, S., Khan, M.N., & Hussain, M. (2020). Integrated use of farm manure and synthetic nitrogen fertilizer improves nitrogen use efficiency, yield and grain quality in wheat. *Italian Journal of Agronomy*, 15(1), 29-34. <https://doi.org/10.4081/ija.2020.1360>

35. Rhoades, J. (1982). Soluble salts. In: A. L. Page (ed.), *Methods of soil analysis*, Part 2, Chemical and microbiological properties, SSSA and ASA, Madison, WI, 167-179. https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P0673.pdf
36. Ribeiro, R.M.P., Albuquerque, J.D., Pereira, C.C.A., Pereira, L.A.F., Barros Júnior, A.P., Silveira, L.D., & Grangeiro, L.C. (2019). Nutrient uptake in sesame cultivars under cultivation in semiarid conditions. *Bioscience Journal*, 35(1), 137-147. <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n1a2019-39468>
37. Rose, T.J., & Wissuwa, M. (2012). Rethinking internal phosphorus utilization efficiency: a new approach is needed to improve PUE in grain crops. *Advances in Agronomy*, 116, 185-217. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394277-7.00005-1>
38. Santa-María, G.E., Moriconi, J.I., & Oliferuk, S. (2015). Internal efficiency of nutrient utilization: what is it and how to measure it during vegetative plant growth? *Journal of Experimental Botany*, 66, 3011-3018. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv162>
39. Shehu, H.E. (2014). Uptake and agronomic efficiencies of nitrogen, phosphorus and potassium in sesame (*Sesamum indicum* L.). *American Journal of Plant Nutrition and Fertilization Technology*, 4(2), 41-56. <https://doi.org/10.3923/ajpnft.2014.41.56>
40. Shehu, H.E., Kwari, J.D., & Sandabe, M.K. (2010). Nitrogen, phosphorus and potassium nutrition of sesame (*Sesamum indicum*) in Mubi, Nigeria. *Research Journal of Agronomy*, 3, 32-36. <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=rjagr.2009.32.36>
41. Sparks, D.L., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Sumner, M. (1996). Methods of soil analysis. *Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3>
42. Statista. (2023). Worldwide oilseed production in 2022/2023, by type (in million metric tons). <https://www.statista.com/statistics/267271/worldwide-oilseed-production-since-2008/>
43. Suchitha, N.S., Singh, V., & George, S.G. (2021). Effect of phosphorus and sulphur levels on growth and yield of summer sesame (*Sesamum indicum* L.). *The Pharma Innovation Journal*, 10(11), 1183-1186. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue11/PartQ/10-10-536-561.pdf>
44. Taalab, A.S., Ageeb, G.W., Siam, H.S., & Mahmoud, S.A. (2019). Some characteristics of calcareous soils. A review. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 8(1), 96-105. <https://www.curreweb.com/mejar/mejar/2019/96-105.pdf>
45. Tehrani, M., Balali, M., Moshiri, F., & Daryashenas, A. (2012). Recommendation and the estimation of mineral fertilizers in Iran: Challenges and Solutions. *Research of Soil*, 26(2), 123-144. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2012.126365>
46. Vora, V.D., Hirpara, D.S., Vekaria, P.D., Sutaria, G.S., & Vala, F.G. (2018). Effect of phosphorus management on yield, nutrient uptake by sesame and post-harvest soil fertility under rainfed condition. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 65-69. <https://www.phytojournal.com/archives/2018/vol7issue5/PartB/7-4-482-258.pdf>
47. Walinga, I., Van Vark, W., Houba, V., & Van Der Lee, J. (1989). Soil and plant analysis. Wageningen Agriculture University. Wageningen, Netherland.
48. Wei, X., Liu, K., Zhang, Y., Feng, Q., Wang, L., Zhao, Y., Li, D., Zhao, Q., Zhu, X., Zhu, X., & Li, W. (2015). Genetic discovery for oil production and quality in sesame. *Nature Communications*, 6(1), 8609. <https://doi.org/10.1038/ncomms9609>
49. Younis, M., Shah, S., Inamullah, R.G., Jalal, A., Khalil, F., Hussain, I., & Fahad, M.A. (2020). Effect of phosphorus and sulphur on yield and yield components of sesame. *Sarhad Journal of Agriculture*, 20(10), 1-7. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2020/36.2.722.728>
50. Zavareh, M., Hoogenboom, G., Rahimian, M.H., & Arabd, A. (2008). A decimal code to describe the growth stages of sesame (*Sesamum orientale* L.). *International Journal of Plant Production*, 2(3), 193-206. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.612>

Contents

Comparison of Continuous and Pulsed Drip Irrigation Effects on the Quantitative and Qualitative Yield of Forage Quinoa under Salinity and Water Stress Conditions	431
H. Piri, J. Gharibvandnotorki, P. Haghighatjoo	
The Effect of Using Mealworm Frass and Spraying of Zinc Lignosulfonate on the Yield and Some Properties of Green Mung Bean (<i>Vigna radiata</i>) Seeds	449
N. Mirzababaei, A. Hassani, M. Babaakbari Sari, A. Golchin	
Study of the Effect of Ammonium Acetate Concentration on Extracted Potassium in Some Calcareous Soils	465
M. Barati, A.R. Hosseinpour, M.H. Salehi, A. Jafari	
Using Machine Learning Methods to Estimate Soil Erosion with the RUSLE Model in a Part of Central Iran	479
M.S. Ghavami, S. Ayoubi	
Water Productivity of Commercial Bread Wheat Cultivars in Southern Warm and Dry Zone	499
M. Moayeri, S.M. Tabib Ghafari, M. Esmailzadeh Moghadam	
Reducing Phosphorus Fertilizer Consumption and Increasing Sesame (<i>Sesamum indicum</i>) Yield by Using an Appropriate Variety in Calcareous Soils of Southern Fars	515
F. Nourgholipour, M. Rajai	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol .39

No. 5

Dec. 2025-Jan. 2026

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	Tabriz 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. 5

2026

Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

- Comparison of Continuous and Pulsed Drip Irrigation Effects on the Quantitative and Qualitative Yield of Forage Quinoa under Salinity and Water Stress Conditions 431**
H. Piri, J. Gharibvandnotorki, P. Haghighatjoo
- The Effect of Using Mealworm Frass and Spraying of Zinc Lignosulfonate on the Yield and Some Properties of Green Mung Bean (*Vigna radiata*) Seeds..... 449**
N. Mirzababaei, A. Hassani, M. Babaakbari Sari, A. Golchin
- Study of the Effect of Ammonium Acetate Concentration on Extracted Potassium in Some Calcareous Soils 465**
M. Barati, A.R. Hosseinpour, M.H. Salehi, A. Jafari
- Using Machine Learning Methods to Estimate Soil Erosion with the RUSLE Model in a Part of Central Iran 479**
M.S. Ghavami, S. Ayoubi
- Water Productivity of Commercial Bread Wheat Cultivars in Southern Warm and Dry Zone 499**
M. Moayeri, S.M. Tabib Ghafari, M. Esmailzadeh Moghadam
- Reducing Phosphorus Fertilizer Consumption and Increasing Sesame (*Sesamum indicum*) Yield by Using an Appropriate Variety in Calcareous Soils of Southern Fars..... 515**
F. Nourgholipour, M. Rajai