

نشریه آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)



شماره ۶ جلد ۳۸

سال ۱۴۰۳

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

شماره پیاپی ۹۸

عنوان مقالات

- ارزیابی تأثیر مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب و عملکرد کمی و کیفی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) ۶۶۹
تیلوفر نجفی ایمن آبهادی - محمد علی غلامی سفیدکوهی - سعید شیوخی سوغانلو
- بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی در کشت گندم (مقاله موردی: دشت‌های دهگلان، استان کردستان) ۶۸۵
پیمان طهماسبی - فاطمه دالوند - سید ابوالفضل حسینی - بهنیار کریمی - هیرش قادرشناس
- تأثیر سطوح مختلف سلنیم محلول غذایی بر رشد و تجمع نیترات کاهوی فرانسوی قرمز در کشت بدون خاک ۶۷۱
ترگس لطفی - شهرام کیانی - حمیدرضا متقیان
- تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و کاربرد بقایای گیاهی بر عملکرد، درصد پروتئین و نیتروژن گیاه تربیتکاله (*X Triticosecale* Wittmack) و شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ۷۱۵
سهیلا حسین‌زاده - اسفندیار فاتح - امیر آینه‌بند - معصومه فرزانه - جعفر حبیبی اصل
- ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای نیشکر اراضی شمال استان خوزستان با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) ۷۳۵
عادل نیسی - مصطفی جرم - حیدر غفاری - جعفر آل کثیر
- ارزیابی مدل‌های رگرسیونی و هوشمند برای برآورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر ۷۵۱
شکراه اسفندی - کیمیا حیدری - مهسا حسینیور کاشانی - حسین شهاب آرخازلو
- پیش‌نگری تغییرات دما و بارندگی تحت سناریوهای CMIP6 در استان سیستان و بلوچستان ۷۶۷
سمیه میرشکاری - فاطمه یعقوبی - سید ابوالفضل هاشمی

نشریه آب و خاک

جلد ۳۸ شماره ۶ سال ۱۴۰۳

Journal of Water and Soil Vol.38 No.6 2025

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 38 شماره 6 بهمن - اسفند سال 1403

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- علوم خاک (دانشگاه تبریز)	اوستان، شاهین
دانشیار- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)	بذرافشان، جواد
استادیار- آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)	تقواییان، صالح
دانشیار- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)	خراسانی، رضا
استاد- علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)	خرمائی، فرهاد
استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)	علیزاده، امین
استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)	فتوت، امیر
استاد- خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)	قدیری، حسین
استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)	لکزیان، امیر
استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)	لیاقت، عبدالمجید
استاد- آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)	مساعدی، ابوالفضل
استاد- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)	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

- 669 ارزیابی تأثیر مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب و عملکرد کمی و کیفی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.)
نیلوفر نجفی ایمن آبادی - محمد علی غلامی سفیدکوهی - سعید شیوخی سوغانلو
- 685 بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی در کشت گندم
(مطالعه موردی: دشت‌های دهگلان، استان کردستان)
پیمان طهماسبی - فاطمه دالوند - سید ابوالفضل حسینی - بختیار کریمی - هیرش قدرشناس
- 671 تأثیر سطوح مختلف سلنیم محلول غذایی بر رشد و تجمع نیترات کاهوی فرانسوی قرمز در کشت بدون خاک
نرگس لطفی - شهرام کیانی - حمیدرضا متقیان
- 715 تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و کاربرد بقایای گیاهی بر عملکرد، درصد پروتئین و نیتروژن گیاه تریتیکاله (*X Triticosecale*) Wittmack و شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک
سهیلا حسین‌زاده - اسفندیار فاتح - امیر آینه‌بند - معصومه فرزانه - جعفر حبیبی اصل
- 735 ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای نیشکر اراضی شمال استان خوزستان با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND)
عادل نیسی - مصطفی چرم - حیدر غفاری - جعفر آل کثیر
- 751 ارزیابی مدل‌های رگرسیونی و هوشمند برای برآورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر
شکراله اصغری - کیمیا حیدری - مهسا حسینیور کاشانی - حسین شهاب آرخازلو
- 767 پیش‌نگری تغییرات دما و بارندگی تحت سناریوهای CMIP6 در استان سیستان و بلوچستان
سمیه میرشکاری - فاطمه یعقوبی - سید ابوالفضل هاشمی

Evaluation of Irrigation Management and Plastic Mulch Effects on Water Productivity and Quantitative and Qualitative Yield of Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.)

N. Najafi Iman Abadi¹, M.A. Gholami Sefidkouhi^{2*}, S. Shiukhy-Soqanloo³

1, 2 and 3- M.Sc Graduated, Professor of Irrigation and Drainage and Assistant Professor of Agro-Meteorology, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agriculture Science and Natural Resources University, Sari, Iran, respectively.

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

Received: 25-04-2024

Revised: 28-10-2024

Accepted: 18-01-2025

Available Online: 18-01-2025

How to cite this article:

Najafi Iman Abadi, N., Gholami Sefidkouhi, M.A., & Shiukhy-Soqanloo, S. (2025). Evaluation of irrigation management and plastic mulch effects on water productivity and quantitative and qualitative yield of Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.). *Journal of Water and Soil*, 38(6), 667-682. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.87779.1405>

Introduction

Today, the crisis of water resources is one of the biggest challenges of human societies. Population growth and industrialization have increased the demand for water consumption. The agricultural sector is facing many problems to supply the required water resources. Irrigation management and the use of plastic mulches play a crucial role in raised-bed cultivation of horticultural and medicinal plants, serving various purposes such as enhancing quality and increasing yield. Moreover, given the current water scarcity conditions, improving the quantitative and qualitative yield of medicinal plants relies heavily on effective irrigation management and efficient cultivation practices.

Material and Methods

In this research, a split-plot experiment was conducted using a randomized complete block design (RCBD). The experimental treatments included: the main factor of irrigation management (IM) with four levels (IM100, IM80, IM60 and IM40) and the sub-factor of plastic mulch (PM) with two levels (black plastic mulch (PM1) and no mulch (PM0)) with 3 replications during the growth season 2022-2023 and was conducted at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Iran. The dimensions of the experimental plot was arranged as 1.80×1.20 meters (length and width). Lemon balm was planted in rows with a spacing of 30 cm between plants and 40 cm between rows. Soil moisture was measured by weight method and irrigation was done manually with a sprinkler. In the end, the data obtained from measuring water productivity (WP), relative water content (RWC), essential oil content, morphological and biochemical characteristics of lemon balm were analyzed using ANOVA of SAS software. The Duncan multiple range post hoc test was employed to compare treatment means.

Result

Based on the findings, the interaction effect of irrigation management and plastic mulch on water productivity was significant. So, the IM100 conditions and PM1, the highest water productivity was observed with 38.5 kg.m^{-3} and the lowest amount was related to IM40 and PM0 25 kg m^{-3} . The results showed that the simple effect of IM on the RWC in IM100 was very noticeable and obvious compared to other IMs. The highest (74.3%) RWC was observed in IM100, while the lowest RWC was related to IM40 (40.1%). In PM1, the highest amount



of RWC (62.1%) was observed and the lowest amount was related to the PM0 (51.8%). The results showed that vegetative wet and dry weight, leaf area index (LAI) and the number of lateral branches of lemon balm increased under the IMs and PM1 affect compared to the control (PM0). The comparison of averages indicated that the highest wet and dry root weights were 217 kg ha^{-1} and 140.8 kg ha^{-1} , respectively, observed in the IM100 treatment. Additionally, the highest wet and dry root weights under the plastic mulch treatment (PM1) were 151.1 kg ha^{-1} and 108.5 kg ha^{-1} , respectively. The results also showed that the highest vegetative wet and dry weights were recorded at 647.2 kg ha^{-1} and 231 kg ha^{-1} , respectively, in the IM100 treatment. Furthermore, the interaction effect of irrigation management (IM) and plastic mulch (PM) on the leaf area index revealed that the highest LAI value (2.8) was observed in the IM100 and PM1 combination. This was while the lowest value of the LAI was related to IM40 and PM0. The interaction effect of IM and PM on the number of lateral branches indicated that IM100 and PM1, the highest number of lateral branches (12) was generated. Based on the obtained results, the highest amount of phenol and flavonoids content were related to IM40 and PM0 with $13.4 \text{ mg.GA g}^{-1}$ and $14.6 \text{ mg.QU g}^{-1}$, respectively. While their lowest amount was observed under IM100 and PM1 with $10.2 \text{ mg.GA g}^{-1}$ and $11.8 \text{ mg.QU g}^{-1}$, respectively. Also, the results showed that the highest essential oil content was related to IM100 and IM80 conditions with 1.14% and 1.13 %, respectively, and the lowest was observed in IM40 condition with 0.53%.

Conclusion

The evaluation of the irrigation management and plastic mulch effects on water productivity and quantitative and qualitative yield of lemon balm showed that the use of plastic mulch by maintaining soil moisture and improving cultivation conditions, increased the vegetative growth and some qualitative characteristics. In general, due to the crisis of lack of water resources and the challenge of water scarcity, irrigation under IM80 conditions and the use of black plastic mulch in the rise-bed of lemon balm are suggested.

Keywords: Essential oil, Leaf area index, Medicinal, Phenol content, Water deficit



مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۳، ص. ۶۶۷-۶۸۲

ارزیابی تأثیر مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب و عملکرد کمی و کیفی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.)

نیلوفر نجفی ایمن آبادی^۱ - محمد علی غلامی سفیدکوهی^{۲*} - سعید شیوخی سوغانلو^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

چکیده

امروزه نقش مدیریت آبیاری و استفاده از مالچ‌های پلاستیکی در بستر کشت گیاهان باغی و دارویی با اهداف مختلفی مانند بهبود کیفیت و افزایش عملکرد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از طرفی، اهمیت افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارویی با توجه به شرایط کم‌آبی حاضر، در گرو مدیریت آبیاری و شیوه‌های کشت کارآمد می‌باشد. به‌منظور ارزیابی تأثیر مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب و عملکرد کمی و کیفی بادرنبویه، آزمایش با آرایش کرت خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با تیمارهای آزمایشی شامل؛ فاکتور اصلی مدیریت آبیاری (IM) با چهار سطح (IM100، IM80، IM60 و IM40) و فاکتور فرعی مالچ پلاستیکی (PM) با دو سطح (مالچ پلاستیکی سیاه (PM1) و بدون مالچ (PM0)) در ۳ تکرار انجام شد. بر پایه یافته‌ها، در شرایط مدیریت آبیاری IM100 و مالچ پلاستیکی سیاه، بیشترین میزان بهره‌وری آب با ۳۸/۵ کیلوگرم بر متر مکعب و کمترین آن در IM40 و بدون مالچ پلاستیکی با ۲۴/۹ کیلوگرم بر متر مکعب مشاهده شد. همچنین بیشترین میزان محتوای نسبی آب برگ گیاه مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM100 با ۷۴/۳ درصد بود. نتایج نشان داد که وزن تر و خشک اندام هوایی، شاخص سطح برگ و تعداد شاخه‌های جانبی بادرنبویه نسبت به شرایط بدون مالچ، افزایش یافت. بیشترین میزان محتوای فنل و فلاونوئید به‌ترتیب با مقادیر ۱۳/۴ میلی‌گرم اسید گالیک بر گرم و ۱۴/۶ میلی‌گرم کوئرستین بر گرم مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM40 و بدون مالچ پلاستیکی بود. بیشترین درصد اسانس مربوط به شرایط آبیاری IM100 و IM80 به‌ترتیب با ۱/۱۴ و ۱/۱۳ درصد بود و کمترین میزان آن در شرایط آبیاری IM40 با ۰/۵۳ درصد مشاهده شد. به‌طور کلی، با توجه به بحران کمبود منابع آب و چالش کم‌آبی، آبیاری تحت شرایط IM80 و استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه در بستر کشت گیاه دارویی بادرنبویه پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: اسانس، دارویی، شاخص سطح برگ، کم‌آبی، محتوای فنل

مقدمه

دارویی و شناسایی نقش بارز و آشکار آنها در پیشبرد اهداف ملی، منطقه‌ای و جهانی برای تحقق سلامت، خودکفایی دارویی، ایجاد اشتغال و توسعه اقتصادی بر کسی پوشیده نیست. گیاهان دارویی به‌عنوان ذخائر و گنجینه‌های ژنتیکی می‌توانند بزرگترین ثروت ملی برای هر کشور و به‌عنوان یکی از تولیدات مهم و ضروری در بخش

بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) گیاهی دارویی متعلق به خانواده نعنائیان است که از رایج‌ترین خواص درمانی آن می‌توان به خواص آرام‌بخشی، آنتی‌اکسیدانی و ضد التهابی اشاره کرد (Nourbakhsh Rezaei et al., 2019). امروزه اهمیت گیاهان

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، استاد و استادیار هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(*) - نویسنده مسئول: (Email: magholamis@yahoo.com)

کشاورزی محسوب شوند (Naveed et al., 2020).

یکی از بزرگترین چالش‌هایی که امروزه جوامع بشری با آن مواجه هستند، نقصان شدید منابع آبی جهت تأمین نیاز آبی محصولات است (Alizadegan et al., 2022a). در گذشته آبیاری محصولات کشاورزی بدون هیچ‌گونه محدودیتی از نظر تأمین منابع آبی صورت می‌گرفت (Alizadegan et al., 2022b)، اما با رشد جمعیت و صنعتی شدن جوامع، تقاضا برای مصرف آب افزایش یافت. لذا بخش کشاورزی برای تأمین منابع آبی مورد نیاز در کشت محصولات کشاورزی، با مشکلات متعددی مواجه می‌باشد. (Mokari et al., 2020).

تنش آبی که از مهمترین تنش‌های محیطی به‌شمار می‌رود، به‌دلیل تأثیر زیاد بر عملکرد، بخش عمده‌ای از توجه پژوهش‌گران و صاحب‌نظران را در اتخاذ تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در بخش کشاورزی را معطوف خود ساخته است (Shiukhy Soqanloo, 2023). با برنامه‌ریزی صحیح و تعیین مناسب زمان و ارتفاع آبیاری، آب موردنیاز گیاه تأمین خواهد شد و ضمن جلوگیری از مصرف بی‌رویه آب از بروز تنش آبی و کاهش عملکرد محصول نیز جلوگیری می‌شود (Shiukhy Soqanloo et al., 2021). یکی از اقدامات مدیریتی در هر عملیات زراعی، آبیاری به‌هنگام است، یعنی این که گیاه به‌موقع و به‌اندازه موردنیاز خود آب دریافت کند (Alizadegan et al., 2022b). آبیاری کمتر از نیاز آبی باعث ایجاد تنش در گیاه شده و افت عملکرد را سبب می‌شود و آبیاری بیشتر از حد نیاز، موجب هدر رفتن آب و همچنین ایجاد ورس می‌شود. آب مورد نیاز و دور آبیاری گیاهان زراعی بستگی به روش آبیاری، بافت خاک، رقم (دیپرس یا زودرس) و اقلیم هر منطقه دارد (Karimi et al., 2020).

بررسی تنش‌های محیطی و نقش آنها در ارزیابی رشد و عملکرد محصولات زراعی و باغی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. تنش‌های غیر زیستی محدودیت قابل توجهی برای تولید محصول و امنیت غذایی در سرتاسر جهان محسوب می‌شوند (Ray et al., 2018). گیاهان در مواجهه با تنش‌های محیطی پاسخ‌های متفاوتی از جمله؛ تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، متابولیکی، بیوشیمیایی و مولکولی را نشان می‌دهند که در نهایت رشد و نمو گیاه را با محدودیت مواجه ساخته و باعث کاهش عملکرد می‌شوند (Fahad et al., 2017). این امر باعث می‌شود گیاهان در سازگاری با شرایط بروز تنش با توجه به گونه و زمان وقوع تنش در هر یک از مراحل رشد و نمو، پاسخ متفاوتی را نشان دهند (Wei et al., 2018). قربانی و همکاران (Ghorbanli et al., 2012) بیان کردند که میزان آنتوسیانین، ترکیبات فنلی و پرولین گیاه دارویی کتان (*Linum usitatissimum*) با افزایش تنش خشکی افزایش یافت. همچنین میزان فلاونوئید در شرایط بروز تنش خشکی $FC_{2.3}$ و $FC_{1.3}$ (نسبت به ظرفیت زراعی) ابتدا افزایش و بعد کمی کاهش یافت، اما به هر حال در مقایسه با

تیمار شاهد (شرایط FC) میزان فلاونوئید افزایش یافت.

استفاده از مالچ‌های پلاستیکی رنگی در بستر کشت گیاهان بویژه گیاهان باغی، تا حد قابل توجهی باعث کاهش تبخیر، جلوگیری از هدر رفت آب در خاک (Amare and Desta, 2021)، کنترل علف‌های هرز، بهبود ویژگی‌های کیفی و افزایش عملکرد گیاهان می‌شود (Singh et al., 2017). شیوخی و همکاران (Shiukhy et al., 2015) از دیگر مزایای بهره‌گیری از مالچ‌های پلاستیکی به افزایش دمای خاک، افزایش دسترسی گیاه به مواد غذایی، افزایش پتانسیل ریشه برای جذب عناصر غذایی و بالا رفتن کارایی میکروارگانیزم‌ها در خاک اشاره کردند که در نهایت افزایش عملکرد گیاه را در پی دارد. شیوخی و رائینی (Shiukhy Soqanloo & Raeini, 2018) نشان دادند که استفاده از مالچ پلاستیکی قرمز سبب زودرسی، افزایش عملکرد میوه، افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی میوه توت‌فرنگی در مقایسه با شرایط بدون مالچ (تیمار شاهد) شد. نتایج ال-ماجید و همکاران (El-Mageed et al., 2016) نیز به برتری استفاده از مالچ نسبت به شرایط بدون مالچ در افزایش کارایی مصرف آب، کنترل علف‌های هرز، افزایش عملکرد و اجزای عملکرد اشاره داشت.

با توجه به بحران کمبود منابع آب و چالش کم‌آبی و همچنین نیاز روز افزون به فن‌آوری‌ها و شیوه‌های کشت کارآمد نسبت به روش‌های سنتی و مرسوم، ارتقای بهره‌وری آب و افزایش تولید در واحد سطح بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین پاسخ به سوالاتی از جمله؛ چگونگی تأثیر مالچ پلاستیکی و سطوح مختلف تنش خشکی بر ویژگی‌های کمی و کیفی بادرنجبویه، افزایش بهره‌وری آب و کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی در طول دوره‌ی رشد و نمو گیاه خرفه مورد توجه قرار گرفت. در واقع، استفاده از مالچ پلاستیکی در بستر کشت گیاه بادرنجبویه، افزون بر کاهش میزان تبخیر از سطح خاک، افزایش دمای سطح خاک و کاهش میزان آب مصرفی در آبیاری، با فراهم ساختن شرایط مطلوب برای رشد و توسعه گیاه در مقایسه با شرایط بدون مالچ می‌تواند تا حدی اثرات نامطلوب تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه را جبران نماید. لذا هدف از این پژوهش ارزیابی تأثیر مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب و عملکرد کمی و کیفی بادرنجبویه بود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش در مزرعه آزمایشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری واقع در شهرستان ساری با ارتفاع از سطح دریا (۱۴ متر)، میانگین دما (۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد) و میانگین بارندگی (۶۵۰ میلی‌متر) می‌باشد. شرایط آب و هوایی محل آزمایش و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مزرعه در طول دوره‌ی رشد و نمو گیاه بادرنجبویه در جدول ۱ ارائه شد.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های شرایط آب و هوایی و خاک محل اجرای آزمایش
Table 1- Some of the weather conditions and soil characteristics of experimental site

شرایط آب و هوایی Weather conditions									
دوره رشد Growth season			متوسط دما Mean temperature (°C)	دمای بیشینه Maximum temperature (°C)	دمای کمینه Minimum temperature (°C)	بارندگی Precipitation (mm)	تبخیر Evaporation (mm)		
اردیبهشت (May)			27.1	36.2	16.2	95.2	140.4		
خرداد (June)			30.3	33.6	23.4	22.1	159.9		
تیر (July)			32.7	37.8	28.7	13.6	177.4		
میانگین (Average)			30.0	35.8	22.7	43.6	159.2		
مشخصات خاک (Soil characteristics)									
بافت (Texture)			اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC*10 ³ (ds.m ⁻¹)	کربن آلی O.C (%)	ماده آلی O.M (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)
شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)							
23	40	37	7.6	1.8	1.2	2	0.1	13	370

معین ۴۰۰ سانتی‌متر مربع حاصل از یک کوادرات (۲۰×۲۰) محاسبه شد. در این روش ابتدا نمونه‌ها (برگ‌ها) بر روی یک صفحه کاغذی سفید رنگ قرار گرفته و عکس‌برداری انجام شد. سپس در بستر نرم‌افزار با استفاده از درجه‌بندی خط‌کش برحسب سانتی‌متر اقدام به تنظیمات مقیاس گردید و مساحت هر برگ با مرزبندی پیرامون برگ محاسبه شد. در مرحله‌ای که ظهور گل‌های اولیه در برخی از بوته مشاهده شد و حصول اطمینان که گیاه به مرحله گلدهی کامل نزدیک شده است، برداشت انجام شد. صفات رویشی شامل وزن تر (ریشه و اندام هوایی)، ارتفاع بوته و تعداد شاخه جانبی اندازه‌گیری شد. در پایان بوته‌های برداشت شده (کف‌بر) در آون و در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته و پس از آن وزن خشک با توزین نمونه‌ها بدست آمد (Shiukhy Soqanloo et al., 2021).

سنجش ویژگی‌های بیوشیمیایی

برای عصاره‌گیری از ماده خشک، ۱ گرم از بافت خشک با ۱۰ سی‌سی متانول ۸۰ درصد ترکیب شد و به مدت ۲۴ ساعت روی شیکر با ۱۲۰ دور در دقیقه قرار گرفت. سپس به مدت ۱۰ دقیقه از دستگاه اولتراسونیک برای استخراج ترکیبات بیوشیمیایی استفاده شد. با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۲، فاز جامد و محلول از یکدیگر جدا شده و محلول بدست آمده برای اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی تهیه گردید. برای سنجش فعالیت آنتی‌اکسیدانی ۴ میلی‌گرم از ماده DPPH در ۱۰۰ سی‌سی متانول خالص حل شد. سپس ۱ سی‌سی از

این آزمایش به صورت کرت خرد شده بر پایه ی طرح بلوک‌های کامل تصادفی شامل فاکتور اصلی مدیریت آبیاری (IM) با ۴ سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبیاری (IM100)، ۸۰ درصد نیاز آبیاری (IM80)، ۶۰ درصد نیاز آبیاری (IM60) و ۴۰ درصد نیاز آبیاری (IM40) و فاکتور فرعی مالچ پلاستیکی (PM) با دو سطح بدون مالچ (PM0) و مالچ پلاستیکی سیاه (PM1) با ۳ تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ انجام شد. ابعاد کرت آزمایشی شامل ۱/۸۰ × ۱/۲۰ متر (طول و عرض) در نظر گرفته شد. نشاء گیاه بادرنجبویه در ردیف‌هایی با فاصله ۳۰ سانتی‌متر و فاصله ردیف‌ها از یکدیگر ۴۰ سانتی‌متر، در تاریخ ۱۰ اردیبهشت کشت شد. در طول دوره رشد، آبیاری بصورت دستی انجام شد. به طوری که ابتدا تمامی کرت‌ها به طور یکسان و به یک اندازه آبیاری شدند. بلافاصله پس از پایان عملیات کاشت، آبیاری انجام شد. رطوبت خاک با استفاده از تانسومتر پایش و زمانی که میزان آن به ۷۰ درصد می‌رسید (SWC=70)، آبیاری صورت می‌گرفت. لازم به ذکر است که تا مرحله ۸-۶ برگی شدن بوته‌ها، آبیاری کرت‌های آزمایشی با دور و مقدار یکسان بود و پس از این مرحله، تیمارهای تنش آبی اعمال شدند. به منظور جلوگیری از ورود باران به درون کرت‌ها، از سرپناه بارش^۱ استفاده شد. همچنین برداشت در تاریخ ۲۰ تیرماه انجام گرفت.

سنجش ویژگی‌های مورفولوژیک

در پایان مرحله رشد رویشی گیاه بادرنجبویه (شروع گلدهی)، شاخص سطح برگ با استفاده از نرم افزار Image J و برای یک سطح

سنجش بهره‌وری آب، محتوای آب نسبی

بهره‌وری آب از طریق رابطه (۲) محاسبه شد:

$$WP = \frac{GY}{Wap} \quad (2)$$

که در آن، WP: بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، GY: عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم و Wap: میزان آب مصرفی (متر مکعب) می‌باشد.

برای سنجش محتوای نسبی آب (RWC) قطعات ۱ سانتی‌متری از برگ‌های وسطی شاخه اصلی و از قسمت میانی برگ تهیه و وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. این قطعات به منظور تعیین وزن تورژسانس به مدت ۴ ساعت در شدت نور کم داخل آب مقطر قرار داده شدند. در انتها وزن خشک نمونه‌های برگ سنجش و محتوای نسبی آب برگ از رابطه (۳) محاسبه شد (Farzaneh et al., 2010).

$$RWC(\%) = \frac{DW - WW}{TW - WW} \times 100 \quad (3)$$

که در آن RWC محتوای نسبی آب (درصد)، DW: وزن خشک (گرم)، WW: وزن تر (گرم) و TW: وزن تورژسانس (گرم) است. در پایان داده‌های بدست آمده با بهره‌گیری از نرم‌افزار SASver9.2 تجزیه و تحلیل شدند و آزمون مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش SNK^۲ در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های مورفولوژیک

نتایج تجزیه واریانس نشان از تأثیر بسیار معنی‌دار مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه دارویی بادنجه‌بویه دارد ($P \leq 0.01$). به‌طوری‌که ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک ریشه، وزن تر و خشک اندام هوایی، شاخص سطح برگ و تعداد شاخه‌های جانبی تحت تأثیر مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی قرار گرفتند. بر پایه یافته‌ها، اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر وزن تر و خشک اندام هوایی، شاخص سطح برگ و تعداد شاخه‌های جانبی معنی‌دار بود ($P \leq 0.05$). این در حالی بود که اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر ارتفاع گیاه و وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار نبود و تغییرات تقریباً یکسان بود (جدول ۲).

ارتفاع گیاه

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، در صورت اعمال مدیریت

عصاره تهیه شده با ۱ سی‌سی محلول DPPH ترکیب و به مدت ۲۰ دقیقه در تاریکی قرار گرفت. با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۷ نانومتر قرائت گردید. از متانول برای کالیبراسیون دستگاه استفاده شد و جذب محلول DPPH خالص نیز سنجیده شد. با استفاده از رابطه (۱) میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی به صورت درصد مهار محاسبه شد (Ebrahimzadeh et al., 2008).

$$A = \frac{DPPH_{ab} - Sample_{ab}}{DPPH_{ab}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن؛ $DPPH_{ab}$ و $Sample_{ab}$ به ترتیب مقدار جذب DPPH خالص و نمونه می‌باشند.

برای سنجش محتوای فلاونوئید از روش رنگ‌سنجی کلرید آمونیوم استفاده شد (Ebrahimzadeh et al., 2008). ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره متانولی با ۱/۵ میلی‌لیتر متانول و ۰/۱ سی‌سی آلومینیوم کلرید ۱۰٪ ۰/۱ سی‌سی استات پتاسیم یک مولار به همراه ۲/۸ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد تا نمونه نهایی حاصل شود. سپس مخلوط ۱۵ دقیقه در تاریکی قرار داده شد و با دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب در طول موج ۴۱۵ نانومتر قرائت گردید. عدد بدست آمده برای فلاونوئید با رجوع به منحنی استاندارد تبدیل به میزان واقعی شد و در نهایت بر حسب اک‌والان کوئرستین در یک گرم عصاره خشک محاسبه شد. سنجش محتوای ترکیبات فنلی کل با استفاده از روش معرف فولین سیو-کالتیو^۱ انجام شد. برای عصاره‌گیری، ۰/۵ میلی‌لیتر عصاره متانولی با ۲/۵ میلی‌لیتر فولین سیو کالتیو مخلوط گردید. سپس ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم اضافه شد. محلول فوق ۱۵ دقیقه در تاریکی قرار گرفت و سپس با دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب در طول موج ۷۶۵ نانومتر خوانده شد. عدد بدست آمده برای ترکیبات فنلی کل با رجوع به منحنی استاندارد تبدیل به میزان واقعی شد و در نهایت بر حسب اک‌والان گالیک اسید در یک گرم عصاره خشک محاسبه شد (Shiukhy Soqanloo & Raeini, 2018). با استفاده از روش تقطیر با آب توسط دستگاه کلونجر عمل اسانس‌گیری انجام شد. برای سنجش درصد اسانس از هر تیمار آزمایشی ۵۰ گرم پیکر رویشی، خشک و کاملاً خرد شده تهیه شد و به نسبت ۲۰:۱ با آب مقطر مخلوط گردید و در بالن یک لیتری قرار گرفت. دما به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شد و پس از ۱۵۰ دقیقه میزان اسانس جمع‌آوری شده با استفاده از ۱ سی‌سی محلول هگزان باقی مانده اسانس از لوله کلونجر، جمع‌آوری شد. سپس در فریزر ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و پس از پراندن (جداسازی) هگزان، اسانس خالص بدست آمد (Farzaneh et al., 2010).

آبیاری بدون استفاده از مالچ، حداکثر ارتفاع گیاه (۱۵/۶ سانتی‌متر) در شرایط مدیریت آبیاری IM100 بود و کمترین مقدار ارتفاع گیاه با ۱۳/۱ سانتی‌متر در شرایط مدیریت آبیاری IM40 مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط کاربرد مالچ پلاستیکی سیاه، مقدار ارتفاع گیاه به ۱۶ سانتی‌متر بوده است و این در حالی است که بدون استفاده از مالچ پلاستیکی، متوسط ارتفاع گیاه ۱۲/۳ سانتی‌متر مشاهده شد (جدول ۳).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی بادرنجبویه در طول فصل رشد

Table 2- Results of variance analysis of irrigation management and plastic mulch on the morphological characteristics of the Lemon Balm during the growing season

منبع تغییرات (S.O.V)	درجه آزادی df	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	وزن تر ریشه Root wet weight (g.2.6 m ⁻²)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g.2.6 m ⁻²)	وزن تر اندام هوایی Shoots wet weight (g.2.6 m ⁻²)	وزن خشک اندام هوایی Shoots dry weight (g.2.6 m ⁻²)	شاخص سطح برگ LAI (cm ⁻²)	تعداد شاخه جانبی Num. lantern branch
بلوک (Block)	2	0.773ns	4864.82ns	61.6254ns	72.5117ns	60.2516ns	0.001ns	1.166ns
مدیریت آبیاری (IM)	3	6.308**	16089.0817**	6311.5267**	28828.8017**	5283.6337**	1.215**	32.152**
بلوک × مدیریت آبیاری Block × IM	6	0.113ns	1372.8467ns	220.2579ns	124.5417ns	57.84ns	0.010ns	0.611ns
مالچ (PM)	1	79.570**	35578.0761**	8242.6516**	75382.025**	25504.3281**	1.353**	35.041**
مدیریت آبیاری × مالچ IM × PM	3	0.0815ns	6098.2317ns	1113.7611ns	5168.4983**	2824.8145**	0.048*	2.041*
خطا (Error)	8	0.387	2257.6939	472.5822	183.6433	64.0102	0.008	0.416
کل (Total)	23	-	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات (C.V)	-	4.3	5.2	2.2	2.6	4.5	4.2	8.8

ns، *، ** به ترتیب نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطوح ۱، ۵ درصد و عدم معنی‌داری می‌باشند.

ns، *، ** indicate significant difference at 1%, 5% and non-significance levels, respectively.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی بادرنجبویه

Table 3- The results of the comparison of the mean effects of simple irrigation management and plastic mulch on the morphological characteristics of Lemon Balm

تیمار Treatment	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	وزن تر ریشه Root wet weight (g.2.6 m ⁻²)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g.2.6 m ⁻²)	وزن تر اندام هوایی Shoots wet weight (g.2.6 m ⁻²)	وزن خشک اندام هوایی Shoots dry weight (g.2.6 m ⁻²)	شاخص سطح برگ LAI (cm ⁻²)	تعداد شاخه جانبی Number of lateral branch
IM 100	15.6a	217.0a	140.8a	647.2a	231.0a	2.6a	10.1a
IM 80	14.1b	157.5a	100.5b	272.8b	172.1b	2.3b	7.8b
IM 60	13.8b	80.9b	70.4c	500.7c	124.1c	1.9c	6.5c
IM 40	13.1c	57.4b	45.5c	384.0d	79.0d	1.6d	4.6d
PM 1	16.0a	151.1a	108.5a	560.8a	166.4a	560.8a	8.5a
PM 0	12.3b	99.3b	76.1b	491.5b	136.7b	491.5b	6b

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون تفاوت معنی‌دار ندارند.

Averages with common letters in each column have no significant difference

وزن تر و خشک ریشه

وزن تر و خشک ریشه به ترتیب با ۱۵۱/۱ و ۱۰۸/۵ کیلوگرم در هکتار و کمترین مقدار وزن تر و خشک ریشه مربوط به شرایط بدون مالچ پلاستیکی، به ترتیب با ۹۹/۳ و ۷۶/۱ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳).

وزن تر و خشک اندام هوایی

نتایج مقایسه میانگین‌های اثر ساده مدیریت آبیاری نشان داد

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط مدیریت آبیاری IM100، بیشترین وزن تر و خشک ریشه به ترتیب با ۲۱۷ و ۱۴۰/۸ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. این در حالی بود که کمترین میزان وزن تر و خشک ریشه در شرایط مدیریت آبیاری IM40 به ترتیب با ۵۷/۴ و ۴۵/۵ کیلوگرم در هکتار بدست آمد (جدول ۳). همچنین نتایج نشان داد که در شرایط کاربرد مالچ پلاستیکی سیاه، بیشترین مقدار

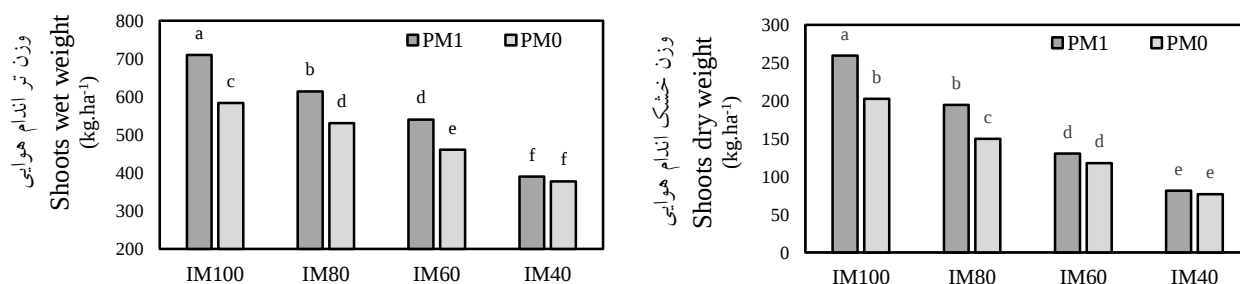
شاخص سطح برگ

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین شاخص سطح برگ با مقدار ۲/۶ مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM100 بود و کمترین مقدار شاخص سطح برگ با ۱/۶ در شرایط مدیریت آبیاری IM40 مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط کاربرد مالچ پلاستیکی سیاه، بیشترین مقدار شاخص سطح برگ با ۲/۳ و در شرایط بدون مالچ پلاستیکی، کمترین شاخص سطح برگ با مقدار ۱/۹ مشاهده شد (جدول ۳). بر پایه یافته‌ها، اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر شاخص سطح برگ نشان داد که بیشترین میزان شاخص سطح برگ در شرایط مدیریت آبیاری IM100 و استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه، با ۲/۸ مشاهده شد. این در حالی بود که کمترین مقدار شاخص سطح برگ مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM40 و بدون مالچ پلاستیکی، با ۱/۴ بود (شکل ۲).

تعداد شاخه‌های جانبی

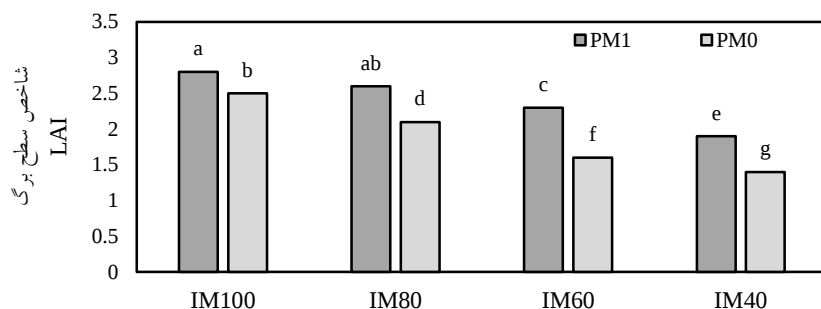
همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود بر اساس نتایج بدست آمده از مقایسه میانگین‌ها، بیشترین تعداد شاخه‌های جانبی گیاه بادرنجویه در شرایط مدیریت آبیاری IM100، با ۱۰/۱ و کمترین آن در شرایط مدیریت آبیاری IM40 با ۴/۶ مشاهده شد. همچنین در شرایط کاربرد مالچ پلاستیکی سیاه، بیشترین و کمترین تعداد شاخه‌های جانبی به ترتیب با ۸/۵ و ۶ در شرایط IM100 و IM40 بدست آمد.

(جدول ۳) بالاترین میزان وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه بادرنجویه، در شرایط مدیریت آبیاری IM100 به ترتیب ۶۴۷/۲ و ۲۳۱ با کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. در حالی که در شرایط مدیریت آبیاری IM40، پایین‌ترین میزان وزن تر و خشک اندام هوایی به ترتیب با ۳۸۴ و ۷۹ کیلوگرم در هکتار دیده شد. همچنین در شرایط کاربرد مالچ پلاستیکی سیاه، بیشترین مقدار وزن تر و خشک اندام هوایی به ترتیب با ۵۶۰/۸ و ۱۶۶/۴ کیلوگرم در هکتار بدست آمد و کمترین مقدار وزن تر و خشک اندام هوایی مربوط به شرایط بدون مالچ پلاستیکی، به ترتیب با ۴۹۱/۵ و ۱۳۶/۷ کیلوگرم در هکتار بود. بر پایه نتایج بدست آمده از مقایسه میانگین‌ها، اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر وزن تر و خشک اندام هوایی حاکی از آن بود که بیشترین میزان وزن تر اندام هوایی در شرایط مدیریت آبیاری IM100 و استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه با ۷۱۰/۶ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. این در حالی بود که کمترین وزن تر اندام هوایی مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM40 و در هر دو حالت استفاده از مالچ پلاستیکی و بدون مالچ پلاستیکی به ترتیب با ۳۹۰/۴ و ۳۷۷/۷ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۱). همچنین بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی در شرایط مدیریت آبیاری IM100 و استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه با ۲۵۹/۵ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد و کمترین وزن خشک اندام هوایی نیز مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM40 و در هر دو حالت استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه و بدون مالچ پلاستیکی به ترتیب با ۸۱/۴ و ۷۶/۷ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۱).



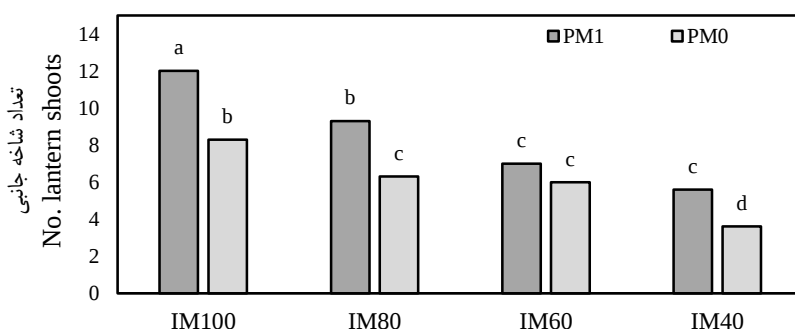
شکل ۱- ارزیابی اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر وزن تر و خشک اندام هوایی

Figure 1- Evaluation of the interaction effect of irrigation management and plastic mulch on the foliage wet and dry weight



شکل ۲- ارزیابی اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر شاخص سطح برگ

Figure 2- Evaluation of the interaction effect of irrigation management and plastic mulch on the leaf area index



شکل ۳- ارزیابی اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر تعداد شاخه‌های جانبی

Figure 3- Evaluation of the interaction effect of irrigation management and plastic mulch on the number of lateral branches

دلیل تأثیر منفی بر تشکیل گل و باروری باعث کاهش تعداد دانه در واحد سطح می‌شود. این کاهش ممکن است با کاهش رشد و نمو گیاه مرتبط باشد که منجر به کاهش ظرفیت منبع در گیاهان تحت تنش خشکی در مقایسه با گیاه تحت آبیاری کامل شود (Francia *et al.*, 2013). در شرایط وجود خشکی روند انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی بدلیل کاهش تعرق گیاه کند شده و شاخص برداشت نیز دچار کاهش خواهد شد (Shiukhy-Soqanloo *et al.*, 2021). نتایج حلیم و همکاران (Halim *et al.*, 2018) نیز موید کاهش شاخص برداشت در شرایط تنش بود و نشان دادند که اثر تنش خشکی بر تعداد غلاف، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و همچنین درصد روغن و پروتئین دانه گندم بسیار تأثیرگذار بود. وحدی و قلی‌نژاد (Vahdi & Gholinezhad, 2015) نیز اظهار داشتند که صفاتی از جمله؛ تعداد کل گره، تعداد شاخه فرعی، تعداد کل غلاف، تعداد دانه در بوته، عملکرد دانه، وزن هزاردانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت سویا تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفتند. محدود شدن شاخه‌دهی در شرایط کم‌آبی را می‌توان به‌عنوان یک شیوه سازگاری برای گیاه دارویی بادرنجبویه در نظر داشت. پژوهشگران در بررسی اثر کم‌آبیاری با تیمارهای ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بر آویشن باغی گزارش کردند که با افزایش شدت تنش خشکی، ارتفاع بوته، تعداد ساقه جانبی، وزن تر و وزن خشک اندام رویشی کاهش می‌یابد

بر پایه نتایج بدست آمده، اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر تعداد شاخه‌های جانبی حاکی از آن بود که در شرایط مدیریت آبیاری IM100 و استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه، بیشترین تعداد شاخه‌های جانبی با ۱۲ شاخه مشاهده شد. این در حالی بود که کمترین تعداد شاخه‌های جانبی با ۳/۶ شاخه مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM40 و بدون مالچ پلاستیکی بود (شکل ۳).

ارتفاع گیاهان تحت تأثیر خصوصیات ژنتیکی، شرایط محیطی نظیر رطوبت، نور، تغذیه، کمیت و کیفیت نور قرار می‌گیرد (Omidi *et al.*, 2021). معمولاً ارتفاع بوته بخش مهمی در تعیین عملکرد نیست ولی ارقامی که ارتفاع بلندتری دارند دارای عملکرد بیولوژیک بیشتری هستند. در اثر کمبود آب، تورژانس سلولی و در نتیجه رشد و توسعه سلول به‌ویژه در ساقه و برگ‌ها دچار کاهش می‌گردد. به همین دلیل اولین اثر محسوس و قابل توجه کم‌آبی از اندازه کوچکتر برگ‌ها یا ارتفاع گیاهان قابل تشخیص می‌باشد. به دنبال کاهش سطح برگ جذب نور نیز کاهش یافته و ظرفیت کل فتوسنتزی گیاه نیز کاهش می‌یابد و بدیهی است که با محدود شدن فرآورده‌های فتوسنتزی در این شرایط رشد گیاه و در نهایت عملکرد آن کاهش می‌یابد (Arabzadeh, 2012). همچنین گیاهان با قرار گرفتن در معرض تنش خشکی، نیز دچار کاهش آماس سلولی، سنتز آنزیم‌ها و مواد دیواره سلولی می‌شوند. خشکی در دوره طولانی شدن ساقه، به

(Omid et al., 2021). کم آبیاری موجب کاهش تعداد شاخه گل دهنده و ارتفاع ساقه در گیاه دارویی گل گاوزبان شد، کاهش رشد و توسعه گیاه می‌تواند به دلیل اختلال در تقسیم میتوز، کاهش تورژسانس و رشد و توسعه سلولی باشد (Taghizadeh Tabari et al., 2020). مطالعات مذکور و همچنین نتایج مهربان و همکاران (Mehraban et al., 2019) با یافته‌های این پژوهش مبنی بر کاهش ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه در شرایط بروز تنش خشکی مطابقت داشت.

ویژگی‌های بیوشیمیایی

بر پایه نتایج تجزیه واریانس، اثر ساده مدیریت آبیاری محتوای

فنل و فلاونوئید بادرنجبویه بسیار معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). این در حالی بود که اثر ساده کاربرد مالچ پلاستیکی بر محتوای فنل و فلاونوئید بادرنجبویه معنی‌دار بود اما تأثیر چندانی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی نداشت. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی به جز درصد اسانس، بر هیچ یک از ویژگی‌های بیوشیمیایی بادرنجبویه تأثیرگذار نبود (جدول ۴).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی، بهره‌وری آب، محتوای نسبی آب و درصد اسانس

Table 4- The results of variance analysis of the effect of irrigation management and plastic mulch on biochemical characteristics, water productivity, relative water content and essential oil

منبع تغییرات (S.O.V)	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square					
		آنتی اکسیدان Antioxidant activity (%)	فنل Phenol mgGA.g) (^۱)	فلاونوئید Flavonoid (mgQU.g ⁻¹)	بهره‌وری آب Water Productivity (kg.m ⁻³)	محتوای آب نسبی Relative water content (%)	درصد اسانس Essential oil percentage (%)
بلوک (Block)	2	5.2150ns	0.2460ns	0.1196ns	0.300ns	2.855ns	0.0028ns
مدیریت آبیاری (IM)	3	241.0665**	5.7365**	11.7788**	28.314**	1354.928**	0.0129*
بلوک × مدیریت آبیاری Block × IM	6	28.3701ns	0.9269ns	0.1223ns	3.754ns	21.009ns	0.0005n
مالچ (PM)	1	26.5651ns	10.3228**	1.1397*	372.881**	635.510**	0.2583**
مدیریت آبیاری × مالچ IM × PM	3	6.5317ns	1.6098ns	0.2773ns	30.356**	15.111ns	0.2481**
خطا (Error)	8	24.2309	0.4960	0.1695	1.203	13.485	0.0025
کل (Total)	23	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات (C.V)	-	7.1	6	3.2	3.7	6.4	5.6

**، * و ns به ترتیب نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطوح ۱، ۵ درصد و عدم معنی‌داری می‌باشند.

ns, *, * and ns indicate significant difference at 1%, 5% and non-significance levels, respectively.

در حالی بود که کمترین میزان آن در شرایط استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه، با ۱۱ میلی گرم اسید گالیک بر گرم دیده شد (شکل ۴). بر پایه یافته‌ها، بیشترین میزان فلاونوئید در شرایط مدیریت آبیاری IM40 و IM60 با ۱۴/۶ کوئرستین بر گرم مشاهده شد در حالی که کمترین میزان آن مربوط به شرایط IM100 و IM80 به ترتیب با ۱۲ و ۱۲/۳ میلی گرم کوئرستین بر گرم بود. همچنین در شرایط بدون مالچ پلاستیکی، بیشترین میزان فلاونوئید با ۱۳/۶ میلی گرم کوئرستین بر گرم بدست آمد این در حالی بود که کمترین میزان آن در شرایط استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه، با ۱۳/۲ میلی گرم کوئرستین بر گرم دیده شد (شکل ۴).

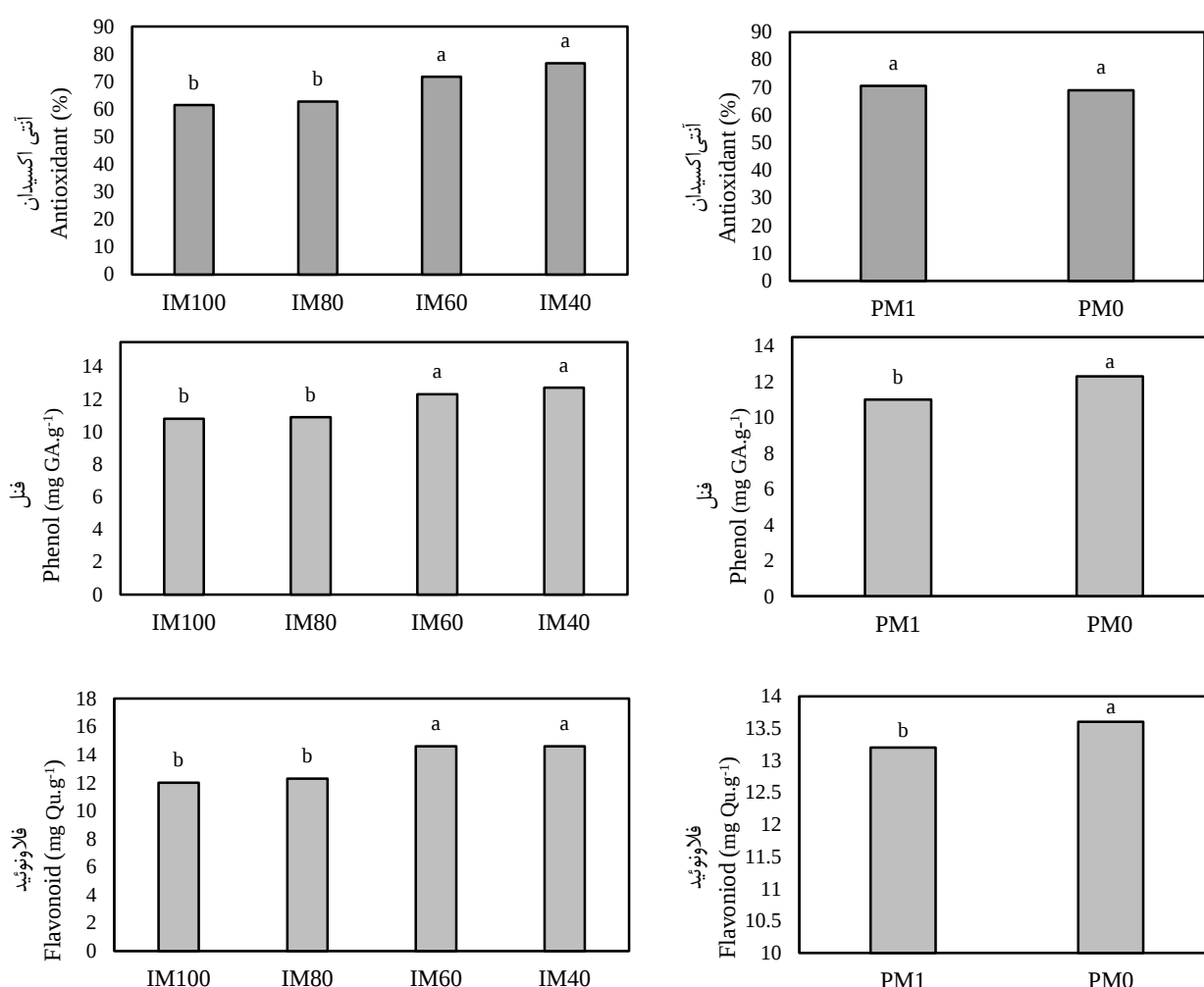
همچنین بر پایه یافته‌ها، میزان درصد اسانس بادرنجبویه، تحت تأثیر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی قرار گرفت. به‌طوری‌که بیشترین درصد اسانس مربوط به شرایط مدیریت آبیاری

بر پایه نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی در شرایط مدیریت آبیاری IM40 و IM60 به ترتیب با ۷۶/۷ و ۷۱/۸ درصد مشاهده شد. در حالی که کمترین میزان آن مربوط به شرایط IM80 و IM100 به ترتیب با ۶۱/۵ و ۶۲/۸ درصد بود. این در حالی بود که کاربرد مالچ در بستر کشت گیاه بادرنجبویه تأثیر چندانی قابل توجهی بر میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی نداشت و تغییرات تقریباً ثابت و یکسان بود (شکل ۴). همچنین بیشترین میزان فنل کل در شرایط مدیریت آبیاری IM40 و IM60 به ترتیب ۱۲/۷ و ۱۲/۳ میلی گرم اسید گالیک بر گرم وزن خشک مشاهده شد. در حالی که کمترین میزان آن مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM100 و IM80 به ترتیب با ۱۰/۸ و ۱۰/۹ میلی گرم اسید گالیک بر گرم بود. بر اساس نتایج بدست آمده، در شرایط بدون مالچ پلاستیکی، بیشترین میزان فنل کل با ۱۲/۳ میلی گرم اسید گالیک بر گرم بدست آمد. این

ثانویه مصرف می‌شود تا در شرایط بروز تنش از اکسیداسیون سلولی ممانعت بعمل آید (Sayadi et al., 2015). ترکیبات فنلی در قالب گروه‌های الکترون دهنده و پروتون دهنده قوی، وارد عمل شده و باعث جلوگیری از تنش اکسیداتیو می‌شوند و در نهایت رادیکال‌های آزاد را مهار می‌کنند (Ghorbanli, 2012). همچنین فلاونوئیدها عمل پاک‌سازی رادیکال‌های آزاد را با شناسایی تعداد و موقعیت گروه‌های OH فنلی موجود، انجام می‌دهند (Efeoglu et al., 2009; Jubany-Mari et al., 2010).

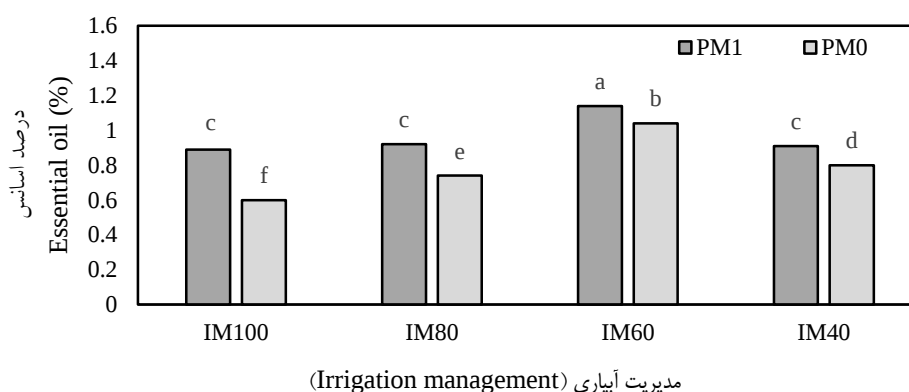
IM60 و استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه به ترتیب با ۱/۱۴ درصد بود و کمترین میزان آن در شرایط مدیریت آبیاری IM100 و بدون مالچ پلاستیکی با ۰/۵۳ درصد مشاهده شد (شکل ۵).

مکانیسم چگونگی و نحوه تأثیر تنش‌های محیطی بر تولید متابولیت‌های ثانویه که نقش دفاعی بسیار حائز اهمیتی را در گیاهان ایفا می‌نمایند، ساده نبوده و دارای پیچیدگی‌هایی است که گاهی دشواری‌هایی را ایجاد می‌کند. با این وجود شواهد بسیار زیادی نیز وجود دارند که نشان می‌دهند برخی از این ترکیبات دستخوش افزایش محسوس و قابل توجهی در شرایط بروز تنش می‌شوند (Koc et al., 2010). در شرایط بروز تنش و به دنبال آن، کاهش عملکرد گیاه، فرایند تثبیت کربن در طی فتوسنتز در راستای تولید متابولیت‌های



شکل ۴- ارزیابی اثرات ساده مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی، محتوای فنل و فلاونوئید

Figure 4- Evaluation of the simple effects of irrigation management and plastic mulch on antioxidant activity, phenol and flavonoid contents



شکل ۵- ارزیابی اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر درصد اسانس

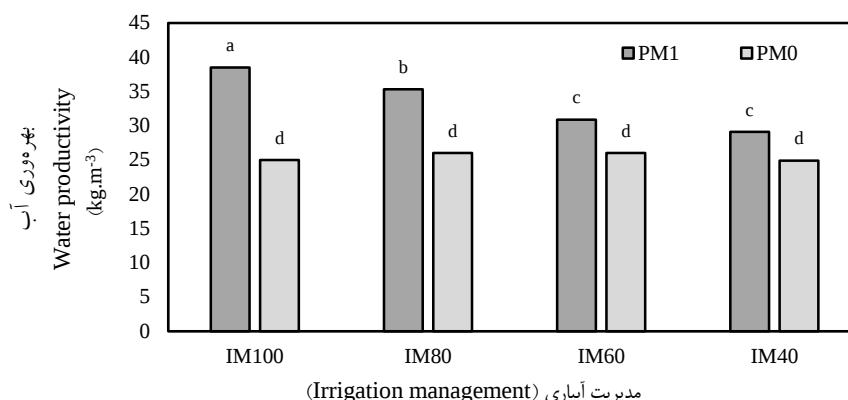
Figure 5- Evaluation of the interaction effect of irrigation management and plastic mulch on essential oil percentage

می‌شود، بنابراین رشد و نمو نامطلوب اندام‌های رویشی گیاه در شرایط تنش آبی شدید را می‌توان دلیل اصلی کاهش درصد اسانس در این شرایط مدیریت آب (IM40) قلمداد نمود. هم‌سنجی نتایج این پژوهش با مطالعه رضایی چپانه و همکاران (Reazei-Chiyaneh *et al.*, 2021) و شیرانی بیدآبادی و شریفی (Sharifi, 2021) در گیاه دارویی بادرنجبویه کاملاً مطابقت داشت.

بهره‌وری آب و محتوای نسبی آب

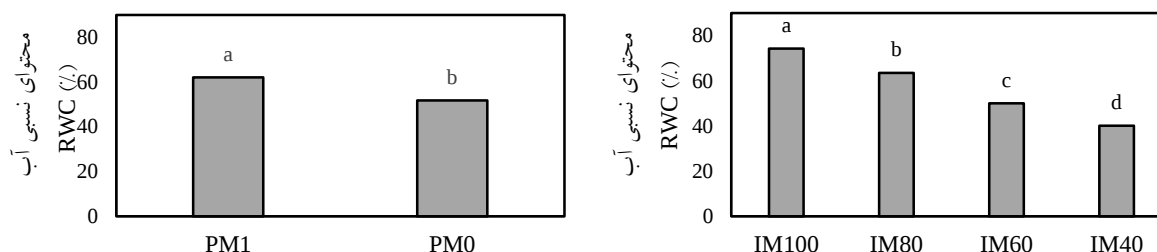
نتایج تجزیه واریانس تأثیر مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب، محتوای نسبی آب برگ و درصد اسانس گیاه بادرنجبویه معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). همچنین، اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب و درصد اسانس بادرنجبویه معنی‌دار بود ($P \leq 0.05$). این در حالی بود که اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر محتوای نسبی آب برگ بادرنجبویه معنی‌دار نبود (جدول ۴). بر پایه یافته‌ها، اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر میزان بهره‌وری آب حاکی از آن بود که در شرایط مدیریت آبیاری IM100 و استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه، بیشترین میزان بهره‌وری آب با ۳۸/۵ کیلوگرم بر متر مکعب مشاهده شد. این در حالی بود که کمترین میزان بهره‌وری آب در شرایط بدون مالچ پلاستیکی مشاهده شد (۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب). درحالی‌که میان هیچ‌کدام از سطوح مدیریتی آب تفاوت چندان قابل توجهی وجود نداشت و بیشتر کاربرد مالچ پلاستیکی بود که اثر گذار بود (شکل ۶).

سارکر و اوبا (Sarker & Uba, 2018)، گزارش کردند که در شرایط بروز تنش خشکی میزان ترکیبات فنلی، فلاونوئید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه تاج خروس را تحت تأثیر قرار داده و در شرایط تنش خشکی متوسط و شدید، میزان آنها افزایش یافت. از طرفی، نتایج کوماریا و همکاران (Komariah *et al.*, 2021)، نیز حاکی از افزایش محتوای فلاونوئید در چای ناشی از استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه در مقایسه تیمار شاهد (بدون مالچ) بود. نتایج برخی مطالعات از جمله آماره و دستا (Amare & Desta, 2021)، شیوخ و همکاران (Shiukhy *et al.*, 2015) و شیوخ و رائینی (Shiukhy Soqanloo & Raeini, 2018) نیز مؤید افزایش ویژگی‌های بیوشیمیایی ناشی از کاربرد مالچ‌های پلاستیکی بواسطه اصلاح خرداقلیم خاک و محیط نوری پیرامون گیاه می‌باشد. هم‌سنجی یافته‌های این پژوهش با نتایج ذکر شده، مطابقت داشت. نتایج مطالعات برخی از پژوهشگران بویژه مطالعات انجام شده در دو گیاه نعنای و ریحان حاکی از آن است که بالا بودن تراکم غده‌های مترشحه اسانس در اثر کاهش سطح برگ ناشی از تنش آبی، موجب انباشت بیشتر اسانس می‌گردد (Farzaneh *et al.*, 2010). در این پژوهش می‌توان درصد بالاتر میزان اسانس در شرایط مدیریت آبیاری IM60 را در مقایسه با شرایط مدیریت آبیاری IM100 و IM80 را به کاهش سطح برگ و در پی آن افزایش غده‌های ترشح‌کننده اسانس نسبت داد. همچنین دلیل عمده و اصلی کاهش درصد اسانس در شرایط مدیریت آبیاری IM40 را می‌توان اینگونه بیان کرد که گیاهانی که با این میزان آبیاری می‌شدند، رشد و نمو مناسب و مطلوبی نداشته و ضعیف‌تر بودند. با توجه به اینکه معمولاً بیشترین میزان اسانس در زمان گل‌دهی کامل تشکیل



شکل ۶- ارزیابی اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و کاربرد مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب

Figure 6- Evaluation of the interaction effect of irrigation management and plastic mulch on water productivity



شکل ۷- ارزیابی اثر برهمکنش مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر محتوای نسبی آب

Figure 7- Evaluation of the interaction effect of irrigation management and plastic mulch on relative water content

دادند که با اعمال شرایط تنش خشکی متوسط ($FC_{66\%}$) و شدید ($FC_{33\%}$)، میزان مصرف آب در مقایسه با تیمار شاهد ($FC_{100\%}$) دچار افزایش محسوسی شد. نتایج شاهرخ‌نیا و همکاران (Shahrokhnia *et al.*, 2017) حاکی از آن بود که میزان آب مصرفی گیاه در شرایط مدیریت آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبی در مقایسه با مدیریت سنتی، بیش از ۷۵ درصد کاهش یافت. با افزایش شدت تنش آبی، کاهش درصد رطوبت خاک و به دنبال آن کاهش پتانسیل آب برگ رخ می‌دهد. در نتیجه محدودیت در رشد و نمو مطلوب و پاسخ فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه تحت شرایط تنش آبی، را به همراه خواهد داشت (Shiukhy Soqanloo *et al.*, 2021). در این پژوهش نیز بررسی تغییرات میزان محتوای آب نسبی برگ نشان داد که حفظ رطوبت خاک در شرایط استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه و عدم تنش، با گذر از شرایط مدیریت آبیاری IM100 به مدیریت آبیاری IM40، روندی کاهشی داشت.

نتایج نشان داد که اثر ساده مدیریت آبیاری بر میزان محتوای نسبی آب برگ گیاه در شرایط مدیریت آبیاری IM100، در مقایسه با سایر مدیریت‌های آبیاری بسیار محسوس و آشکار بود. به‌طوری‌که بیشترین میزان محتوای نسبی آب برگ گیاه در شرایط مدیریت آبیاری IM100 با ۷۴/۳ درصد مشاهده شد. این در حالی بود که کمترین میزان محتوای نسبی آب برگ گیاه مربوط به شرایط مدیریت آبیاری IM40 با ۴۰/۱ درصد بود (شکل ۷). همچنین در شرایط کاربرد مالچ پلاستیکی سیاه بیشترین میزان محتوای نسبی آب برگ گیاه با ۶۲/۱ درصد مشاهده شد و کمترین میزان آن مربوط به شرایط بدون مالچ پلاستیکی با ۵۱/۸ درصد بود (شکل ۷).

گلستانی‌فر و همکاران (Golestani Far *et al.*, 2017) بیان کردند که با افزایش تنش خشکی از ۲۰ درصد به ۶۰ درصد تخلیه رطوبت خاک، بهره‌وری آب گندم کاهش یافت. که دلیل این امر را کاهش کربوکسیلاسیون در طول تنش و فاکتورهای اثر گذار بر انتشار گاز CO_2 به درون کلروپلاست ناشی از کاهش مصرف آب دانستند. شاه‌حسینی و همکاران (Shahhoseini *et al.*, 2012)، نیز نشان

نتیجه گیری

بر پایه یافته‌ها، ارزیابی مدیریت آبیاری و مالچ پلاستیکی بر بهره‌وری آب و عملکرد کمی و کیفی بادرنجبویه نشان داد که استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه در بستر کشت بادرنجبویه منجر به حفظ رطوبت خاک و بهبود شرایط کشت گردید و درنهایت، باعث افزایش رشد اندام‌های رویشی، افزایش بهره‌وری آب و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی شد. به‌طور کلی، با توجه به بحران کمبود منابع آب و

چالش کم‌آبی، آبیاری تحت شرایط IM80 و استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه در بستر کشت گیاه دارویی بادرنجبویه نتایج قابل قبول و مطلوب‌تری را در مقایسه با سایر سطوح مدیریت آبیاری و کشت بدون مالچ پلاستیکی به‌همراه داشت. بنابراین می‌توان با کاهش نیاز آبی بادرنجبویه از ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۸۰ درصد نیاز آبی، باعث ذخیره منابع آب آبیاری شد و از طرف دیگر با استفاده از مالچ پلاستیکی سیاه در بستر کشت گیاه، عملکرد کمی و کیفی بادرنجبویه را بهبود بخشید.

References

1. Alizadegan, F., Gholami Sefidkouhi, M.A., & Shiukhy, S. (2022a). Evaluation of treated wastewater irrigation effect on yield components and yield of maize (single cross 704). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(6), 1328-1337. (In Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.6.8.8>
2. Alizadegan, F., Gholami Sefidkouhi, M.A., & Shiukhy, S. (2022b). Evaluation of wastewater effects on soil chemical characteristics, microelements concentration, heavy metals accumulation and mize yield (Single Cross 704). *Journal of Water and Soil*, 36(4), 511-524. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.2022.77424.1178>
3. Amare, G., & Desta, B. (2021). Colored plastic mulches: impact on soil properties and crop productivity. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(4), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00201-8>
4. Arabzadeh, N. (2012). Physiologic responses of *Haloxylon aphyllum* to consecutive tensions of dryness and study of their role in improving resistance to dryness of vase twigs. *Asian Journal of Plant Sciences*, 11, 28-35. <https://doi.org/10.3923/ajps.2012.28.35>
5. Ebrahimzadeh, M.A., Pourmorad, F., & Hafezi, S. (2008). Antioxidant activities of Iranian Corn Silk. *Turkish Journal of Biology*, 32(1), 43-49. <https://journals.tubitak.gov.tr/biology/vol32/iss1/7>
6. Efeoglu, B., Ekmekçi, Y., & Çiçek, N. (2009) Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *South African Journal of Botany*, 75, 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2008.06.005>
7. El-Mageed, T., Semida, W.M., & El-Vahed, M.H. (2016). Effect of mulching on plant water status, soil salinity and yield of squash under summer-fall deficit irrigation in salt affected soil, *Agricultural Water Management*, 173, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.025>
8. Fahad, Sh., Bajwa, A., Nazir, U., Anjum, Sh.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, Sh., Nasim5, W., Adkins, S., Shah Saud, Sh., Ihsan, M.Z., Alharby, H., Wu, Ch., Wang, D., & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: *Plant Responses and Management Options*, 8, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
9. Farzaneh, A., Ghani, A., & Azizi, M. (2010). The effect of water stress on morphological characteristic and essential oil content of improved sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Plant Production*, 17(1), 103-111. (In Persian). <https://www.magiran.com/p807155>
10. Francia, E., Tondelli, A., Rizza, F., Badeck, F.W., Thomas, W.T.B., van Eeuwijk Romagosa, I., Stanca, A.M., & Pecchioni, N. (2013). Determinants of barley grain yield in drought-prone Mediterranean environments. *Italian Journal of Agronomy*, 8(1), 1-8. <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e1>
11. Ghorbanli, M., Bakhschi Khaniki, G., & Zakeri, A. (2012). Investigation on the effects of water stress on antioxidant compounds of *Linum usitatissimum* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 27(4), 647-658. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2012.4514>
12. Golestani Far, F., Mahmoodi, S., Zamani, G., & Sayyari, M.H. (2017). Effect of drought stress on water use efficiency and root dry weight of wheat (*Triticum aestivum* L.) and rye (*Secale cereale* L.) in competition conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(2), 438-450. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v15i2.53314>
13. Halim, G., Emam, Y., & Shakeri, E. (2018). Evaluation of yield, yield components and stress tolerance indices in bread wheat cultivars at post-anthesis irrigation cut-off. *Journal of Crop Production and Processing*, 7(4), 121-134. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jcpp.7.4.121>
14. Jubany-Marí, T., Munné-Bosch, S., & Alegre, L. (2010). Redox regulation of water stress responses in field-grown plants. Role of hydrogen peroxide and ascorbate. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(5), 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.01.021>
15. Karimi, S., Zahedi, B., and mumivand, H. (2020). Evaluation of the effect of drought stress on growth, essential oil and some physiological traits of four Basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivars. *Journal of Plant Production Research*, 27(2), 201-213 (In Persian with English Abstract). doi: 10.22069/jopp.2020.16509.2513.
16. Koc, E., Islek, C. & Üstun, A.S. (2010). Effect of cold on protein, proline, phenolic compounds and chlorophyll

- content of two pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties. *Gazi University Journal of Science*, 23, 1-6. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gujs/issue/7387/96708>.
17. Komariah, S., Pitaloka, D.D. A., Batubara, I., Nurcholis, w., Sandrawati, A., Setyawati, A., Syamsiyah, J., and Dewi, S. W. (2021). The effects of soil temperature from soil mulching and harvest age on phenol, flavonoid and antioxidant contents of Java tea (*Orthosiphon aristatus* B.). *Chem. Biol. Technol. Agric.* 8: 56. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00256-1>.
18. Mehraban, A., Tobe, A., Gholipour, A., Amiri, E., Ghafari, A., and Rostaii, M. (2019). The Effects of Drought Stress on Yield, Yield Components, and Yield Stability at Different Growth Stages in Bread Wheat Cultivar (*Triticum aestivum* L.). *Polish Journal Environmental Studies*, 28 (2), 739-746. doi: 10.15244/pjoes/85350.
19. Mokari, M., Abedinpour, M., and Dehghan, H. (2020). The effect of drought stress and sowing date on grain yield and water use efficiency in autumn wheat in Kashmar region. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(2), 167-189. doi.org/10.22092/jwra.2020.122256.
20. Naveed, M., Majeed, F., Taleb, A., Zubair, H.M., Shumzaid, M., Farooq, M.A., Baig, M.M.F.A., Abbas, M., Saeed, M., and Changxing, L.A. (2020). Review of Medicinal Plants in Cardiovascular Disorders: Benefits and Risks. *American Journal of Chinese Medicine*, 48(2), 259-286. doi: 10.1142/S0192415X20500147.
21. Nourbakhsh Rezaei, S. R., Shabani, L., Rostami, M., and Abdoli, M. (2019). The Effect of Different Concentrations of Cadmium Chloride on Oxidative Stress in Shoot Cultures of Lemon Balm. *Plant Productions*, 42(4), 509-522. doi: 10.22055/ppd.2019.24806.1567.
22. Omid, H., Pirjalili, F., & Ahmadi, K. (2021). Evaluation of the Effect of Drought Stress on Morphophysiological Characteristics of Three Populations of Balangu (*Lallemantia royleana* Benth.). *Journal of Horticultural Science*, 34(4), 605-620. (In Persian with English Abstract). doi: 10.22067/jhorts4.v34i4.82643.
23. Ray, R. R. L., Fares, A., and Risch, E. (2018). Effects of Drought on Crop Production and Cropping Areas in Texas. *Agricultural & Environmental Letters*, 14, 1-5. doi.org/10.2134/aer2017.11.0037.
24. Rezaei-Chiyaneh, E., Mahdaviakia, H., Hadi, H., Alipour, H., Kulak, M., Caruso, G., Siddique, K. H. M. (2021). The effect of exogenously applied plant growth regulators and zinc on some physiological characteristics and essential oil constituents of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) under water stress. *Physiol Mol Biol Plants*, 27(10):2201-2214. doi: 10.1007/s12298-021-01084-1.
25. Sarker, U. & Uba, Sh. (2018). Drought stress enhances nutritional and bioactive compounds, phenolic acids and antioxidant capacity of Amaranthus leafy vegetable. *BMC Plant Biology*, 18, 258, 1-15. doi: 10.1186/s12870-018-1484-1.
26. Sayadi, A., Ahmadi, J., Asghari, B. and Hoseini, S.M. (2015). Evaluation of drought and salinity stress effects on phenolic compounds of the medicinal plant (*Thymus vulgaris* L.). *Eco-phytochemical Journal of Medicinal Plants*, 2(4), 50-61. (In Persian with English Abstract). <https://sid.ir/paper/247820/fa>.
27. Shahhoseini, Z., Gholami, A., and Asghari, H. (2012). Effect of arbuscular mycorrhizae and humic acid on water use efficiency and physiological growth indices of maize under water deficit condition. *Arid Biome Scientific and Research Journal*, 2 (1), 39-57. (In Persian with English Abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008790.1391.2.1.4.9>.
28. Shahrokhnia, M.A., Jowkar, L. and Rakhshandehru, M. (2017). Influence of water stress on tomato production using leaf temperature and soil moisture indicators under seedling cultivation. *Irrigation and Water Engineering*, 7(2), 97-111 (In Persian with English Abstract). <https://sid.ir/paper/247132/fa>.
29. Shirani Bidabadi, S., and Sharifi, P. (2021). Strigolactone and Methyl Jasmonate-Induced Antioxidant Defense and the Composition Alterations of Different Active Compounds in *Dracocephalum kotschyi* Boiss Under Drought Stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40: 878-889. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10157-6>.
30. Shiukhy Soqanloo, S. & Raeini, M. (2018). Red Plastic Mulch Effect on Antioxidant Activity and Quality Characteristics in Different Strawberry Cultivars. *Journal of Plant Production Research*, 25(3), 13-25. (In Persian with English Abstract). doi: 10.22069/jopp.2018.12913.2163.
31. Shiukhy Soqanloo, S. (2023). Modeling the impact of water deficit on wheat yield under climate change conditions. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (1), 71-89. (In Persian with English Abstract). doi: 10.22069/jwsc.2023.21024.3614.
32. Shiukhy Soqanloo, S., Mousavi-Baygi, M., Torabi, B., & Raeini-Sarjaz, M. (2021). Evaluation of climate change effects on irrigated wheat CV. Mehregan yield under drought stress condition (Case study: Varamin). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(2), 15-28. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22125/agmj.2021.297373.1121>
33. Shiukhy, S., Raeini-Sarjaz, M., & Chalavi, V. (2015). Colored plastic mulch microclimates affect strawberry fruit yield and quality. *International Journal of Biometeorology*, 59(8), 1061-1066. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0919-0>
34. Singh, H.P., Sharma, P., Kumar, N., Singh, D., & Singh, B. (2017). Influence of mulching on growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under protected environment. *International Journal of Biotechnology*, 19(2), 1-6. <https://doi.org/10.9734/BJI/2017/35410>

35. Taghizadeh Tabari, Z., Asghri, H., Abbasdokht, H., & Babakhanzadeh Sajirani, E. (2020). Effects of biochar and salicylic acid on physiological and morphological characteristics of European borage (*Borago officinalis* L.) under water deficit conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 36(1), 98-111. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2020.127841.2642>
36. Vahdi, N., & Gholinezhad, E. (2015). Evaluation of drought tolerance of some soybean cultivars. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(1), 1-9. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2015.101321>
37. Wei, Y., Jin, J., Jiang, Sh., Ning, Sh., & Liu, L. (2018). Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei plain, China. *Agronomy*, 9, 1-16. <https://doi.org/10.3390/agronomy8070097>

Research Article

Vol. 38, No. 6, Feb.-Mar. 2025, p. 683-697

A Comparative Analysis of Energy Efficiency of Two Sprinkler Irrigation Systems for Wheat Cultivation (Case Study: Dehgolan Plains, Kurdistan)

P. Tahmasbi^{1*}, F. Dalvand², S.A. Hosseini³, B. Karimi⁴, H. Ghadrshnas⁵

1, 2 and 3- Ph.D. Candidate in Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir)

4- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

5- Senior Expert in Water Resources, Kurdistan Regional Water Authority, Sanandaj, Iran

Received: 08-10-2024

Revised: 07-12-2024

Accepted: 01-01-2025

Available Online: 01-01-2025

How to cite this article:

Tahmasbi, P., Dalvand, F., Hosseini, S.A., Karimi, B., & Ghadrshnas, H. (2025). A comparative analysis of energy efficiency in two sprinkler irrigation systems for wheat cultivation (Case study: Dehgolan Plains, Kurdistan). *Journal of Water and Soil*, 38(6), 683-697. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90134.1439>

Introduction

Agriculture plays a dual role in the energy sector meaning that it acts both as a source of raw material for bioenergy production and as a major consumer of energy, particularly in the processes of planting, cultivation and harvesting, transportation, processing, and storage of agricultural products. Among the numerous challenges facing the agricultural sector, optimizing energy or input consumption is of paramount importance. These key inputs play a crucial role in ensuring food security and economic stability for the country. One of the most important agricultural development programs in the country should be to increase efficiency of energy consumption in the agricultural sector. In Iran, approximately 9.2 million hectares have been equipped with modern irrigation systems (pressure system) which has increased the water productivity index from 0.87 kg m⁻³ in 2014 to 0.32 kg m⁻³ in 2014. Accordingly, it is predicted to reach 0.60 kg m⁻³ hectares until 2025. The Dehgolan Plain, located in the east of Sanandaj city, has an area of 84,982 square kilometers. Groundwater is the only source of water for agriculture in the region. Due to the annual decrease in the groundwater level, energy consumption for water extraction has increased. Common irrigation systems in the region's farms include fixed-mobile sprinkler classic rain irrigation systems, center pivot, and lateral roll. Thus, it seems necessary to evaluate the energy productivity and efficiency indexes in the mentioned plain. The main objective of this study is to evaluate the energy consumption indexes of wheat in farms under fixed-mobile sprinkler classic and Willet rain irrigation systems.

Materials and Methods

This study was conducted in the farms of Dehgolan plains where the energy consumption trend of input factors in two irrigation systems was investigated. All information related to input factors and working hours of machinery, agricultural equipment, and manpower was recorded at the end of the cropping season 1400-1401 through filling out questionnaires. The studied farms in this research were all under dry wheat cultivation and equipped with two rain irrigation systems, system 1 (fixed-mobile sprinkler classic) and system 2 (Wheel move irrigation). The required input factors for wheat production in each hectare were determined. The amount of different input factors for conversion to energy standard was calculated using energy coefficients and equivalents. As a result, energy productivity, energy use efficiency, specific energy, and net energy indexes were used to



©2024 The author(s). 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.2025.90134.1439>

investigate the energy consumption trend of wheat in the two mentioned irrigation systems.

Results and Discussion

The results of this study showed that the total input energy for wheat production in systems (1) and (2) was 85943.97 and 69189.04 MJ ha⁻¹, respectively and energy consumption in the Willet rain irrigation system was higher than in the fixed-mobile sprinkler classic rain irrigation system due to the high consumption of electricity and irrigation water. The electricity consumption in both systems accounted for the highest energy consumption. Moreover, the energy productivity and efficiency of the two systems were almost equal as well as the net energy of irrigation system (1) and irrigation system (2) was 41510.96 and 64156.03 MJ ha⁻¹, respectively.

Conclusion

In conclusion, this study focuses on evaluating the energy trends in rain irrigation systems used in dry wheat farms in the Dehgolan plains, Kurdistan province, Iran. In this study, the energy indexes of wheat in smallholder farmers' farms in Dehgolan plain, Kurdistan province, were evaluated. The studied farms were categorized into two groups, system (1) (fixed-mobile sprinkler classic rain irrigation system) and irrigation system (2) (Willet rain irrigation system), the energy source of which was electricity for both systems. At the end of the cropping season, the total amount of input and output factors were collected by filling out questionnaires in person, and to validate the amount of electricity consumption, its amount was obtained from the Dehgolan Electricity Company. The results of the research showed that the energy consumption per unit of wheat production in the Willet irrigation system was higher than in the fixed-mobile sprinkler classic irrigation system. This difference was due to the higher consumption of electricity and irrigation water in the Willet irrigation system. The energy productivity and efficiency indexes were almost equal in both systems. Eventually, the net energy of the fixed-mobile sprinkler classic irrigation system was higher than that of the Willet irrigation system.

Keywords: Consumed electricity, Input energy, Irrigation system, Performance, Wheel move

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۳، ص. ۶۸۳-۶۹۷

بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی در کشت گندم (مطالعه موردی: دشت‌های دهگلان، استان کردستان)

پیمان طهماسبی^{۱*} - فاطمه دالوند^۲ - سید ابوالفضل حسینی^۳ - بختیار کریمی^۴ - هیرش قدرشناس^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

چکیده

تولیدات محصولات کشاورزی به انرژی ورودی و خروجی مزارع بستگی دارد. به این خاطر استفاده کارا از منابع انرژی مصرف‌شده در تولید محصولات کشاورزی، یکی از مؤلفه‌های اصلی کشاورزی پایدار به‌شمار می‌رود. هدف از این پژوهش ارزیابی الگو انرژی مصرفی محصول گندم در دو سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبپاش - متحرک (سامانه ۱) و ویلموو (سامانه ۲)، است. اطلاعات مورد نیاز، شامل کل نهاده‌های ورودی (مصرفی) ساعات کارکرد ماشین‌ها و نیروی انسانی به‌صورت کاملاً تصادفی در ۵۰ مزرعه انتخابی در قالب پرسشنامه از کشاورزان در دشت شهرستان دهگلان در طول فصل زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ استخراج شد. در پایان فصل آبی، میزان برق مصرفی مزارع در واحد هکتار از شرکت برق منطقه‌ای شهرستان مذکور، دریافت شد. مقدار کل انرژی‌های ورودی در سامانه (۱) و (۲) به‌ترتیب ۶۹۱۸۹/۰۴ و ۸۵۹۴۳/۹۷ مگاژول در هکتار محاسبه گردید. مقدار انرژی خروجی در دو سامانه (۱) و (۲) به‌ترتیب ۱۱۰۷۰۰ و ۱۵۰۱۰۰ مگاژول در هکتار به‌دست آمد. بر این اساس مقادیر شاخص کارایی انرژی مصرفی در دو سامانه (۱) و (۲) به‌ترتیب ۱/۶۰ و ۱/۷۵ محاسبه گردید. سهم انرژی مستقیم در دو سامانه (۱) و (۲) ۱۳۹۳۳/۲۳ و ۱۷۶۷۸/۷۳ مگاژول در هکتار و همچنین سهم انرژی‌های تجدیدپذیر که یکی از معیارهای پایداری بوم نظامی کشاورزی است، در سامانه (۱) و (۲) به‌ترتیب ۵۲۰۹/۶۸ و ۴۹۲۹/۵۸ مگاژول در هکتار برآورد گردید. در کل با توجه به نتایج در دشت‌های شهرستان دهگلان به لحاظ جنبه‌های مصرف انرژی به‌نظر می‌رسد سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت - آبپاش متحرک کاراتر از سامانه آبیاری بارانی ویلموو می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انرژی ورودی، سامانه آبیاری، برق مصرفی، ویلموو، عملکرد

مقدمه

کشاورزی و انرژی متأثر از هم‌دیگر می‌باشند (Ghorbani et al., 2011). چالش عمده در بخش کشاورزی تأمین نیازهای غذایی جهان است (Giri et al., 2023). سنجش و بررسی مصرف انرژی نهاده‌ها یک رویکرد مهم برای بهبود جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه‌های تولید است. انرژی عنصری حیاتی در سامانه‌های تولید

تولیدات محصولات کشاورزی به انرژی ورودی و خروجی مزارع بستگی دارد (Nasseri., 2024). بخش کشاورزی، همچنان که عرضه‌کننده انرژی است، مهم‌ترین مصرف‌کننده انرژی نیز است (Nasseri, 2024; Elsoragaby et al., 2019). ازاین‌رو بخش

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir)

۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۵- کارشناس ارشد منابع آب، سازمان آب منطقه‌ای استان کردستان، سنندج، ایران

بیشترین سطح زیر کشت گیاهان زراعی را به خود اختصاص می‌دهد، از سطح ۶ میلیون هکتار ۲ میلیون هکتار آن به گندم آبی و چهار میلیون هکتار آن به گندم دیم اختصاص یافته است (Ministry of Agriculture Jihad., 2020). با عنایت به اهمیت گندم در سبد غذایی خانوارهای ایرانی و صنایع غذایی کشور، این محصول به‌عنوان محصول مورد مطالعه در این پژوهش در نظر گرفته شده است.

سفره‌های آبخوان زیرزمینی در اکثر کشورها از جمله ایران یکی از منابع مهم تأمین آب برای آبیاری مزارع کشاورزی است. همچنین کمبود منابع آب سطحی و عواملی همچون رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه مزارع شیلات باعث استفاده بی‌رویه از این منابع آبی به‌خصوص در استان کردستان شده است. از دشت‌های حاصلخیز غرب کشور دشت دهگلان با مساحت ۹۸۲/۸۴ کیلومتر مربع است که در موقعیت شرقی شهرستان سنندج واقع گردیده است. در آبخوان دشت دهگلان بیش از ۹۶۵ چاه مجاز و غیرمجاز فعال وجود دارد. با مقایسه و بررسی تغییرات تراز سطح ایستابی آبخوان دشت مذکور طی دوره سی ساله (۱۳۶۶-۱۳۹۶) نتایج نشان داد که میزان افت سالانه آبخوان سالانه در حدود ۱/۳۳ متر بود که این میزان بیش از دو برابر متوسط کشوری است (Niazmand et al., 2023). همچنین طی دوره مذکور با محاسبه بیلان آب زیرزمینی، کسر تجمعی آبخوان ۱۷/۴ میلیون متر مکعب بود (Bayazidi & Kaki, 2021). (Ghahroudi et al., 2023) نشان دادند به‌طور متوسط در دشت دهگلان استان کردستان طی دوره زمانی ۱۳۹۲-۱۴۰۰، سالانه به‌میزان شش سانتی‌متر به دلیل افت تراز سطح ایستابی آبخوان منطقه فرونشست رخ داده بود. آبخوان ممنوعه دشت دهگلان عمده‌ترین منبع تأمین آب کشاورزی منطقه است که سالانه به‌دلیل نبود مدیریت درست، برداشت بی‌رویه و حفر چاه‌های غیرمجاز وضعیت آبخوان سال به‌سال بحرانی‌تر می‌شود.

سامانه‌های نوین آبیاری رایج در دشت دهگلان اکثراً سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت-آبیاش متحرک بودند؛ که در برخی از نقاط دشت مذکور سامانه‌های آبیاری بارانی ویلموو (لوله چرخ‌دار) و سنتریپوت (عقربه دوار مرکز) نیز گزارش شده است. مزیت این سامانه‌های آبیاری پتانسیل و راندمان آبیاری بالایی آن‌ها است و معمولاً به انرژی زیادی هم نیاز دارند. تنها منبع انرژی سامانه‌های ایستگاه پمپاژ چاه‌های مزارع مورد مطالعه دشت مذکور برای انتقال و توزیع آب داخل مزارع در دو سامانه‌های آبیاری بارانی مذکور (سامانه آبیاری ویلموو و کلاسیک ثابت آبیاش-متحرک)، برق (الکتریسته) بود. انرژی نقش بسیار مهمی در حوضه کشاورزی و سامانه‌های آبیاری دارد (Gholami, Ebrahimian, & Nouri, 2015). در واقع انرژی مؤلفه‌ای ضروری و کلیدی برای هر سامانه آبیاری تحت فشار است. بهره‌برداری بیش‌ازحد مجاز از منابع آب‌های زیرزمینی باعث افت شدید تراز سطح آب زیرزمینی شده است که این امر موجب بالا بردن

است که برای حرکت در مسیر تولید پایدار باید ارزیابی شود (Kheiralipour, 2022). زیرا انرژی از شاخص‌های بسیار مهم جهت تولید محصولات کشاورزی است و بهره‌وری انرژی به‌صورت میزان تولید محصولات به مقدار انرژی مصرفی تعریف شده است که مسئولان حوضه کشاورزی بایستی در ارتقاء آن کوشا باشند (Almasi et al., 2008). از طرف دیگر ارزیابی انرژی نهاده‌ها به‌عنوان یک ابزار مهم به‌منظور طراحی، مدل‌سازی و بررسی عملکرد سامانه‌های کشاورزی توسط اکثر محققین در مناطق مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kitani, 1999). از این‌رو آنالیز و بررسی انرژی (ورودی و خروجی) از طریق محاسبه و آنالیز محتویات، شاخص‌ها و فرم‌های انرژی، موضوعات اخیر هستند که باعث افزایش کارایی انرژی مصرفی نهاده‌ها در حوضه کشاورزی می‌شوند. عوامل زیادی در کارایی مصرف انرژی در بخش کشاورزی دخیل است که ازجمله می‌توان به اندازه مزارع، سطح مکانیزاسیون و نوع محصول کشت شده اشاره کرد به‌عبارتی مصرف انرژی در سامانه‌های مختلف تولیدات کشاورزی متفاوت است (Mohammadi et al., 2014). انرژی در بخش کشاورزی به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر طبقه‌بندی می‌گردد (Vahedi & Zarifneshat, 2021). امروزه برای تولید محصولات کشاورزی، نهاده‌هایی همچون سوخت، برق مصرفی، ماشین و ادوات کشاورزی، بذر، کودها و سموم کشاورزی سهم قابل ملاحظه‌ای در تأمین منابع انرژی را دارند (Hamedani et al., 2011). همچنین در بسیاری از مطالعات صورت گرفته در زمینه کارایی مصرف انرژی در تولید محصولات مختلف کشاورزی مصرف دو نهاده برق مصرفی و سوخت فسیلی که عمده‌تأ برای استحصال آب آبیاری استفاده می‌گردد به‌عنوان مهم‌ترین نهاده‌های مصرفی ذکر شده‌اند (Zangeneh et al., 2010; Ghasemi-Mobtaker et al., 2012; Mohammadi et al., 2014; Nabavi-Pelesaraei et al., 2017).

گندم (*Triticum aestivum* L.) به‌عنوان منبع اصلی غذایی عمده جهان، بیش از ۷۰ درصد کالری روزانه مورد نیاز انسان را تأمین می‌کند (Zulfiqar et al., 2023). این غله پرمصرف و با اهمیت در امنیت غذایی بیش از ۲۱ درصد از جمعیت جهان نقش اساسی ایفا می‌کند و در مساحتی بیش از ۲۰۰ میلیون هکتار در سراسر جهان کشت می‌گردد (Senbeta & Worku, 2023) که از این لحاظ وسیع‌ترین محصول کشت شده به‌حساب می‌آید (Food and Agriculture Organization of the United Nations, n.d.). در ایران با توجه به اهمیت محصول گندم در امنیت غذایی مردم، این محصول از اهمیت فراوانی در سیاست‌گذاری‌ها و جهت‌گیری‌های دولت‌ها و دست‌اندرکاران و متولیان حوضه کشاورزی برخوردار است (Mirbagheri et al., 2017). همچنین سطح زیر کشت این محصول راهبردی در ایران تقریباً ۶ میلیون هکتار است که با ۵۰ درصد

نسبت انرژی نیز افزایش می‌یابد. یدی و همکاران (Yadi et al., 2022)، با بررسی میزان مصرف انرژی ۱۰ مزرعه تولید گندم و ارتباط انرژی ورودی و خروجی در منطقه استان ساری نشان دادند که میانگین انرژی ورودی به میزان ۱۴۵۹۷/۷۶ مگاژول در هکتار بود. از کل انرژی‌های ورودی انرژی مستقیم و غیرمستقیم به‌ترتیب ۳۳۵۱/۲۶ مگاژول در هکتار و ۱۱۲۴۵/۶۹ مگاژول در هکتار را دارا بودند. میانگین عملکرد دانه گندم ۴۲۷۵ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین میانگین بهره‌وری انرژی را معادل ۰/۲۹ کیلوگرم بر مگاژول گزارش کردند. محققین دیگر (Gökdoğan & Sevim, 2016) با تحلیل انرژی مصرفی تولید محصول گندم در دوازده روستای منطقه اسکیل استان آسکاری ترکیه، انرژی ورودی و خروجی را به‌ترتیب ۲۵۸۷۶/۲۹ و ۷۶۹۹۰/۹۶ مگاژول در هکتار گزارش کردند. همچنین در این مطالعه کارایی انرژی، بهره‌وری انرژی، انرژی ویژه و افزوده خالص انرژی را به‌ترتیب ۲/۹۷، ۰/۲ کیلوگرم در ژول، ۴/۹۴ مگاژول در کیلوگرم و ۵۱۱۱/۶۷ مگاژول در هکتار به‌دست آوردند. نظری و همکاران (Nazari et al., 2016) طی پژوهشی در محدوده شبکه آبیاری و زه‌کشی دشت قزوین میزان انرژی لازم را جهت تأمین یک متر مکعب آب در سامانه‌های آبیاری بارانی متحرک پیوسته (سنتر و لینیر)، سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت-آبیاش متحرک و سامانه آبیاری موضعی را به‌ترتیب ۰/۲۰۵، ۰/۲۹۰ و ۰/۲۰۲ کیلووات ساعت در متر مکعب به‌دست آوردند. قدمی فیروزآبادی و اکبری (Ghadami Firouzabadi & Akbari, 2024) به بررسی تأثیر انواع سامانه‌های آبیاری بر میزان حجم آب مصرفی و عملکرد محصول گندم در استان همدان پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین حجم آب مصرفی به‌ترتیب برای سه سامانه آبیاری قطره‌ای، بارانی و سطحی به‌ترتیب ۴۱۵۳، ۴۰۹۰ و ۵۹۱۸ متر مکعب در هکتار بود و میزان متوسط عملکرد مربوط به سامانه آبیاری قطره‌ای به میزان ۵۵۸۱ کیلوگرم در هکتار و در دو سامانه آبیاری بارانی و سامانه آبیاری سطحی به‌ترتیب ۴۳۸۱ و ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش کردند. با توجه به این که حوضه کشاورزی به‌ترتیب بعد از حوضه‌های خانگی و صنعتی در ایران در رتبه سوم مصرف برق قرار دارد (Ghadami Firouzabadi & Akbari, 2024).

بحث بحران کمبود آب و رشد سریع سامانه‌های آبیاری تحت فشار در دشت دهگلان استان کردستان چند دهه‌ای است موردتوجه مسئولین و محققین قرار گرفته اما هیچ مطالعه‌ای در ارتباط با روند انرژی مصرفی در این سامانه‌ها گزارش نشده است. لذا با توجه به نتایج اهمیت نهاده‌های مصرف‌شده به‌ویژه آب در کشاورزی و سهم بالای انرژی الکتریسیته مصرفی مورد نیاز برای پمپاژ آب در منطقه به‌علت پائین رفتن سطح تراز آبخوان، هدف این تحقیق مطالعه بررسی روند انرژی و تعیین شاخص‌های انرژی در تولید محصول استراتژیک منطقه (گندم) تحت دو سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت-

انرژی مورد نیاز جهت پمپاژ آب‌های زیرزمینی می‌گردد. (Bayat et al., 2022) با توجه به افت سالیانه سطح ایستابی آبخوان، انرژی مصرفی برای پمپاژ آب افزایش می‌یابد. بنابراین بالا بردن سطح بهره‌وری انرژی یکی از راه‌حل‌های چالشی بخش کشاورزی در آینده‌ای بسیار نزدیک است. از این‌رو شناخت و آگاهی یافتن از میزان بهره‌وری انرژی ورودی و خروجی در سامانه‌های آبیاری اولین قدم جهت مدیریت و بهینه کردن استفاده از انرژی‌های مصرفی خواهد بود. زیرا تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی وابسته به انرژی است (Gholami et al., 2015). ضمن این که برای برآورد ساختن نیازهای غذایی جمعیت رو به رشد بشر، یک سامانه پایدار با بهره‌وری مطلوب باید در اولویت قرار بگیرد. در نتیجه تجزیه و تحلیل سامانه‌های مختلف کشاورزی می‌توان به‌میزان استفاده از کل اشکال انرژی پی‌برد و می‌توان از منابع محدود نظیر زمین، آب و منابع بیولوژیکی برای نسل‌های آینده محافظت کرد (Pimentel, Pimentel, & Food, 1996). هر چند کشاورزی زمانی از بهره‌وری مطلوب انرژی برخوردار خواهد بود که سامانه‌های آبیاری مزارع، علاوه بر عملکرد هیدرولیکی مناسب از مصرف انرژی کارآمد نیز برخوردار باشد (Sánchez-Sutil & Cano-Ortega, 2021). مطالعات مختلفی در مورد توازن انرژی در سامانه‌های زراعی به انجام رسیده است (Ozkan, Akcaoz, & Ozkan et al., Fert, 2004 ; Tipi, Cetin, & Vardar, 2009). به تحلیل انرژی ورودی و خروجی در کشاورزی ترکیه به‌منظور تعیین مصرف انرژی در دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۵ پرداختند. نهاده‌های مورد نظر در محاسبات مصرف انرژی شامل نیروی انسانی، ماشین‌ها، الکتریسیته، گازوئیل، کودهای شیمیایی، بذر و انرژی خروجی شامل ۳۶ محصول کشاورزی بود. نتایج نشان داد که کل انرژی‌های ورودی و خروجی در طی زمان افزایش یافته اما نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی طی زمان کاهش پیدا کرده است. یعنی در حقیقت بخش کشاورزی در مصرف نهاده‌ها به‌صورت کارا عمل نکرده است. (Sing et al., 2007) به‌منظور بیشینه کردن عملکرد محصول گندم به مقایسه الگوهای مصرف انرژی در نقاط مختلف هند پرداختند. نتایج نشان داده بود که سطح تکنولوژی، انرژی‌های ورودی و عوامل اقلیمی و زراعی جزء مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تولید گندم به شمار می‌روند. ضمن این که بیش‌ترین میزان انرژی ورودی برای گندم ۱۷/۸ گیگا ژول در هکتار و بالاترین نسبت انرژی ۵/۲ را محاسبه کردند. برخی محققین (Tipi et al., 2009) با ارزیابی مصرف انرژی از ۹۷ مزرعه گندم در ایالت مارماری ترکیه نشان دادند که انرژی مصرفی برای تولید گندم به میزان ۲۰۶۵۳/۵ مگاژول در هکتار بود که در میان انرژی مصرفی به‌ترتیب سوخت و کودهای شیمیایی با ۴۵/۱۵ درصد و ۳۴/۲۱ درصد بیش‌ترین سهم را در کل انرژی مصرفی داشتند. همچنین نسبت انرژی را ۳/۰۹ برآورد کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش اندازه مزارع گندم

آبیاش متحرک و سامانه آبیاری بارانی ویلموو خواهد بود.

مواد و روش

مشخصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهرستان دهگلان با وسعت ۱۷۵۰ کیلومترمربع، یکی از دشت‌های حاصلخیز استان کردستان است؛ که نقش بسیار مهمی در رشد اقتصاد مردم و کشاورزی استان ایفا می‌کند. دشت‌های دهگلان که قطب کشاورزی مکانیزه غرب کشور محسوب می‌شود در ۴۵ کیلومتری شرق شهر سنندج با عرض جغرافیایی ۳۵ تا ۳۵/۵ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۴۷/۷ تا ۴۷/۲ درجه شرقی به نسبت نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. میانگین بارش سالانه این شهرستان ۳۵۲ تا ۳۹۶ میلی‌متر بوده و در ارتفاع ۱۸۷۶ متر از سطح دریا واقع شده است. وضعیت توپوگرافی دشت دهگلان ملایم، با دامنه تغییرات ارتفاع ۳۱۹ متر، حداکثر ارتفاع ۲۰۵۰ متر و حداقل ارتفاع ۱۷۳۱ متر است. سطح زیرکشت محصولات زراعی در دشت دهگلان حدود ۱۹ هزار هکتار است محصول گندم از عمده تولیدی مزارع بود که از دو سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت- آبیاش متحرک (سامانه ۱) و ویلموو (سامانه ۲) برای آبیاری محصول مذکور استفاده می‌شد (Niazmand et al., 2023).

نحوه جمع‌آوری داده‌ها

اطلاعات مورد نیاز تحقیق شامل عملیات زراعی، میزان و نوع نهاده‌های مصرفی و عملکرد محصول گندم در این مطالعه از طریق مراجعه حضوری و تکمیل پرسشنامه، به‌صورت چهره‌به‌چهره توسط کشاورزان مربوطه در منطقه مذکور در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ تهیه گردید و با استفاده از آمار و اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان و نیز باتجربه‌ها، کارشناسان و متخصصان کشت محصول گندم در سطح شهرستان درستی این داده‌ها کنترل گردید. پس از جمع‌آوری داده‌ها برای هر پارامتر میانگین‌گیری شد. در مرحله بعدی داده‌های مربوط به انرژی ورودی و خروجی مورد نیاز برای تولید محصول گندم در هکتار مشخص گردید و برای تبدیل مقادیر مختلف نهاده‌ها (ورودی و خروجی) به واحد انرژی (مگاژول در هکتار) طبق جدول ۱ از ضرایب و هم‌ارزهای استاندارد انرژی استفاده گردید.

نهاده‌های مصرفی ورودی و خروجی در هر دو سامانه مذکور

نهاده ورودی نیروی انسانی، از مجموع ساعات نیروی کارگری که صرف عملیات‌های مختلف زراعی نظیر (شخم، تسطیح، مرزبندی، دیسک، آبیاری، کشت بذر، کودپاشی، سم‌پاشی، برداشت، حمل و نقل

و غیره) می‌گردد محاسبه شد. میزان محاسبه شده در معادل انرژی آن یعنی عدد ۱/۹۶ مگاژول ضرب و میزان انرژی نیروی انسانی بر حسب مگاژول در هکتار محاسبه شد. نهاده ورودی ماشین‌ها از مجموع ساعات کارکرد ماشین‌ها و ادواتی که از کاشت تا برداشت و همچنین حمل و نقل مورد استفاده قرار گرفته می‌شوند. مقدار گازوئیل و روغن که جهت سوخت ماشین‌ها مختلف برای عملیات (شخم، کاشت، آبیاری، کود دهی، سم‌پاشی، برداشت و حمل و نقل) در هر هکتار از مزارع مورد استفاده قرار گرفته شد، در زیرمجموعه نهاده سوخت مصرفی قرار گردید. کودهای شیمیایی یکی از مهم‌ترین نهاده‌های ورودی به بوم نظام‌های کشاورزی است. کودهای شیمیایی (نیتروژن و فسفر) از جمله کودهایی مورد استفاده در دشت‌های مذکور بودند که در مزارع گندم مورد مطالعه در این تحقیق گزارش شده بود. همچنین در مزارع گندم مصرف کود دامی گزارش شد. مقدار مصرف سموم کشاورزی مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه شامل قارچ‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها بودند و تحت نهاده مواد شیمیایی ارزیابی گردید. یکی دیگر از نهاده‌های ورودی آب مصرفی است. بخش عظیمی از تأمین اراضی آبی دشت‌های دهگلان استفاده از آب آبخوان‌های زیرزمینی است که جهت تأمین آب مورد نیاز جهت پمپاژ آب از الکتروموتور پمپ‌های الکتریکی استفاده می‌کنند. میزان برق مصرفی مورد استفاده بر اساس کارکرد کنتور حجمی چاه‌های زراعی برحسب (کیلووات‌ساعت) در طول فصل رشد محصول ثبت و سپس با استفاده از ضریب تبدیل میزان انرژی الکتریسیته مصرفی (برق مصرفی) بر حسب مگاژول در هکتار محاسبه گردید و به عنوان یک نهاده ورودی مستقل در نظر گرفته شد. وزن بذر مصرفی، محصول گندم آبی در واحد هکتار نیز ثبت و سپس با ضرب در واحد تبدیل آن به‌صورت مگاژول در هکتار محاسبه گردید.

عملکرد دانه گندم و همچنین میزان کاه و کلش در واحد هکتار ثبت شد و سپس به‌عنوان نهاده‌های خروجی مورد بررسی قرار گرفتند.

سنجش‌های ارزیابی انرژی

با استفاده از معادل انرژی‌های ورودی و خروجی، کلیه اطلاعات ثبت شده در طول فصل زراعی در صفحه گسترده اکسل (Excel) وارد گردید و محاسبات با استفاده از این نرم‌افزار محاسبه شد. برای محاسبه شاخص‌های انرژی (کارایی مصرف انرژی، بهره‌وری انرژی، انرژی ویژه و انرژی خالص) از روابط ۱ تا ۴ استفاده گردید (Kitani et al., 1999). همچنین سهم انرژی‌های مستقیم شامل (نیروی انسانی، الکتریسیته مصرفی، سوخت فسیلی و آب آبیاری (آب مصرفی)، غیرمستقیم شامل (بذر، مواد شیمیایی و ماشین‌ها)، انرژی‌های تجدیدپذیر شامل (نیروی انسانی و بذر) و تجدیدنپذیر شامل (سوخت فسیلی، کودها و مواد شیمیایی، ماشین‌ها و آب مصرفی) محاسبه شدند.

جدول ۱- هم‌ارزی انرژی برای نهاده‌های ورودی و خروجی

Table 1- Energy equivalence for input and output entities

انرژی نهاده یا ستانده	واحد	معادل انرژی	مرجع
Entities energy	Unit	Megajoule per unit	References
الف) انرژی نهاده ورودی			
A) Input entities energy			
نیروی انسانی	hr	1.96	Singh <i>et al.</i> , 2002; Yilmaz <i>et al.</i> , 2005
Human labor			
تراکتور	kg	138	Kitani, 1999
Tractor			
ماشین‌ها	kg	62.70	Kitani, 1999
Machinery			
کمیابین	kg	116	Kitani, 1999
Combine			
سوخت گازوئیل	lit	56.31	Singh <i>et al.</i> , 2002
Diesel fuel			
کود نیتروژنه	kg	66.14	Esengun <i>et al.</i> , 2007; Yilmaz <i>et al.</i> , 2005
Nitrogen fertilizer			
کود فسفات	kg	12.44	Esengun <i>et al.</i> , 2007; Yilmaz <i>et al.</i> , 2005
Phosphate fertilizer			
کود پتاسه	kg	11.15	Esengun <i>et al.</i> , 2007; Yilmaz <i>et al.</i> , 2005
Potash fertilizer			
کود حیوانی	kg	0.30	Asgharipour <i>et al.</i> , 2012
Animal manure			
قارچ کش	kg	92	Asgharipour <i>et al.</i> , 2012
Fungicide			
علف کش	kg	238	Asgharipour <i>et al.</i> , 2012
Herbicide			
حشره کش	kg	199	Asgharipour <i>et al.</i> , 2012
Insecticide			
آب آبیاری	m ³	1.02	Asgharipour <i>et al.</i> , 2012
Irrigation water			
الکتریسیته مصرفی	Kwh	11.93	Burhan <i>et al.</i> , 2004
Electricity consumption			
بذر گندم آبی	kg	14.70	BeheshtiTabar <i>et al.</i> , 2010
Irrigated wheat seeds			
ب) انرژی نهاده خروجی			
B) Output entities energy			
گندم آبی	kg	14.70	Burhan <i>et al.</i> , 2004
Irrigated wheat			
کاه و کلش	kg	12.50	Burhan <i>et al.</i> , 2004; Singh & Mittal, 1992
Wheat straw and stubble			

$$\text{انرژی ویژه} = \frac{\text{انرژی ورودی } (Mj ha^{-1})}{\text{عملکرد محصول } (Kg ha^{-1})} \quad (۳)$$

$$\text{انرژی خالص} = \text{انرژی ورودی } (Mj ha^{-1}) - \text{انرژی خروجی } (Mj ha^{-1}) \quad (۴)$$

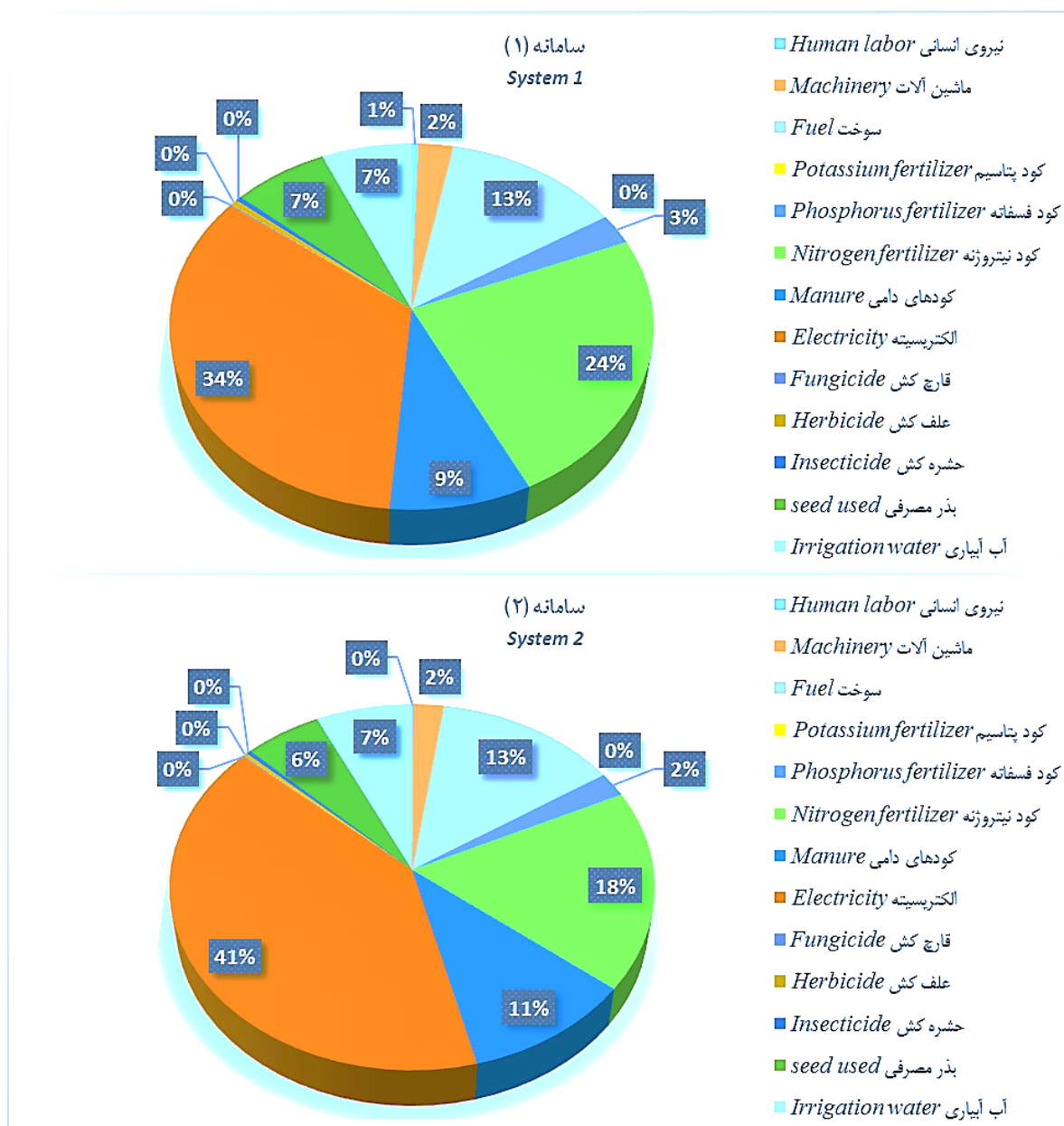
$$\text{نسبت انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی } (Mj ha^{-1})}{\text{انرژی ورودی } (Mj ha^{-1})} \quad (۱)$$

$$\text{بهره‌وری انرژی مصرفی} = \frac{\text{عملکرد محصول } (Kg ha^{-1})}{\text{انرژی ورودی } (Mj ha^{-1})} \quad (۲)$$

جدول ۲- میزان مصرف انرژی نهاده‌های مصرفی برای تولید محصول گندم آب (مگاژول در هکتار)

Table 2- Energy Consumption of Inputs for Irrigated Wheat Production (MJ ha⁻¹)

انرژی نهاده‌ها Energy inputs	گندم آبی Irrigated wheat	
	سامانه ۱	سامانه ۲
	System 1	System 2
ورودی‌ها Inputs		
نیروی انسانی Human labor	358.68	78.59
ماشین‌ها Machinery	1737.40	1895
سوخت Fuel	9009.60	11543.55
کود نیتروژنه Nitrogen fertilizer	16535	13228
کود فسفره Phosphorus fertilizer	1866	1866
کود پتاسه Potassium fertilizer	0	0
کود گوگردی Sulfur fertilizer	0	0
کودهای میکرو Micronutrient fertilizers	0	0
کود دامی Manure	6000	9000
علف‌کش Herbicide	357	238
قارچ‌کش Fungicide	92	92
حشره‌کش Insecticide	298.50	298.50
بذر مصرفی Seed used	4851	4851
الکتریسیته Electricity	23518.90	34812.53
آب آبیاری Irrigation water	4564.95	6056.60
کل انرژی ورودی Total input energy	69189.04	85943.97
خروجی‌ها Outputs		
دانه گندم آبی Irrigated wheat grain	88200	117600
کاه و کلش Straw and stubble	22500	32500
کل انرژی خروجی Total output energy	110700	150100



شکل ۱- سهم هریک از نهاده‌ها در تولید محصول گندم آبی سامانه (۱) و سامانه (۲)
Figure 1- Contribution of each input to irrigated wheat production in system (1) and system (2)

نتایج

ارزیابی انرژی‌های مصرفی ورودی و خروجی هر دو سامانه مذکور

مقدار انرژی نهاده‌های مصرفی برای تولید محصول گندم آبی در دو سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت-آبیاش متحرک (سامانه ۱) و ویلموو (سامانه ۲) در جدول ۲ ارائه گردیده است. همچنین شکل ۱ سهم هر یک از نهاده‌های ورودی جهت تولید محصول گندم در دو سامانه آبیاری را به تفکیک نشان می‌دهد. با توجه به نقش متفاوت

تجهیزات آبیاری (پمپ، لوله، کمربند، شیرخودکار و غیره) به‌عنوان عوامل تولید ثابت و همچنین زمین به‌عنوان عامل تولید طبیعی، در این مطالعه از تحلیل این دو نهاده غیر مصرفی به دلیل استفاده مجدد کشاورزان در سال‌های آتی از تحلیل این دو نهاده صرف نظر می‌گردد. مجموع انرژی‌های ورودی در یک هکتار گندم آبی در سامانه (۱)، ۶۹۱۸۹/۰۴ مگاژول در هکتار بود. در سامانه (۱) بیش‌ترین انرژی مصرفی را الکتریسیته ۳۳/۹۹ درصد از کل انرژی مصرفی، (۲۳۵۱۸/۹۰ مگاژول در هکتار) را به خود اختصاص داد. کل مواد شیمیایی مصرفی ۳۶/۳۴ درصد، (۲۵۱۴۸/۵۰ مگاژول در هکتار) از

مزرعه‌ای با سامانه آبیاری بارانی در شهرستان شهرکرد ۶۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اعلام کرد (Ebrahimipak et al., 2022). حجم آب مصرفی برای محصول گندم در شهرستان‌های اهواز، رزن و دامغان را به‌ترتیب ۴۸۳۷، ۵۲۳۵، ۷۳۹۵ و ۸۹۷۴ متر مکعب در هکتار گزارش کردند (Taghinazhad & Vahedi, 2022). مجموع انرژی خروجی گندم آبی در استان اردبیل ۶۵۰۱۶/۰۷ مگاژول در هکتار به‌دست آوردند.

بررسی میزان مصرف نهاده‌های مختلف نشان داد در هر دو سامانه مصرف نهاده الکتریسیته بیش‌ترین میزان انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده است. (Ghasemi Mobtaker, 2020) میزان انرژی برق مصرفی در سامانه آبیاری ویلموو برای تولید محصول گندم ۱۴۲۰۵/۰۵ مگاژول در هکتار محاسبه کرد. در سال‌های اخیر با توجه به جایگزین کردن الکتریسیته به جای سوخت فسیلی، در برخی از مطالعات انرژی مصرفی به‌عنوان مهم‌ترین نهاده ورودی معرفی شده است. همچنین با مقایسه برق مصرفی بین دو سامانه نشان می‌دهد که سامانه (۲)، حدود ۳۲/۱۵ درصد در طی فصل رشد محصول گندم انرژی الکتریسیته بیش‌تری را مصرف کرده است. میزان برق مصرفی به عوامل هیدرولیکی همچون عمق سطح ایستابی آبخوان‌ها، فاصله چاه از مزرعه، وضعیت توپوگرافی مزارع و راندمان الکتروموتور پمپ‌ها در نقطه کار آن بستگی دارد. همچنین میزان دبی چاه متناسب با اراضی تحت پوشش و در نتیجه مدت زمان کارکرد آبپاش‌ها در هنگام آبیاری در طول فصل زراعی یکی دیگر از عوامل مؤثر بر میزان برق مصرفی محصولات است. متوسط فشار کارکرد آبپاش در سامانه آبیاری کلاسیک ثابت-آبپاش متحرک (سامانه ۱)، ۴۰ متر و در سامانه آبیاری ویلموو (سامانه ۲)، ۳۵ متر است. بر همین اساس، فواصل بال‌ها در محدوده بازه‌های ۲۱ تا ۲۲ متر و فواصل جابه‌جایی لوله‌های چرخ‌دار، ۱۵ متر است؛ بنابراین اگرچه سامانه آبیاری لوله چرخ‌دار از فشار کارکرد آبپاش کم‌تری برخوردار بوده و در نتیجه مصرف انرژی کم‌تری نیاز دارد اما مدت زمان آبیاری یا به عبارتی مدت زمان کارکرد الکتروموتور پمپ در سامانه لوله‌لوله چرخ‌دار (سامانه ۲) بیش‌تر از سامانه کلاسیک ثابت-آبپاش متحرک (سامانه ۱) است در نتیجه منجر به برق مصرفی بیش‌تر گردیده است. در نهایت بنا به دلایل ذکر شده میزان برق مصرفی در سامانه (۲) بیش‌تر از سامانه (۱) خواهد بود. به‌منظور کاهش مصرف انرژی الکتریسیته در این بخش پیشنهاد می‌شود که از پنل‌های خورشیدی جهت تأمین انرژی الکتریسیته استفاده گردد هرچند که برای استفاده از پنل‌های خورشیدی جهت توجیه اقتصادی بودن طرح باید مطالعات گسترده در آن زمینه نیز صورت گیرد.

دو نهاده ورودی نیروی انسانی و آفت‌کش (قارچ‌کش، حشره‌کش و علف‌کش) کم‌ترین میزان انرژی مصرفی را برای تولید محصول گندم آبی در دو سامانه را به خود اختصاص داده بودند. برخی از

کل انرژی‌های ورودی بود، در میان کودهای شیمیایی مصرفی کود نیتروژن بیش‌ترین مصرف انرژی را شامل بود (۲۳/۹۰ درصد از کل انرژی مصرفی) و در میان تمام نهاده‌های ورودی بعد از انرژی الکتریسیته در رتبه دوم قرار گرفت (۱۶۵۳۵ مگاژول در هکتار). ماشین‌های و سوخت گازوئیل در مجموع ۱۵/۵۳ درصد از کل انرژی ورودی (۱۰۷۴۷ مگاژول در هکتار) را به خود اختصاص دادند (۱۰۷۴۷ مگاژول در هکتار) که ۲/۵۱ درصد (۹۰۰۶۹ مگاژول در هکتار) مختص به ماشین‌های و ادوات کشاورزی و ۱۳/۰۵ درصد (۱۷۳۷/۴۰ مگاژول در هکتار)، مختص به سوخت گازوئیل بود. بذر با ۷/۰۱ درصد، آب مصرفی با ۶/۶۰ درصد و نیروی انسانی با ۰/۵۱ درصد به‌ترتیب (۴۸۵۱ مگاژول در هکتار)، (۴۵۶۴/۹۵ مگاژول در هکتار) و (۳۵۸/۶۸ مگاژول در هکتار) در مکان‌های بعدی قرار گرفتند. میانگین عملکرد و کل انرژی خروجی گندم آبی در سامانه (۱) به‌ترتیب ۸۸۲۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۱۰۷۰۰۹ مگاژول در هکتار به‌دست آمد.

کل انرژی ورودی در هر هکتار گندم آبی در سامانه (۲) معادل ۸۵۹۴۳/۹۷ مگاژول در هکتار محاسبه گردید که این میزان تقریباً ۲۴ درصد بیش‌تر از سامانه (۱) بود. در اکثر مزارع میزان انرژی نهاده‌های مصرفی به جزء (انرژی الکتریسیته، نیروی کارگری و آب مصرفی) اکثر نهاده‌های دیگر حدوداً باهم برابر بودند بنابراین اصلی‌ترین عامل تفاوت در میزان انرژی مزارع دو سامانه در میزان حجم آب مصرفی و الکتریسیته مصرفی بود. همانند سامانه (۱) از کل انرژی مصرفی انرژی الکتریسیته مصرفی با ۴۰/۵۱ درصد، بیش‌ترین مصرف را به خود اختصاص داد (۳۴۸۱۲/۵۳ مگاژول در هکتار). کل مواد شیمیایی مصرف شده (۲۶۷۰۶/۷۰ مگاژول در هکتار)، معادل ۳۱/۰۷ درصد از کل انرژی ورودی بود خود اختصاص داده بودند و مشابه سامانه (۱) در بین کودهای شیمیایی مصرفی کود نیتروژن بیش‌ترین سهم از نهاده مصرفی را در میان مواد شیمیایی مصرفی را داشت (۱۷/۷۰ درصد) که دلیل آن مصرف بیش‌تر این کود نسبت به سایر کودهای شیمیایی در واحد سطح و همچنین هم ارزی انرژی بالای آن در قیاس با سایر کودهای شیمیایی دیگر است. از این‌رو همانند سامانه (۱)، کودهای شیمیایی بعد از الکتریسیته مصرفی بالاترین مصرف انرژی ورودی را دارا بودند. مجموع انرژی مصرفی توسط دو نهاده ماشین و سوخت (۱۳۴۳۸/۵۵ مگاژول در هکتار)، معادل ۱۵/۶۵ درصد از کل انرژی‌های ورودی را به خود اختصاص دادند که بعد از کودهای شیمیایی مصرفی در رده سوم قرار گرفتند. سهم آب آبیاری (۶۰۵۶/۶۰ مگاژول در هکتار)، بذر (۴۸۵۱ مگاژول در هکتار) و نیروی انسانی (۷۸/۵۸ مگاژول در هکتار) به‌ترتیب ۷/۰۷، ۵/۶۴ و ۰/۰۹ درصد از کل انرژی ورودی در رتبه‌های دیگر قرار داشتند. میانگین عملکرد و کل انرژی خروجی در سامانه (۲) برای گندم آبی به‌ترتیب ۱۱۷۶۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۵۰۱۰۰ مگاژول در هکتار محاسبه شد (Haghighati, 2013). در گزارشی از یک طرح تحقیقاتی میزان عملکرد گندم در

بودند زیرا اکثر مزارع سامانه (۱) خرده ملکی بودند و آب در زمان مناسب و به اندازه نیاز آبی در اختیار آن‌ها قرار نمی‌گرفت. همچنین بر اساس مطالعات صورت گرفته، میزان شاخص‌های ارزیابی عملکرد از جمله یکنواختی پخش در سامانه (۲) بیش‌تر از سامانه (۱) است (Abbasi & Abbasi, 2017) که با عملکرد و انرژی خروجی مزارع مطابقت می‌کند. همچنین طبق جدول ۳، این مسئله نشان می‌دهد که در این منطقه کارایی مصرف انرژی سامانه (۱) ($1/60$)، پائین‌تر از کارایی مصرف انرژی سامانه (۲) ($1/75$) است. دلیل اصلی این تفاوت کارایی عملکرد محصول گندم آبی در سامانه (۲) بالاتر بود. مطابق جدول ۳ میزان بهره‌وری انرژی سامانه (۱) و سامانه (۲)، به ترتیب $0/087$ و $0/093$ کیلوگرم در مگاژول گزارش گردید. این بدان معنی بود که به ازای هر واحد مصرف انرژی در سامانه (۱)، $0/088$ واحد عملکرد و در سامانه (۲)، $0/09$ واحد عملکرد به دست می‌آید.

مقدار انرژی ویژه و خالص به ترتیب برای سامانه (۱) و سامانه (۲) در تولید محصول گندم آبی $11/53$ مگاژول در کیلوگرم و $41510/96$ مگاژول در هکتار و $10/74$ مگاژول در کیلوگرم و $64156/03$ مگاژول در هکتار به دست آمد. انرژی ویژه برعکس بهره‌وری انرژی است لذا مقدار کم‌تر آن نشان می‌دهد که انرژی کم‌تری به ازای تولید هر واحد عملکرد مصرف شده است؛ بنابراین سامانه (۲) از نظر سیر انرژی بدون توجه به بعد اقتصادی و فرهنگی منطقه برتر از سامانه (۱) در تولید محصول گندم آبی است (جدول ۳).

در جدول ۴ مقدار هر یک از انواع انرژی‌ها شامل انرژی مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در تولید محصول آبی گندم در دو سامانه ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است در سامانه (۲) سهم انرژی مستقیم به مراتب بیش‌تر از سامانه (۱) است. دلیل این موضوع مصرف بالای نهاده‌های سوخت گازوئیل و الکتریسیته است. در تقسیم‌بندی دیگر سهم انرژی تجدیدپذیر در هر دو سامانه پائین است که این موضوع از دیدگاه اکولوژیک اهمیت قابل توجهی دارد به این خاطر منبع انرژی‌های تجدیدنپذیر که اکثراً سوخت‌های فسیلی هستند در آینده نزدیک رو به اتمام است و تکیه بر این منابع همراه با مخاطرات زیادی در آینده همراه است.

بحث

موضوع اصلی این مطالعه، ارزیابی روند انرژی مصرفی در سامانه‌های آبیاری بارانی در مزارع گندم آبی دشت‌های دهگلان استان کردستان بود.

محققین (Kizilaslan, 2009; Mohammadi et al., 2014; Nabavi-Pelesaraei et al., 2016) گزارش کردند که نهاده نیروی انسانی کم‌ترین انرژی مصرفی را در بین انرژی‌های ورودی را به خود اختصاص داده است. همچنین به دلیل استفاده از نیروی انسانی کم‌تر جهت انجام فعالیت‌های کشاورزی نظیر (کودپاشی و سم‌پاشی و غیره) به جهت خرده مالکی بودن اکثر مزارع و فرآیند آبیاری در سامانه (۲)، این سامانه به نسبت سامانه (۱) نیروی کارگری کم‌تری نیاز داشت. مطالعات پیشین نشان داد که میزان انرژی مصرفی برای تولید گندم آبی در شرایط مختلف متفاوت است به طوری که در شرایط منطقه‌ای مشهد در حدود $45367/63$ مگاژول در هکتار (Ghorbani et al., 2011) در سیستان و بلوچستان بدون احتساب برق مصرفی $32492/97$ مگاژول در هکتار (Ziaei et al., 2013)، در استان اردبیل تقریباً $38755/34$ مگاژول در هکتار (Taghinazhad & Vahedi, 2022)، در ایالات ماماریای ترکیه $20635/50$ مگاژول در هکتار (Tipi, Cetin, & Vardar, 2009) و در استان همدان بدون احتساب آب مصرفی $47591/52$ مگاژول در هکتار گزارش شد (Ghasemi Mobtaker, 2020). عامل اصلی این اختلاف تفاوت‌ها با مطالعه مذکور تفاوت در اعمال مدیریتی توسط بهره‌برداران و کشاورزان و میزان مصرف نهاده‌ها بود. هر چند تفاوت در میزان انرژی ورودی از اهمیت بسیار کم‌تری به نسبت تفاوت در میزان بهره‌وری و کارایی انرژی دارد. اما مشخص کردن نهاده‌های مصرفی انرژی و سهم آن‌ها در تولید محصول بسیار حائز اهمیت است. به طور مثال برخلاف نتایج این مطالعه که الکتریسیته بیش‌ترین نهاده مصرفی گزارش شد. اما در شرایط منطقه‌ای مشهد: مصرف مواد شیمیایی (Ghorbani et al., 2011)، همدان: سوخت فسیلی (Ghasemi Mobtaker, 2020)، گرگان: سوخت فسیلی (Rajaby et al., 2012) و سیستان و بلوچستان: مصرف کودهای شیمیایی (Ziaei et al., 2013) بیش‌ترین مصرف انرژی را دارا بودند هر چند در مطالعاتی دیگر همچون (Taghinazhad & Vahedi, 2022) بیش‌ترین مصرف انرژی نهادهی ورودی برای تولید گندم آبی در استان اصفهان با دارا بودن $55/62$ درصد و استان خراسان رضوی با $50/37$ درصد سهم از کل انرژی ورودی بیش‌ترین مصرف را به الکتریسیته اختصاص دادند.

مقایسه کارایی و بهره‌وری انرژی در دو سامانه آبیاری (۱) و (۲) در مزارع گندم آبی

داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد میزان انرژی مصرفی در هر هکتار گندم آبی در سامانه (۱)، کم‌تر از سامانه (۲) است، در حالی که میزان انرژی خروج سامانه (۲)، $26/25$ درصد بیش‌تر است. بنا به این دلیل که اکثر مزارع مجهز به سامانه (۱) در شرایط کم آبیاری قرار داشتند و میزان تنش آبی در آن مزارع بیش‌تر از مزارع سامانه (۲)

جدول ۳- روابط بین انرژی‌های ورودی و خروجی در تولید گندم آبی

Table 3- Relationships between Input and Output Energies in Irrigated Wheat Production

نوع انرژی	واحد	سامانه ۱	سامانه ۲
Energy type	unit	System (1)	System (2)
نسبت انرژی	-	1.60	1.75
Energy efficiency			
انرژی ویژه	MJ kg ⁻¹	11.53	10.74
Specific energy			
بهره‌وری انرژی	Kg MJ ⁻¹	0.087	0.093
Energy productivity			
انرژی خالص	MJ ha ⁻¹	41510.96	64156.03
Net energy			

جدول ۴- مقادیر انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در تولید گندم آبی

Table 4- Relationships between Input and Output Energies in Irrigated Wheat Production

نوع انرژی	واحد	سامانه ۱	سامانه ۲
Energy type	Unit	System (1)	System (2)
انرژی مستقیم	MJ ha ⁻¹	13933.23	17678.73
Direct energy			
انرژی غیرمستقیم	MJ ha ⁻¹	55255.80	68265.24
Indirect energy			
انرژی تجدیدپذیر	MJ ha ⁻¹	5209.68	4929.58
Renewable energy			
انرژی تجدیدنپذیر	MJ ha ⁻¹	63979.36	81014.38
Non-renewable energy			

در این مطالعه شاخص‌های انرژی محصول گندم در مزارع خرده مالکی کشاورزان دشت دهگلان استان کردستان مورد ارزیابی قرار گرفت. مزارع مورد مطالعه در دو گروه، سامانه (۱) (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت-آپاش متحرک) و سامانه آبیاری (۲) (سامانه آبیاری بارانی ویلموو) که منبع انرژی ورودی هر دو سامانه برق بود دسته‌بندی گردید. در پایان فصل زراعی، میزان کل نهاده‌های ورودی و خروجی به‌صورت تکمیل پرسشنامه حضوری و همچنین جهت اعتبار سنجی میزان نهاده مصرفی الکتریسیته، مقدار آن از شرکت برق شهرستان دهگلان، دریافت گردید.

نتیجه‌گیری

کل انرژی نهاده‌های ورودی جهت تولید محصول گندم آبی در سامانه (۱) و سامانه (۲) به‌ترتیب ۶۹۱۸۹/۰۴ و ۸۵۹۴۳/۹۷ مگاژول در هکتار بود. در نتیجه انرژی مصرفی در سامانه آبیاری بارانی ویلموو به‌خاطر مصرف بالای الکتریسیته و آب آبیاری به نسبت سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت-آپاش متحرک بیش‌تر بود. نهاده الکتریسیته مصرفی در هر دو سامانه بیش‌ترین میزان انرژی مصرفی

را به خود اختصاص داده بود. همچنین بهره‌وری و کارایی مصرف انرژی دو سامانه مذکور تقریباً باهم مساوی بود. میزان انرژی خالص سامانه آبیاری (۱) و سامانه آبیاری (۲) به‌ترتیب ۴۱۵۰/۹۶ و ۶۴۱۵۶/۰۳ مگاژول در هکتار بود. نکته قابل‌توجه در این مطالعه مربوط به نهاده‌های مشخص و عملیات‌های رایج مورد ارزیابی قرار گرفت. فرآیند و فعالیت‌هایی مانند نقل و انتقال در طول فصل رشد و عوامل همچون محیطی و غیره وجود دارند که به‌دلیل عدم وجود داده‌های صحیح و قابل‌اطمینان از سوی کشاورزان، مورد ارزیابی قرار نگرفت. در نتیجه مقادیر کارایی مصرف انرژی و بهره‌وری انرژی در این مطالعه تا حدودی فراتر از مقادیر مطالعات دیگر به‌دست آمد. وابستگی شدید در تولید به انرژی‌های تجدیدنپذیر، به‌خصوص در سامانه آبیاری (۲) بیانگر ناپایداری آن در مزارع مورد مطالعه هست. از این‌رو پیشنهاد می‌شود مطالعاتی هم‌سو در جهت استفاده از سامانه‌های فتوولتایی^۱ جهت استحصال و پمپاژ آب در سامانه‌های آبیاری انجام گیرد.

1- Photovoltaic system

سیاسگزاری

نویسندگان این مقاله از راهنمایی‌های دلسوزانه جناب آقای امجد گل محمدی قانع و جناب آقای زبیر مفاخری و سایر کشاورزان دلسوز

و زحمت کش به پاس همکاری جهت تکمیل پرسشنامه‌های مربوطه و همچنین از شرکت برق شهرستان دهگلان استان کردستان برای همکاری در تهیه اطلاعات برق مصرفی سامانه‌های مورد مطالعه در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

References

1. Abbasi, F., & Abbasi, N. (2017). Water productivity in agriculture; Challenges and prospects. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), 141–144. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.67121>
2. Aliabadi, H., Alizadeh, A., & Erfani, A. (2015). Energy and water productivity under different irrigation systems, (Case study of corn in Jovain agro-industry). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(4), 571–582.
3. Almasi, M., Kiani, S., & Lvymy, N. (2008). Basics of agricultural mechanization. Iran: Forest Publication, 248.
4. Asgharipour, M.R., Mondani, F., & Riahinia, S. (2012). Energy use efficiency and economic analysis of sugar beet production system in Iran: A case study in Khorasan Razavi province. *Energy*, 44(1), 1078–1084. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.023>
5. Bayat, F., Roozbahani, A., & Shahdany, S.M.H. (2022). AHP-Entropy-WASPAS technique for performance evaluation of agricultural surface water distribution systems based on water-food-energy nexus. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1652590/v1>
6. Bayazidi, M., & Kaki, M. (2021). Storage volume and exploitation changes of aquifers in the eastern plains of the Kurdistan province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 8(1), 57–72. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2021.307139.1360>
7. Beheshti Tabar, I., Keyhani, A., & Rafiee, S. (2010). Energy balance in Iran's agronomy (1990–2006). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 849–855. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.024>
8. Burhan, Ö. (2004). Managing product variety through delayed product differentiation using vanilla boxes (Master Thesis, Middle East Technical University). Middle East Technical University.
9. 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. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346273.669328>
10. Elsoragaby, S., Yahya, A., Mahadi, M.R., Nawi, N.M., & Mairghany, M. (2019). Analysis of energy use and greenhouse gas emissions (GHG) of transplanting and broadcast seeding wetland rice cultivation. *Energy*, 189, 116160. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116160>
11. Esengun, K., Gündüz, O., & Erdal, G. (2007). Input–output energy analysis in dry apricot production of Turkey. *Energy Conversion and Management*, 48(2), 592–598. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.06.006>
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Retrieved May 28, 2022, from <https://www.fao.org/statistics/en/>
13. Ghasemi Mobtaker, H., Akram, A., & Keyhani, A. (2012). Energy use and sensitivity analysis of energy inputs for alfalfa production in Iran. *Energy for Sustainable Development*, 16(1), 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.10.009>
14. Ghasemi Mobtaker, H. (2020). Investigation of energy consumption trend in two flood and sprinkler irrigation systems: Case study of one hundred hectare farm in Hamadan. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(4), 801–809. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.281690.665189>
15. Ghasemi Mobtaker, H., Sharifi, M., & Kaab, A. (2023). A study of changes in energy consumption trend and environmental indicators in the production of agricultural crops using a life cycle assessment approach in the years 2018–2022. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 54(3), 1–18. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.364738.665522>
16. Ghadami Firouzabadi, A., & Akbari, M. (2024). The effect of Irrigation system type on the amount of irrigation water, yield and water productivity of wheat in farmers conditions (case study: Hamadan province). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(5), 831–842.
17. Ghahroudi Tali, M., Khodamoradi, F., & Ali Nouri, K. (2023). Effects of groundwater decrease on the of land subsidence in Dehgolan plain, Kurdistan province. *Environmental Management Hazards*, 10(1), 57–70. (In Persian). <http://doi.org/10.22059/JHSCI.2023.359130.777>
18. Ghorbani, R., Mondani, F., Amirmoradi, S., Feizi, H., Khorramdel, S., Teimouri, M., & Aghel, H. (2011). A case study of energy use and economic analysis of irrigated and dryland wheat production systems. *Applied Energy*, 88(1), 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.028>
19. Giri, N.C., Mohanty, R.C., Pradhan, R.C., Abdullah, S., Ghosh, U., & Mukherjee, A. (2023). Agrivoltaic system for energy-food production: A symbiotic approach on strategy, modelling, and optimization. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 40, 100915. (In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100915>

20. Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Nouri, H. (2015). Water and energy resources are limited; however, water and energy consumption for production of agricultural crops is increasing to meet the food demand. *Food Engineering Research*, 16(3), 31–44. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/jaer.2015.102988>
21. Gökdoğan, O., & Sevim, B. (2016). Determination of energy balance of wheat production in Turkey: A case study of Eskil district. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13(4), 0–0.
22. Haghighati, B. (2013). Extension plan report - improving water management and optimization in agricultural production process. Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research Center. (In Persian)
23. Hamedani, S.R., Shabani, Z., & Rafiee, S. (2011). Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. *Energy*, 36(5), 2367–2371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.013>
24. Kheiralipour, K. (2022). *Sustainable production*. Nova.
25. Kiær, L.P., Skovgaard, I.M., & Østergård, H. (2009). Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials. *Field Crops Research*, 114(3), 361–373. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.006>
26. Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R.M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. *Energy and Biomass Engineering*, 5, 330.
27. Kizilaslan, H. (2009). Input–output energy analysis of cherries production in Tokat Province of Turkey. *Applied Energy*, 86(7), 1354–1358. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.009>
28. Mirbagheri, V., Nasiri Brothers, M., Emami, J., & Hosseini Thabit, S.M. (2016). Production and trade of basic agricultural products in the period of 2002–2017. (No. 250; p. 99). Iran: Vice President of Infrastructure Research and Production Affairs, Office of Infrastructure Issues (Agricultural Department), Islamic Council Research Center.
29. Ministry of Agriculture Jihad. (2020). Agricultural Yearbook 2019–2020. Tehran: Ministry of Agriculture Jihad. (In Persian)
30. Mobtaker, H.G., Akram, A., & Keyhani, A. (2012). Energy use and sensitivity analysis of energy inputs for alfalfa production in Iran. *Energy for Sustainable Development*, 16(1), 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.10.009>
31. Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, A., Mousavi-Avval, S.H., & Nonhebel, S. (2014). Energy use efficiency and greenhouse gas emissions of farming systems in north Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 724–733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.012>
32. Nazari, B., L, A., P, M., B, S., & A, H. (2016). Study of the theoretical basis and the factors affecting energy consumption in pressurized irrigation systems in Qazvin province. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30(2), 261–271. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/jwra.2016.106648>
33. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. (2017). Energy consumption enhancement and environmental life cycle assessment in paddy production using optimization techniques. *Journal of Cleaner Production*, 162, 571–586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.071>
34. Nasser, A. (2024). Effects of irrigated and dryland conditions on energy indices in wheat production: A meta-analysis based on the principal components analysis. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04495-8>
35. Niazmand, R., Moghadamnia, A., Tahmasebi, P., Nikmehr, S., & Maroufpoor, E. (2023). Productivity of water and energy use of potato in sprinkler irrigation systems (Case study: Dehgolan Plain, Kurdistan Province). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 116–137. (In Persian). <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10298.1106>
36. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29(1), 39–51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6)
37. Ortiz-Cañavate, J., & Hernanz, J.L. (1999). CIGR Handbook of Agricultural Engineering (Vol. 5). United States of America: American Society of Agricultural and Biological Engineers. Retrieved from <https://doi.org/10.13031/2013.36411>
38. Pimentel, D., Pimentel, M., & Food, E. (1996). *Society* (Niwet, CO. Colorado Press).
39. Sánchez-Sutil, F., & Cano-Ortega, A. (2021). Smart control and energy efficiency in irrigation systems using LoRaWAN. *Sensors*, 21(21), 7041. <https://doi.org/10.3390/s21217041>
40. Rajaby, M.H., Soltani, A., Zeinali, E., & Soltani, E. (2012). Evaluation of energy use in wheat production in Gorgan. *Plant Production*, 19(3), 143–171. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222050.1391.19.3.9.9>
41. Senbeta, A.F., & Worku, W. (2023). Ethiopia's wheat production pathways to self-sufficiency through land area expansion, irrigation advance, and yield gap closure. *Heliyon*, 9(10), e20720. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20720>
42. Singh, S., & Mittal, J.P. (1992). *Energy in Production Agriculture*. Mittal Publications.
43. Singh, H., Singh, A.K., Kushwaha, H.L., & Singh, A. (2007). Energy consumption pattern of wheat production in India. *Energy*, 32(10), 1848–1854. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.03.001>
44. Taghinazhad, J., & Vahedi, A. (2022). Energy consumption modeling and sensitivity analysis of energy inputs for irrigated wheat production; Case study: Ardabil province. *Agricultural Mechanization*, 6(4), 11–19. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jam.2022.14202>
45. Tipi, T., Cetin, B., & Vardar, A. (2009). An analysis of energy use and input costs for wheat production in Turkey. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(2), 352–356.

46. Vahedi, A., & Zarifneshat, S. (2021). Evaluation energy flow and analysis of energy economy for irrigated wheat production in different geographical regions of Iran. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 505–523. <https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.81747>
47. Yadi, E., Barari Tari, D., & Mahmoudi, M. (2022). Investigating the amount of energy consumption and the relationship between input and output energy in wheat production. *Journal of Plant production Sciences*, 1(2), 59. <https://doi.org/10.2./jpps.2022.691243>
48. Yilmaz, I., Akcaoz, H., & Ozkan, B. (2005). An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey. *Renewable Energy*, 30(2), 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.06.001>
49. Zangeneh, M., Omid, M., & Akram, A. (2010). A comparative study on energy use and cost analysis of potato production under different farming technologies in Hamadan province of Iran. *Energy*, 35(7), 2927–2933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.024>
50. Ziaei, S.M., Hosseinpanahi, F., Valizadeh, J., & Barabadi, S.A. (2013). Comparison of production effectiveness of wheat and barley in terms of energy use and productivity in Sistan and Blochestan province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 11(2), 327–336. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v11i2.26148>
51. Zulfiqar, U., Ahmad, M., Valipour, M., Ishfaq, M., Maqsood, M.F., Iqbal, R., & El Sabagh, A. (2023). Evaluating optimum limited irrigation and integrated nutrient management strategies for wheat growth, yield and quality. *Hydrology*, 10(3), 56. <https://doi.org/10.3390/hydrology10030056>

Effects of Different Levels of Selenium in the Nutrient Solution on the Growth and Nitrate Accumulation of Red French Lettuce in Soilless Culture

N. Lotfi¹, Sh. Kiani^{2*}, H.R. Motaghian²

1 and 2- Former M.Sc. Student and Associate Professor of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: shahram.kiani@sku.ac.ir)

Received: 28-05-2024

Revised: 26-11-2024

Accepted: 27-11-2024

Available Online: 27-11-2024

How to cite this article:

Lotfi, N., Kiani, Sh., & Motaghian, H.R. (2025). Effects of different levels of selenium in the nutrient solution on the growth and nitrate accumulation of red French lettuce in soilless culture. *Journal of Water and Soil*, 38(6), 699-712. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.88287.1411>

Introduction

Selenium (Se) is one of the beneficial elements for plants, which is usually not supplied in the nutrient solutions used in soilless cultures. It is an essential element for both humans and animals. Application of Se at low concentrations has a positive effect on the growth and quality indices of plants. Nitrate accumulation in leafy vegetables poses threaten to human health. Leafy vegetables such as lettuce (*Lactuca sativa* L.) contain high levels of nitrate. According to the results of some researches, application of Se in the nutrient solutions can decrease nitrate accumulation in vegetables. However, the optimum concentration of Se in the nutrient solution for lettuce production in hydroponic culture is still not clear. This experiment was conducted to elucidate the effect of different levels of Se in the nutrient solution on the growth indices, yield, and nitrate accumulation of red French lettuce (cv. *Lolla Rossa*) in soilless culture.

Materials and Methods

A perlite culture experiment, using completely randomized design, was carried out with seven levels of Se in the nutrient solution (0, 0.1, 0.5, 1, 5, 10 and 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$) with four replications in the research greenhouse of Shahrekord University. Lettuce seedlings were grown in 1.7 L plastic pots (one plant per pot) containing perlite with size of 0.5-5 mm and were manually fertigated with the nutrient solutions on a daily basis. Different concentrations of Se were applied as sodium selenate ($\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in the nutrient solution (Domingues *et al.*, $\text{pH} = 5.4 \pm 0.1$, $\text{EC} = 1.36\text{-}1.41 \text{ dS m}^{-1}$). After four weeks, lettuce plants were harvested and the fresh weights of shoots and roots were measured. Plant growth indices consisting of leaf number, leaf length, leaf width, plant height, plant diameter, leaf chlorophyll index, and leaf total soluble solids were determined. In one bush in each treatment, the leaves were separated as 1st to 10th outer leaves and other inner leaves. The leaves were dried in an oven at 70 °C and were ground. Nitrate concentrations in outer and inner leaves were measured calorimetrically using a spectrophotometer at a wavelength of 410 nm. Shoots Se concentration was determined with ICP-MS after wet digestion of samples with HNO_3 and H_2O_2 . Analysis of variance was done using SAS software and means comparison was conducted using the least significant difference test at 0.05 probability level.

Results and Discussion

The results indicated that application of Se in the nutrient solution had not significant effect on the lettuce growth indices including of leaf length, leaf width and leaf number. Application of 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of Se in the nutrient solution led to significant decrease of plant height in comparison with control, but plant diameter increased with application of Se in the nutrient solution. The highest plant diameter was observed in 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of Se treatment. The highest and the lowest shoot fresh weight were obtained under 0 and 1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of Se in the nutrient solution,



©2024 The author(s). 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.2024.88287.1411>

respectively. Application of $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ Se increased shoots fresh weight by 22% comparing to the control. Shoot Se concentration was increased with application of Se in the nutrient solution. The highest concentration of Se in shoots (15 mg kg^{-1} dry matter) was observed at the rate of $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ of Se in the nutrient solution. The amount of Se accumulated in the plant tissue is important in biofortification programs. The results showed that application of Se in the nutrient solution (with the exception of $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ of Se) led to significant decrease in the nitrate concentration of roots, outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce. The lowest nitrate concentration in all leaves of lettuce (2095 mg kg^{-1} fresh weight) was obtained in plants nourished with $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ of Se in the nutrient solution. Compared with control ($0 \mu\text{mol L}^{-1}$ of Se), nitrate concentration in all leaves for $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ of Se treatment was decreased 28%. Selenium has a positive function on decreasing nitrate accumulation in plants *via* regulating the transport of nitrate and enhancing activities of nitrogen metabolism enzymes.

Conclusion

According to our results, application of Se decreased nitrate concentration in lettuce plants. Therefore, application of Se in the nutrient solution at the rate of $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ is suggested for red French lettuce production in hydroponic culture under the conditions of the present study.

Keywords: Beneficial elements, Hydroponic, Leafy vegetables, Methemoglobinemia

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن - اسفند ۱۴۰۳، ص. ۷۱۲-۶۹۹

تأثیر سطوح مختلف سلنیم محلول غذایی بر رشد و تجمع نیترات کاهوی فرانسوی قرمز در کشت بدون خاک

نرگس لطفی^۱ - شهرام کیانی^{۲*} - حمیدرضا متقیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

چکیده

سلنیم جزو عناصر مفید برای گیاهان بوده که معمولاً در محلول‌های غذایی در کشت‌های هیدروپونیک مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. این پژوهش به منظور بررسی اثر سطوح مختلف سلنیم در محلول غذایی بر شاخص‌های رشدی و تجمع نیترات در کاهوی فرانسوی قرمز رقم لولا رزا (*Lactuca sativa* L. cv. *Lolla Rossa*) انجام شد. این آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با هفت غلظت سلنیم در محلول غذایی (صفر، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر از منبع سلنات سدیم) در چهار تکرار به‌صورت کشت بدون خاک در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد انجام شد. نتایج نشان داد کاربرد سطوح مختلف سلنیم تأثیر معناداری بر شاخص‌های رشدی کاهو از قبیل طول برگ، عرض برگ و تعداد برگ در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم نداشت. اگرچه کاربرد سلنیم با غلظت ۱۰ میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار ارتفاع گیاه در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد؛ اما قطر گیاه با کاربرد سلنیم افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین قطر بوته با کاربرد یک میکرومول بر لیتر سلنیم حاصل شد. کاربرد سلنیم با غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار شاخص سبزیگی کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. بر مبنای نتایج حاصله کاربرد یک میکرومول بر لیتر سلنیم منجر به بیشترین وزن تازه شاخساره کاهو شد که در مقایسه با محلول غذایی فاقد سلنیم ۲۲ درصد افزایش یافت. کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر به‌ترتیب منجر به تجمع ۷/۴ و ۱۵ میلی‌گرم سلنیم بر کیلوگرم ماده خشک در شاخساره کاهو شد که از لحاظ غنی‌سازی این محصول با سلنیم دارای اهمیت زیادی است. نتایج نشان داد کاربرد سلنیم منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات ریشه، برگ‌های بیرونی، برگ‌های درونی و کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کمترین غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو در گیاهان تغذیه شده با ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد که در مقایسه با عدم مصرف سلنیم به‌طور معناداری کاهش یافت. بر اساس غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو، کاربرد سلنیم با غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر در محلول غذایی برای تولید کاهوی فرانسوی قرمز در کشت هیدروپونیک در شرایط این پژوهش توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سبزی‌های برگی، عناصر مفید، متهموگلوبینیمیا، هیدروپونیک

مقدمه

پژوهش‌های انجام شده حاکی است کاربرد این عنصر در غلظت‌های کم اثرات مثبتی بر شاخص‌های رشدی و کیفی گیاه داشته است. خادمی آستانه و همکاران (*Khademi Astaneh et al., 2015*) گزارش کردند با افزایش غلظت سلنیم در محلول غذایی تا ۸ میلی‌گرم بر لیتر عملکرد و محتوای کلروفیل برگ‌ها در کلم تکمه‌ای

سلنیم یک عنصر غذایی مفید برای گیاهان عالی است (*Marschner, 1995*) که معمولاً در ترکیب شیمیایی محلول‌های غذایی در کشت‌های بدون خاک مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیاران گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
 (*- نویسنده مسئول: (Email: shahram.kiani@sku.ac.ir)

(*Brassica oleracea*) افزایش یافته، اما با افزایش بیشتر غلظت سلنیم، عملکرد کاهش و نشت الکترولیت^۱ از برگ‌های جوان افزایش یافت. بذل و همکاران (*Bazl et al., 2017*) گزارش کردند بالاترین وزن تازه و قطر سوخ در تیمار ۱۲۸ میلی گرم بر لیتر سولفات در ترکیب با غلظت ۲ میلی گرم بر لیتر سلنات مشاهده شد. آنها عنوان کردند در تمامی غلظت‌های سولفات هم‌زمان با افزایش سطح سلنات ارتفاع بلندترین برگ در پیاز کاهش یافت و با افزایش غلظت سلنات در تمامی سطوح سولفات، تجمع سلنیم در سوخ بیشتر شد. عامریان و همکاران (*Amerian et al., 2018*) بیان داشتند کاربرد هم‌زمان سلنیم همراه با نیتروژن نقش بسیار مهمی در بهبود برخی از خصوصیات رشدی و بیوشیمیایی دانه‌ال پیاز در کشت بدون خاک داشت که نشان‌دهنده تأثیر مثبت هر دو عنصر بر افزایش میزان سنتز کلروفیل و در نتیجه افزایش میزان فتوسنتز و تثبیت کربن در گیاه بود. هائیرلاک-نواک (*Hawrylak-Nowak, 2008a*) گزارش کرد کاربرد ۵ میکرومول بر لیتر سلنیم در محلول غذایی منجر به تحریک رشد و طولیل شدن ریشه در گیاهچه‌های ذرت شد در حالی که کاربرد غلظت‌های بیشتر سلنیم (۵۰ و ۱۰۰ میکرومول بر لیتر) منجر به کاهش شدید تجمع ماده خشک در گیاه شد. او عنوان کرد اختلالات رشدی و کاهش زیست توده گیاهی در حضور غلظت زیاد سلنیم ممکن است ناشی از اختلال در تعادل عناصر غذایی، تجمع مقادیر زیاد کلسیم و فسفر در بخش هوایی باشد. راموس و همکاران (*Ramos et al., 2010*) بیان کردند کاربرد ۸ میکرومول بر لیتر سلنیم از منبع سلنات سدیم و ۴ میکرومول بر لیتر از منبع سلنیت سدیم برای دستیابی به بیشترین وزن خشک بخش هوایی کاهو در سیستم کشت هیدروپونیک قابل توصیه است. هائیرلاک-نواک (*Hawrylak-Nowak, 2013*) بیان کرد استفاده از ۱۵ میکرومولار سلنیم به‌شکل سلنیت باعث کاهش زیست‌توده و تشدید فرآیندهای آنتی‌اکسیدانی در بافت‌های کاهو در کشت هیدروپونیک شد؛ به‌طور کلی نتایج نشان داد کاربرد سلنیت یا سلنات در غلظت‌های کمتر از ۱۵ میکرومولار می‌تواند برای تقویت و رشد بهتر گیاه کاهو استفاده شود. منیتونگ و همکاران (*Maneetong et al., 2013*) بیان کردند کاربرد ۴۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر سلنیم در محلول غذایی سرعت رشد کلم پیچ قمری را کاهش داد. با این حال، غلظت کل سلنیم در گیاه، در تمام تیمارهای حاوی سلنیم بیشتر از تیمار شاهد بود. بیشترین غلظت سلنیم تجمع یافته در گیاه در تیمار حاوی ۳۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر مشاهده شد. بیان و همکاران (*Bian et al., 2020*) با مصرف سلنیم در محلول غذایی از صفر تا ۲۰ میکرومول بر لیتر عنوان کردند بیشترین وزن تازه و خشک بخش هوایی و ریشه کاهو با کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم از منبع سلنات سدیم حاصل شد.

1- Electrolyte leakage

سبزی‌های برگ‌ای از قبیل کاهو تجمع‌دهنده نیترات هستند. نیترات در بدن انسان به نیتريت احیا شده و پس از جذب باعث ایجاد عارضه متهموگلوبینیمیا می‌شود که این مسئله باعث ایجاد سندروم نوزاد کبود در نوزادان^۲ می‌گردد. همچنین نیتريت با ترکیبات نیتروساتابل از قبیل آمیدها و آمین‌ها در معده انسان واکنش داده و منجر به تولید ترکیبات ان- نیتروزامین سرطان‌زای قوی در گونه‌های حیوانی بوده و بنابراین می‌توانند منجر به بروز سرطان در انسان شوند (*Risch et al., 1985*). نتایج تحقیقات حاکی از آن است که کاربرد سلنیم در محلول غذایی منجر به کاهش تجمع نیترات در سبزی‌ها شده است. در همین زمینه جلالی و صالحی چگنی (*Jalali & Salehi Chegeni, 2020*) گزارش دادند کاربرد سلنیم در محلول غذایی با غلظت ۵ میکرومول بر لیتر باعث کاهش غلظت نیترات در هر دو گیاه اسفناج و کاهو شد. کاربرد سلنیم از طریق افزایش هدایت روزنه‌ای و میزان کلروفیل باعث افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه شد. آنها بیان داشتند سلنیم تأثیر مثبتی بر کاهش تجمع نیترات در هر دو گیاه از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم نیترات داشت. ریوس و همکاران (*Rios et al., 2010*) گزارش دادند که سلنیم سبب کاهش تجمع نیترات در کاهو به‌واسطه‌ی افزایش فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز، نیتريت ردوکتاز، گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سنتتاز و متابولیسم نیتروژن شد. لی و همکاران (*Lei et al., 2018*) دریافتند کاربرد سلنیم به‌طور قابل توجهی سبب کاهش تجمع نیترات در کاهو شده و کمترین میزان تجمع نیترات تحت تأثیر غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم از منبع سلنیت سدیم به‌دست آمد. آنها بیان کردند سلنیم با افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر بر متابولیسم نیتروژن عملکرد مثبتی در کاهش تجمع نیترات در کاهو داشت. همچنین استفاده از سلنیم سبب افزایش میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، بازده تعرق و در نتیجه افزایش ظرفیت فتوسنتزی کاهو شد. بیان و همکاران (*Bian et al., 2020*) گزارش دادند کمترین میزان نیترات و بالاترین زیست‌توده کاهو در هر دو تیمار حاوی سلنیت و سلنات با غلظت ۱۰ میکرومول بر لیتر در کشت هیدروپونیک مشاهده شد. نتایج پژوهش‌های فوق حاکی از آن است که کاربرد مقدار مطلوب سلنیم در محلول‌های غذایی مورد استفاده در هیدروپونیک تأثیر مثبتی بر شاخص‌های رشدی و کاهش تجمع نیترات در محصولات مختلف داشته است. با این وجود غلظت بهینه سلنیم در محلول غذایی برای کشت بدون خاک آن در محصولات مختلف متفاوت بوده است. با توجه به موارد فوق این پژوهش به منظور تعیین غلظت بهینه سلنیم در محلول غذایی مورد استفاده برای تولید کاهوی فرانسوی قرمز که از بازاری پسندی بالایی برخوردار است اجرا شد.

2- Blue baby syndrome

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت طرح کاملاً تصادفی با هفت تیمار شامل غلظت‌های مختلف سلنیم در محلول غذایی در چهار تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد روی کاهوی فرانسوی قرمز رقم لولا رزا به صورت کشت هیدروپونیک بستر متخلخل انجام شد. غلظت‌های مختلف سلنیم محلول غذایی شامل صفر، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر بودند. با توجه به اثرات مثبت سلنات در افزایش متابولیسم نیترات و فعالیت آنزیم‌های مرتبط با آسیمیلاسیون نیترات (Bian et al., 2020) و از طرف دیگر برتری سلنات نسبت به سلنیت در غنی‌سازی سلنیم با کاهو و بهبود رشد بخش هوایی آن (Ramos et al., 2010) از سلنات سدیم ($\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ساخت شرکت سیگما آلدريج برای تهیه غلظت‌های مختلف سلنیم در محلول غذایی استفاده شد. به منظور اجرای آزمایش، بذره‌های کاهو در ۱۶ آبان ۱۴۰۰ در سینی کشت نشاء حاوی کوکوپیت و پرلیت (با نسبت ۲ به ۱ حجمی) کاشته شده و روزانه توسط آب مقطر آبیاری شدند. پس از ظهور دو برگ اولیه، کود آبیاری نشاءها با محلول غذایی یک چهارم قدرت دمنگوس و همکاران (Domingues et al., 2012) تا روز ۱۴ بعد از کشت بذور انجام شد. به تدریج و با افزایش رشد نشاءهای کاهو به ترتیب تا روز ۲۴ و ۳۶ روز بعد از کشت از محلول‌های غذایی یک دوم قدرت و سه چهارم قدرت استفاده شد. سپس ۳۶ روز پس از کشت (در مرحله پنج تا شش برگگی)، نشاءهای کاهو به گلدان‌های پلاستیکی ۱/۷ لیتری حاوی پرلیت (با اندازه ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر) منتقل شدند. برای هر واحد آزمایشی دو گلدان در نظر گرفته شده و در داخل هر گلدان یک بوته کشت شد (مجموعاً ۵۶ گلدان). پس از انتقال نشاءهای کاهو به گلدان‌ها از محلول غذایی کامل استفاده شد. همچنین اعمال تیمارهای سلنیم بلافاصله پس از انتقال نشاءهای کاهو شروع شد. گلدان‌های آزمایشی در گلخانه با دمای 23 ± 3 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی 60 ± 10 درصد بر روی سکو چیده شدند. برای تهیه محلول غذایی، از آب معمولی با pH ۷/۶، قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر، غلظت کاتیون‌های کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم به ترتیب ۱، ۰/۵، ۰/۱ و ۰/۰۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و غلظت آنیون‌های نیترات، بی‌کربنات و کلر به ترتیب ۰/۳۱، ۱/۵ و ۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر استفاده شد. بر مبنای شاخص‌های مناسب آب برای تهیه محلول غذایی (قابلیت هدایت الکتریکی کمتر از ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و غلظت سدیم و کلر کمتر از ۱/۵ میلی‌مول بر لیتر) (Van-der-Lugt et al., 2020) این آب در گروه مناسب برای تهیه محلول غذایی قرار گرفت. برای تهیه محلول غذایی از فرمولاسیون پیشنهادی دمنگوس و همکاران (Domingues et al., 2012) با کمی تغییرات استفاده شد. در این فرمولاسیون غلظت نیتروژن نیترات، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و گوگرد در محلول

غذایی به ترتیب برابر با ۱۰/۵، ۰/۷، ۰/۲، ۳/۵، ۱/۴ و ۱/۴ میلی‌مولار و غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف آهن، منگنز، روی، مس، مولیبدن و بور به ترتیب برابر ۶۳/۵، ۶/۳۶، ۰/۵۴، ۰/۲۲، ۰/۰۷ و ۳۲/۴ میکرومولار بود. با لحاظ کردن غلظت عناصر غذایی موجود در آب، محاسبات لازم برای حصول به غلظت‌های مورد نظر در محلول‌های غذایی مورد استفاده انجام شد. همچنین pH محلول‌های غذایی با استفاده از محلول یک مولار اسید سولفوریک روی ۵/۴ تنظیم شد. سپس قابلیت هدایت الکتریکی محلول‌های غذایی تهیه شده با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج اندازه‌گیری شد. قابلیت هدایت الکتریکی محلول‌های غذایی در محدوده ۱/۳۶ تا ۱/۴۱ دسی‌زیمنس بر متر قرار داشت. محلول غذایی روزانه و به صورت دستی به گیاهان اضافه شد. نوع سامانه هیدروپونیک مورد استفاده از نوع باز بود و کسر آبشویی بسته به مرحله رشد گیاه بین ۱۰ تا ۱۲ درصد در نظر گرفته شد تا از تجمع نمک‌ها در بستر جلوگیری شود. سپس مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره داشت در گلخانه تا زمان برداشت صورت گرفته و ۳۳ روز پس از انتقال نشاء، بوته‌های کاهو برداشت شدند. پس از برداشت، بوته‌ها به دو بخش شاخساره و ریشه تقسیم شده و وزن تازه آن‌ها توسط ترازوی رقومی اندازه‌گیری شد. یک بوته برای اندازه‌گیری خصوصیات ظاهری گیاه شامل ارتفاع گیاه، قطر گیاه، حداکثر طول و عرض برگ، تعداد برگ، شاخص سبزی‌نگی برگ و غلظت نیترات اختصاص داده شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع، خط‌کش از محل برش بوته تا کنار بلندترین برگ در هر بوته قرار داده شده و ارتفاع اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری قطر بوته نیز ابتدا محیط بوته در قسمت بالایی آن با استفاده از متر اندازه‌گیری شده و سپس قطر بوته محاسبه شد. حداکثر طول و عرض برگ نیز با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. سبزی‌نگی برگ با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج Hansatech مدل CL-01 اندازه‌گیری شد. بدین منظور برای هر واحد آزمایشی ۱۰ قرائت از برگ‌های مختلف انجام شد و سپس میانگین آن‌ها به عنوان شاخص میزان کلروفیل آن واحد در نظر گرفته شد. نمونه‌های ریشه و شاخساره کاهو به مدت ۷۲ ساعت در آون فن‌دار در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند. سپس نمونه‌ها آسیاب شده و پس از هضم تر با اسید نیتریک ۶۵ درصد و آب اکسیژنه ۳۰ درصد (Maneetong et al., 2013)، غلظت سلنیم نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ICP اندازه‌گیری شد (Kapolna & Fodor, 2006; Maneetong et al., 2013). لازم به ذکر است در تیمار با غلظت صفر سلنیم (شاهد) در محلول غذایی غلظت سلنیم ریشه و شاخساره کاهو غیرقابل تشخیص بود (حد قابل تشخیص دستگاه ۶ میکروگرم بر لیتر بود) که در نتیجه برای مقادیر سلنیم ریشه و شاخساره در این تیمار عدد صفر منظور شد. برای اندازه‌گیری غلظت نیترات یکی از گیاهان به دو بخش برگ‌های بیرونی (پیرتر، برگ‌های شماره ۱ تا ۱۰) و برگ‌های درونی (جوان‌تر، برگ‌های شماره ۱۱ به

اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر طول و عرض برگ و تعداد کل برگ کاهو معنادار نشد (جدول ۱). نتایج نشان داد کاربرد سلنیم تا غلظت ۵ میکرومول بر لیتر تأثیر معناداری بر ارتفاع بوته کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم نداشت. اما کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم منجر به کاهش معنادار ارتفاع بوته در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد که البته تفاوت معناداری با کاربرد ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم نداشت. بیشترین میزان ارتفاع بوته (۱۲/۱ سانتی متر) با کاربرد ۰/۱ میکرومول بر لیتر سلنیم و کمترین ارتفاع بوته (۱۰/۲ سانتی متر) با کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد (جدول ۲).

نتایج نشان داد مصرف سلنیم در غلظت‌های کم، باعث افزایش قطر بوته کاهو شد، به طوری که کمترین قطر بوته (۲۰/۹ سانتی متر) با عدم کاربرد سلنیم و بیشترین قطر بوته (۲۴/۸ سانتی متر) با کاربرد ۱ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد. اما با افزایش بیشتر سلنیم قطر بوته کاهش یافت. به طوری که با کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم قطر بوته به طور معناداری در مقایسه با کاربرد ۱ میکرومول بر لیتر سلنیم کاهش یافت. با این وجود تفاوت معناداری از لحاظ قطر بوته بین غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده نشد (جدول ۲). همچنین، طول و عرض برگ کاهو و تعداد برگ تحت تأثیر کاربرد سلنیم قرار نگرفتند (جدول ۱).

بعد تقسیم شد (Marsic & Osvald, 2002). سپس غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و درونی به روش سولفوسالسیلیک اسید و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Cataldo et al., 1975). غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو با استفاده از میانگین وزنی غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و درونی محاسبه شد. برای اندازه‌گیری میزان مواد جامد محلول برگ (درجه بریکس) در یکی دیگر از گیاهان برداشت شده، تعداد ۳ برگ بیرونی (پیرتر) و ۳ برگ درونی (جوان تر) در هاون خرد شدند. سپس عصاره مخلوط خرد شده تهیه و میزان کل مواد محلول برگ با دستگاه رفاکتومتر مدل Atago اندازه‌گیری شد. نتایج حاصله توسط نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹ تجزیه شده و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل تفاوت معنادار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص‌های رشدی کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر ارتفاع و قطر کاهو در سطح پنج درصد آماری معنادار شد. در حالی که

جدول ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر ارتفاع و قطر گیاه، طول و عرض برگ و تعداد برگ کاهو
Table 1- Variance analysis (mean square) for the effect of selenium concentration in the nutrient solution on height and diameter of the plant, length and width of the leaf and leaf number of lettuce

منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	قطر گیاه	طول برگ	عرض برگ	تعداد برگ
S.O.V.	df	Plant height	Plant diameter	Leaf length	Leaf width	Leaf number
غلظت سلنیم	6	1.74*	5.86*	0.32 ^{ns}	0.50 ^{ns}	6.75 ^{ns}
Selenium concentration						
خطا	21	0.47	2.02	0.58	0.87	4.79
Error						
ضریب تغییرات		6.2	6.2	5.6	6.6	10.7
Coefficient of variation (%)						

^{ns} غیر معنادار، * معنادار در سطح ۵ درصد
^{ns} Non significant, * significant at 5%

جدول ۲- مقایسه میانگین تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر ارتفاع و قطر گیاه، طول و عرض برگ و تعداد برگ کاهو
Table 2- Mean comparisons of the effect of selenium concentration in the nutrient solution on height and diameter of the plant, length and width of the leaf and leaf number of lettuce

غلظت سلنیم	ارتفاع گیاه	قطر گیاه	طول برگ	عرض برگ	تعداد برگ
Selenium concentration	Plant height	Plant diameter	Leaf length	Leaf width	Leaf number
($\mu\text{mol L}^{-1}$)		(cm)			
0	11.3 ^{abc}	20.9 ^c	13.7	13.5	18.7
0.1	12.1 ^a	22.6 ^{bc}	13.5	14.2	20.8
0.5	10.8 ^{bcd}	22.5 ^{bc}	13.7	14.2	20.3
1	11.4 ^{ab}	24.8 ^a	14.3	14.7	22.8
5	10.9 ^{bcd}	23.5 ^{ab}	13.6	14.4	20.8
10	10.2 ^d	22.2 ^{bc}	13.4	14.3	19.3
20	10.3 ^{cd}	23.3 ^{ab}	13.6	14.1	21.0

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنادار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

ارتفاع گیاهان تحت تأثیر خصوصیات ژنتیکی و شرایط محیطی نظیر رطوبت، کمیت و کیفیت نور و تغذیه قرار می‌گیرد. بر مبنای نتایج این پژوهش کاربرد سلنیم با غلظت ۱۰ میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار ارتفاع بوته در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. همچنین اگر چه قطر بوته با افزایش غلظت سلنیم محلول غذایی افزایش یافت اما افزایش بیشتر سلنیم منجر به کاهش قطر بوته در غلظت ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. سلنیم در غلظت‌های کم می‌تواند بر سنتز کلروفیل و فتوسنتز تأثیر مثبت داشته باشد و در نتیجه منجر به افزایش ارتفاع و وزن گیاه شود. پنانن و همکاران (Pennanen et al., 2002) نشان دادند که تیمار سلنیم موجب افزایش رشد بخش هوایی گیاهان می‌شود. غلظت‌های کم سلنیم با افزایش سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی، تثبیت کربن و همچنین سنتز و هیدرولیز نشاسته و ساکارز موجب افزایش رشد گیاه می‌شود. اما کاربرد سلنیم در سطوح زیاد موجب کاهش کلروفیل و سنتز کربوهیدرات‌ها و متعاقب آن کاهش رشد گیاه می‌شود (Sun et al., 2010) سمیت غلظت‌های زیاد سلنیم عمدتاً با جایگزینی غیراختصاصی اسیدهای آمینه گوگردی توسط آنالوگ‌های سلنیم مرتبط است. سلنیم در واکنش‌های مختلف در گیاهان جایگزین گوگرد می‌شود. گوگرد جزو ساختار اسیدهای آمینه پروتئینی از جمله سیستمین و متیونین بوده که این اسیدهای آمینه نقش کلیدی در رشد گیاه دارند. این اثر ممکن است ناشی از اختلال در تعادل عناصر غذایی نیز باشد (Hawrylak-Nowak, 2008a). بر مبنای نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد کاربرد سلنیم در مقادیر بیشتر از ۱۰ میکرومول بر لیتر، احتمالاً منجر به بروز اثرات سمی آن شده است. در همین زمینه شارما و همکاران (Sharma et al., 2010) عنوان کردند با افزایش غلظت

سلنیم ارتفاع گیاه، تعداد برگ و میزان ماده خشک کلزا در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم کاهش یافت. همچنین بذل و همکاران (Bazl et al., 2017) در بررسی تأثیر سولفات و سلنیم بر برخی شاخص‌های رشدی پیاز عنوان کردند در تمامی غلظت‌های سولفات هم‌زمان با افزایش غلظت سلنات ارتفاع بلندترین برگ کاهش یافت. بر مبنای نتایج این پژوهش هیچ کدام از شاخص‌های رویشی دیگر از قبیل تعداد برگ، طول و عرض برگ تحت تأثیر کاربرد سلنیم قرار نگرفتند. همسو با نتایج این پژوهش، لانگ‌چمپ و همکاران (Longchamp et al., 2013) در کشت هیدروپونیک ذرت گزارش کردند کاربرد سلنیم بر میزان سطح برگ تأثیری نداشته است.

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص سبزی‌نگی و کل مواد جامد محلول برگ کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص سبزی‌نگی و کل مواد جامد محلول برگ کاهو به ترتیب در سطوح یک و پنج درصد آماری معنادار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد با افزایش غلظت سلنیم شاخص سبزی‌نگی برگ کاهو افزایش یافت. کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۱ و ۵ میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار شاخص سبزی‌نگی برگ کاهو نسبت به عدم کاربرد سلنیم مشاهده شد. کاربرد سایر سطوح سلنیم (۰/۱، ۰/۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر) تفاوت معناداری با عدم کاربرد سلنیم از نظر شاخص سبزی‌نگی برگ ایجاد نکردند. نتایج نشان داد کمترین شاخص سبزی‌نگی برگ (۲/۵۸) با کاربرد ۰/۱ میکرومول بر لیتر سلنیم و بیشترین شاخص سبزی‌نگی برگ (۳/۹۵) با کاربرد یک میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص سبزی‌نگی برگ، کل مواد جامد محلول برگ، وزن تازه ریشه و شاخصاره کاهو

Table 3- Variance analysis (mean square) for the effect of selenium concentration in the nutrient solution on leaf chlorophyll index, leaf total soluble solids, root and shoot fresh weights of lettuce

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	شاخص سبزی‌نگی برگ Leaf chlorophyll index	کل مواد جامد محلول برگ Leaf total soluble solids	وزن تازه ریشه Root fresh weigh	وزن تازه شاخصاره Shoot fresh weigh
غلظت سلنیم Selenium concentration	6	1.14**	0.61*	1.09 ^{ns}	236.5*
خطا Error	21	0.22	0.22	4.04	86.0
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		13.7	13.0	15.8	8.0

^{ns} غیر معنادار، * معنادار در سطح ۵ درصد، ** معنادار در سطح ۱ درصد
^{ns} Non significant, * significant at 5%, ** significant at 1%

جدول ۴- مقایسه میانگین تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص سبزی‌نگی برگ، کل مواد جامد محلول برگ، وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو

Table 4- Mean comparisons of the effect of selenium concentration in the nutrient solution on leaf chlorophyll index, leaf total soluble solids, root and shoot fresh weights of lettuce

غلظت سلنیم Selenium concentration ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	شاخص سبزی‌نگی برگ Leaf chlorophyll index	کل مواد جامد محلول برگ Leaf total soluble solids	وزن تازه ریشه Root fresh weigh (g plant ⁻¹)	وزن تازه شاخساره Shoot fresh weigh (g plant ⁻¹)
0	3.21 ^{bcd}	3.20 ^c	12.5	104.5 ^c
0.1	2.58 ^d	3.33 ^{bc}	12.3	115.9 ^{abc}
0.5	2.88 ^{dc}	3.80 ^{abc}	13.2	111.3 ^{bc}
1	3.95 ^a	3.43 ^{bc}	12.4	127.2 ^a
5	3.92 ^a	4.23 ^a	13.6	117.5 ^{abc}
10	3.85 ^{ab}	3.30 ^{bc}	13.0	114.4 ^{abc}
20	3.53 ^{abc}	3.95 ^{ab}	12.4	124.5 ^{ab}

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنادار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

شده است که در مطابقت با نتایج این پژوهش است. البته گزارش‌هایی نیز در مورد تأثیر منفی غلظت‌های زیاد سلنیم بر مقدار کلروفیل و فتوسنتز گیاه وجود دارد. به‌طوری‌که گزارش‌ها حاکی از کاهش محتوای کلروفیل گیاه تحت تأثیر غلظت‌های زیاد سلنیم بوده است (Hawrylak et al., 2007). از آنجایی‌که کاهو برای تهیه سالاد استفاده می‌شود افزایش شاخص سبزی‌نگی برگ در آن اهمیت زیادی دارد. زیرا رنگ تیره‌تر کاهو توسط مصرف‌کنندگان ترجیح داده می‌شود (Manzocco et al., 2011). بنابراین مصرف مقادیر مناسب سلنیم می‌تواند در بازاریابی این محصول نقش زیادی داشته باشد.

مقدار کل مواد جامد محلول برگ (درجه بریکس) معیاری برای تعیین میزان قندهای محلول است که افزایش آن در بهبود کیفی کاهو مؤثر است. نتایج نشان داد افزایش غلظت سلنیم منجر به افزایش معنادار میزان کل مواد جامد محلول برگ شد. به‌طوری‌که کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۵ و ۲۰ میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار میزان کل مواد جامد محلول برگ در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. در این میان با کاربرد غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵ و ۱ میکرومول بر لیتر سلنیم تفاوت معناداری در میزان کل مواد جامد محلول برگ نسبت به عدم کاربرد سلنیم مشاهده نشد. بیشترین میزان کل مواد جامد محلول برگ (۴/۲۳) با کاربرد ۵ میکرومول بر لیتر سلنیم و کمترین آن (۳/۲۰) با عدم کاربرد سلنیم مشاهده شد (جدول ۴). کاربرد مقادیر کم سلنیم احتمالاً از طریق افزایش میزان کلروفیل و متعاقب آن میزان فتوسنتز و تثبیت کربن، تجمع نشاسته در کلروپلاست‌ها را افزایش داده است (Sun et al., 2011). مالیک و همکاران (Malik et al., 2010) نشان دادند احتمالاً سلنیم با فراتنظیمی آنزیم‌های دخیل در سنتز و هیدرولیز ساکارز (اینورتاز، ساکارز سنتتاز و ساکارز فسفات سنتتاز) و آنزیم‌های هیدرولیز کننده نشاسته (آمیلازها) میزان تولید نشاسته و ساکارز را در گیاه افزایش داده است.

اندازه‌گیری شاخص سبزی‌نگی برگ روشی غیرمخرب برای برآورد میزان کلروفیل برگ است. میزان کلروفیل برگ از معیارهای مهمی است که به‌عنوان شاخص فعالیت فتوسنتزی در کشاورزی به‌کار می‌رود. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش غلظت سلنیم تا یک میلی‌مول بر لیتر شاخص سبزی‌نگی برگ افزایش و کاربرد مقادیر بیشتر سلنیم منجر به کاهش این شاخص شد. سلنیم اثر دوگانه بر رشد و نمو گیاهان بسته به شکل و مقدار کاربرد آن دارد. افزودن سلنیم در غلظت‌های کم به محیط می‌تواند اثرات مفیدی بر رشد گیاه و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آن داشته باشد. نتایج پژوهش‌های انجام شده حاکی از اثر افزایش غلظت‌های کم سلنیم بر محتوای کلروفیل گیاهان است (Pennanen et al., 2002). خادمی آستانه و همکاران (Khademi Astaneh et al., 2015) در بررسی تأثیر کاربرد سلنیم در محلول غذایی در کشت هیدروپونیک کلم تکمه‌ای گزارش کردند با افزایش غلظت سلنیم تا ۸ میلی‌گرم بر لیتر شاخص سبزی‌نگی برگ‌ها افزایش و کاربرد مقادیر بیشتر منجر به کاهش این شاخص شد. افزایش میزان کلروفیل احتمالاً به‌دلیل دخالت سلنیم در مسیر بیوسنتز کلروفیل به‌ویژه در نتیجه برهمکنش سلنیم با آنزیم‌های حاوی گروه سولفیدریل است. به‌نظر می‌رسد نقش حفاظتی این عنصر در گیاهان به‌ویژه حفاظت سلنیم از مراکز فتوشیمیایی برگ‌ها دلیل دیگر افزایش میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه در حضور سلنیم می‌باشد (Hajiboland & Keivanfar, 2012). همچنین سلنیم به‌طور قابل توجهی میزان کلروفیل را افزایش داده که این افزایش در کل محتوای کلروفیل می‌تواند در افزایش میزان کارتنوئیدها مؤثر باشد. دلیل این مسئله آن است که کارتنوئیدها، کلروفیل را از تخریب اکسیداسیون نوری حفاظت می‌کنند (Jalali & Salehi Chegeni, 2020). تأثیر سلنیم بر افزایش مقدار کلروفیل a، b و کل در دیگر پژوهش‌های انجام شده (Hawrylak-Noawk, 2008b; Chen et al., 2008) نیز گزارش

(*al.*, 2012)، پیاز (*Bazl et al.*, 2017; *Amerian et al.*, 2018) نیز مشاهده شده است که با نتایج پژوهش حاضر همسو می‌باشد. اما افزایش بیشتر غلظت سلنیم می‌تواند باعث کاهش ظرفیت فتوسنتزی گیاه شده و در نهایت منجر به کاهش زیست‌توده یا حتی مرگ گیاه شود (*Hawrylak-Nowak*, 2013) که این امر در گیاهان مختلف از جمله ذرت و لوبیا (*Sun et al.*, 2011) نیز مشاهده شده است.

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت سلنیم ریشه و شاخساره کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت سلنیم ریشه و شاخساره کاهو در سطح آماری یک درصد معنادار بود (*جدول ۵*). نتایج نشان داد کاربرد سلنیم منجر به افزایش معنادار غلظت سلنیم ریشه و شاخساره کاهو شد. کاربرد سلنیم تا غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به افزایش غلظت سلنیم ریشه شد اما این افزایش از لحاظ آماری معنادار نبود. در این میان تفاوت معناداری از نظر غلظت سلنیم ریشه بین کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵ و یک میکرومول بر لیتر دیده نشد. اما با افزایش بیشتر غلظت سلنیم تا ۲۰ میکرومول بر لیتر غلظت سلنیم ریشه به‌طور معناداری افزایش یافت. به‌طوری‌که کاربرد ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم منجر به بیشترین غلظت سلنیم ریشه کاهو (۳۵/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) شد. غلظت سلنیم ریشه گیاهان کاهوی تغذیه شده با این میزان سلنیم در مقایسه با غلظت‌های ۵ و ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم به‌ترتیب ۳/۸ و ۲/۱ برابر افزایش یافت. اما در تیمار عدم کاربرد سلنیم در محلول غذایی، غلظت سلنیم ریشه قابل تشخیص با دستگاه ICP نبود (*جدول ۶*). نتایج نشان داد کاربرد سلنیم تا غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به افزایش غلظت سلنیم شاخساره شد اما این افزایش از لحاظ آماری معنادار نبود. در این میان تفاوت معناداری از نظر غلظت سلنیم شاخساره بین کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵ و یک میکرومول بر لیتر دیده نشد. اما با افزایش بیشتر غلظت سلنیم تا ۲۰ میکرومول بر لیتر غلظت سلنیم شاخساره به‌طور معناداری افزایش یافت. به‌طوری‌که کاربرد سلنیم با غلظت ۲۰ میکرومول بر لیتر منجر به بیشترین غلظت سلنیم شاخساره کاهو (۱۵/۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) شد. غلظت سلنیم شاخساره گیاهان کاهوی تغذیه شده با این میزان سلنیم در مقایسه با غلظت‌های ۵ و ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم به‌ترتیب ۴/۴ و ۲ برابر افزایش یافت. مشابه ریشه در تیمار عدم کاربرد سلنیم غلظت سلنیم شاخساره کاهو قابل تشخیص با دستگاه ICP نبود (*جدول ۶*).

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی محلول غذایی بر وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر وزن تازه ریشه کاهو معنادار نشد. در حالی که اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر وزن تازه شاخساره کاهو در سطح پنج درصد آماری معنادار شد (*جدول ۳*). کاربرد یک میکرومول بر لیتر سلنیم منجر به بیشترین وزن تازه شاخساره کاهو (۱۲۷/۲ گرم بر گیاه) شد. وزن تازه شاخساره گیاهان کاهوی تغذیه شده با این میزان سلنیم در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم ۲۲ درصد افزایش یافت. همچنین کاربرد سلنیم با غلظت ۲۰ میکرومول بر لیتر نیز منجر به افزایش معنادار وزن تازه شاخساره کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد اگرچه تفاوت معناداری از نظر وزن تازه شاخساره بین غلظت‌های یک و ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده نشد. کمترین وزن تازه شاخساره (۱۰۴/۵ گرم بر گیاه) در تیمار شاهد مشاهده شد. اما تفاوت معناداری از نظر وزن تازه شاخساره کاهو بین گیاهان تغذیه شده با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول سلنیم بر لیتر محلول غذایی مشاهده نشد (*جدول ۴*). بر مبنای نتایج این پژوهش، کاربرد سلنیم با غلظت‌های یک و ۲۰ میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنی‌دار وزن تازه شاخساره کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند کاربرد سلنیم در غلظت‌های پایین اثر مثبتی بر رشد محصول و تحمل تنش دارد، اگرچه نقش این عنصر هنوز به‌عنوان یک عنصر کم‌مصرف ضروری در گیاهان عالی تأیید نشده است. تأثیر مثبت سلنیم بر افزایش عملکرد گیاهان از طریق راهکارهای مختلفی است. سلنیم از طریق افزایش محتوای کلروفیل برگ‌ها و کاهش نشت الکترولیت از آنها منجر به افزایش عملکرد گیاه می‌شود. با افزایش سنتز کلروفیل میزان فتوسنتز و تثبیت کربن در گیاه افزایش یافته که این امر در نهایت منجر به افزایش عملکرد گیاه می‌شود (*Khademi Astaneh et al.*, 2015). از طرف دیگر سلنیم با افزایش فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی و ترکیبات فنلی گیاه بر بهبود عملکرد آن مؤثر است (*Amerian et al.*, 2018). صفاریزدی و همکاران (*Saffar Yazdi et al.*, 2012) گزارش کردند تأثیر مثبت سلنیم بر وزن تازه گیاه اسفناج بدلیل تأثیر این عنصر بر سنتز کلروفیل، تثبیت کربن، سنتز و هیدرولیز نشاسته و تحریک تقسیم سلولی است. البته افزایش وزن تازه شاخساره ممکن است به نقش تنظیم‌کنندگی ترکیبات سلنیمی در مدیریت آب و افزایش آب بافت گیاه نیز ارتباط داشته باشد (*Hawrylak et al.*, 2007). تأثیر مثبت سلنیم بر افزایش عملکرد گیاه در کلم تکمه‌ای (*Khademi Astaneh et al.*, 2015)، اسفناج (*Saffar Yazdi et al.*, 2015)

جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت سلنیم ریشه و شاخساره و غلظت نیترات در ریشه، برگ‌های بیرونی، برگ‌های درونی و کل برگ‌های کاهو

Table 5- Variance analysis (mean square) for the effect of selenium concentration in the nutrient solution on root and shoot selenium concentrations and nitrate concentration in root, outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	سلنیم ریشه Root selenium	سلنیم شاخساره Shoot selenium	نیترات ریشه Root nitrate	نیترات برگ‌های بیرونی Outer leaves nitrate	نیترات برگ‌های درونی Inner leaves nitrate	نیترات کل برگ‌ها Nitrate of all leaves
غلظت سلنیم Selenium concentration	6	697.8**	125.4**	199454*	603128**	194112**	447676**
خطا Error	21	3.55	0.29	33058	54033	14006	25504
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		20.4	13.9	8.6	7.6	6.7	6.4

* معنادار در سطح ۵ درصد، ** معنادار در سطح ۱ درصد

* Significant at 5%, * significant at 1%

کاهو با کاربرد همین مقدار سلنیم توسط ریوس و همکاران (Rios *et al.*, 2008) بود. اما از غلظت ذکر شده توسط راموس و همکاران (Ramos *et al.*, 2010) در کاهو بیشتر بود. آنها ذکر کردند با کاربرد سلنیم در محلول غذایی با غلظت ۳۲ میکرومول بر لیتر غلظت سلنیم شاخساره کاهو به حدود ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک رسید. به نظر می‌رسد این تفاوت نشان‌دهنده جذب بهتر سلنیم در شرایط پژوهش حاضر بوده است. بر مبنای حد سمیت سلنیم در گیاهان که بیش از ۰/۱ درصد بر مبنای وزن خشک است (Tomasi *et al.*, 2015) کاربرد سلنیم در محلول غذایی حتی با غلظت ۲۰ میکرومول بر لیتر نیز منجر به تجمع مقادیر سمی این عنصر در کاهو نشد. بر مبنای توصیه وزارت کشاورزی ایالات متحده امریکا میزان توصیه شده سلنیم برای بزرگسالان ۵۰ تا ۷۰ میکروگرم در روز است (US Department of Agriculture, 2001). بر مبنای محاسبات این تحقیق و بر اساس درصد ماده خشک شاخساره کاهوی تولید شده در این پژوهش (۵/۵ درصد) و با توجه به این که غلظت سلنیم شاخساره کاهو با کاربرد ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم در محلول غذایی حدود ۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک بود هر کیلوگرم کاهوی تازه حاوی ۸۲۵ میکروگرم سلنیم است که مصرف روزانه ۸۰ گرم از این کاهو می‌تواند نیاز روزانه یک فرد بزرگسال را به این عنصر تأمین کند (محاسبات با فرض نیاز روزانه ۶۶ میکروگرم در روز سلنیم برای یک فرد بزرگسال انجام شده است). بنابراین به راحتی می‌توان با تولید کاهوی غنی شده با سلنیم نیاز بدن انسان را به این عنصر تأمین کرد. بر مبنای نتایج این پژوهش و با توجه به گسترش کمبود سلنیم در جوامع انسانی، استفاده از این عنصر در محلول غذایی مورد استفاده برای پرورش کاهو در غنی‌سازی این محصول با سلنیم و تأمین نیاز روزانه بدن انسان به این عنصر مفید است.

نتایج پژوهش‌های انجام شده در گیاهان مختلف حاکی از آن است که با کاربرد سلنیم در محیط، غلظت آن در گیاه افزایش یافته است. در همین زمینه خادمی آستانه و همکاران (Khademi Astaneh *et al.*, 2015) در بررسی تأثیر کاربرد سلنیم در محلول غذایی در کشت هیدروپونیک کلم تکمه‌ای گزارش کردند با افزایش مصرف سلنیم، غلظت سلنیم در برگ‌های پیر بیشتر از برگ‌های جوان و در برگ‌های جوان بیشتر از جوانه‌ها افزایش یافت. راموس و همکاران (Ramos *et al.*, 2010) در بررسی تأثیر کاربرد سلنیم از دو شکل سلنات و سلنیت بر رشد کاهو در سیستم کشت هیدروپونیک گزارش کردند با افزایش غلظت سلنیم در محلول غذایی غلظت آن در برگ کاهو افزایش یافت. هائیرلاک-نواک (Hawrylak-Nowak, 2013) در بررسی اثرات غلظت‌های مختلف سلنیت و سلنات بر تجمع سلنیم در کاهو در شرایط هیدروپونیک گزارش دادند که در قسمت‌های خوراکی کاهو، غلظت سلنیم با کاربرد سلنات در مقایسه با سلنیت بیشتر بود و در مورد ریشه‌ها کاربرد سلنیت باعث تجمع زیاد سلنیم گردید. منیتونگ و همکاران (Maneetong *et al.*, 2013) در بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف سلنیم در محلول غذایی بر تجمع سلنیم در کلم پیچ قمری در سیستم کشت هیدروپونیک گزارش کردند غلظت کل سلنیم در گیاه، در تمام تیمارهای حاوی سلنیم بیشتر از تیمار شاهد بود. نتایج مشابهی توسط بذل و همکاران (Bazl *et al.*, 2017) در پیاز قرمز آدرشهر، لی و همکاران (Lee *et al.*, 2001) در نعنای کره‌ای، مالورگیو و همکاران (Malorgio *et al.*, 2009) در گیاهان شیکوره و کاهو و لانگ‌چمپ و همکاران (Longchamp *et al.*, 2013) در ذرت گزارش شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که حداکثر غلظت سلنیم در شاخساره با کاربرد ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم به میزان ۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک مشاهده شد که این عدد در محدوده غلظت ذکر شده برای غلظت سلنیم در شاخساره

جدول ۶- مقایسه میانگین تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت سلنیم ریشه و شاخساره (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک) و غلظت نیترات (میلی گرم بر کیلوگرم وزن تازه) در ریشه، برگ‌های بیرونی، برگ‌های درونی و کل برگ‌های کاهو

Table 6- Mean comparisons of the effect of selenium concentration in the nutrient solution on root and shoot selenium concentrations (mg kg^{-1} dry weight) and nitrate concentration (mg kg^{-1} fresh weight) in root, outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce

غلظت سلنیم Selenium concentration ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	سلنیم ریشه Root selenium	سلنیم شاخساره Shoot selenium	نیترات ریشه Root nitrate	نیترات برگ‌های بیرونی Outer leaves nitrate	نیترات برگ‌های درونی Inner leaves nitrate	نیترات کل برگ‌ها Nitrate of all leaves
0	0 ^d	0 ^d	2243 ^{ab}	3571 ^a	2032 ^a	2918 ^a
0.1	0.27 ^d	0.26 ^d	2098 ^b	3112 ^b	1731 ^c	2527 ^b
0.5	0.87 ^d	0.42 ^d	2162 ^{ab}	2478 ^c	1697 ^c	2095 ^d
1	1.63 ^d	0.62 ^d	2427 ^a	3547 ^a	1999 ^{ab}	2934 ^a
5	9.36 ^c	3.42 ^c	1688 ^c	3055 ^b	1678 ^c	2363 ^{bc}
10	16.99 ^b	7.44 ^b	2103 ^b	2889 ^b	1384 ^d	2170 ^{cd}
20	35.56 ^a	15.04 ^a	2132 ^b	2867 ^b	1844 ^{bc}	2365 ^{bc}

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنادار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

وزن تازه) در تیمار عدم کاربرد سلنیم مشاهده شد. نتایج نشان داد کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲۰ میکرومول بر لیتر میزان نیترات برگ‌های درونی را به ترتیب ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۳۲ و ۹ درصد نسبت به عدم کاربرد سلنیم کاهش داد (جدول ۶). نتایج اثر کاربرد سطوح مختلف سلنیم بر غلظت نیترات کل برگ‌های کاهو نشان داد کاربرد سلنیم به استثنای غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کمترین غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو (۲۰۹۴ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد. نتایج نشان داد کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲۰ میکرومول بر لیتر میزان نیترات برگ‌های درونی را به ترتیب ۱۳، ۲۸، ۱۹ و ۲۶ درصد نسبت به عدم کاربرد سلنیم کاهش داد (جدول ۶).

کاهش غلظت نیترات در بخش‌های مختلف کاهو در نتیجه کاربرد سلنیم دلایل مختلفی دارد. ریوس و همکاران (Rios et al., 2010) عنوان کردند کاهش غلظت نیترات پس از کاربرد سلنیم ممکن است به دو دلیل باشد. نخست، اثر منفی سلنیم بر ناقلین غشا است. البته کاهش غلظت نیترات توسط سلنیم ممکن است به علت اثر آنتاگونیستی بین این دو آنیون نیز باشد. دلیل دوم می‌تواند القای آسیمیلایون نیترات توسط افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز باشد که توسط سلنیم تحریک می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند که در شرایط کاربرد سلنیم علاوه بر افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز، نیاز گیاهان به ترکیبات نیتروژنه نیز افزایش می‌یابد. در حقیقت، افزایش متابولیسم گوگرد در گیاهان می‌تواند نتیجه کاربرد سلنیم باشد. افزایش آسیمیلایون گوگرد تحت این شرایط در نتیجه نیاز گیاهان به ترکیبات آلی نیتروژنه است که با افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت نیترات ریشه و شاخساره کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت نیترات ریشه کاهو در سطح پنج درصد آماری و بر غلظت نیترات برگ‌های بیرونی، درونی و همچنین کل برگ‌های کاهو در سطح یک درصد آماری معنادار شد (جدول ۵). نتایج نشان داد کاربرد سلنیم با غلظت ۵ میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات ریشه در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کاربرد سلنیم با غلظت ۵ میکرومول بر لیتر غلظت نیترات ریشه را ۲۵ درصد نسبت به عدم کاربرد سلنیم کاهش داد. اما بین کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲۰ میکرومول بر لیتر و عدم کاربرد سلنیم تفاوت معناداری از نظر غلظت نیترات ریشه مشاهده نشد. کمترین غلظت نیترات ریشه با کاربرد ۵ میکرومول بر لیتر سلنیم (۱۶۸۸ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تازه) مشاهده شد (جدول ۶). بر مبنای نتایج حاصله کاربرد سلنیم به استثنای غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کمترین غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی (۲۴۷۸ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد. کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲۰ میکرومول بر لیتر میزان نیترات برگ‌های بیرونی را به ترتیب ۱۳، ۳۱، ۱۴ و ۱۹ درصد نسبت به عدم کاربرد سلنیم کاهش داد (جدول ۶). به طور مشابه کاربرد سلنیم به استثنای غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات در برگ‌های درونی کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کمترین غلظت نیترات در برگ‌های درونی (۱۳۸۴ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم و بیشترین آن (۲۰۳۲ میلی گرم بر کیلوگرم

Jalali & Salehi) اسفناج (et al., 2018; Bian et al., 2020 Chegeni, 2020) و کلم تکمه‌ای (Khademi Astaneh et al., 2015) نیز مشاهده شده است که با نتایج پژوهش حاضر همسو می‌باشد. در مورد غلظت استاندارد نیتрат در سبزی‌های برگ‌ی اتحادیه اروپا مقدار ۲۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه را به‌عنوان حد مجاز معرفی کرده است (Santamaria, 2006). بر اساس نتایج جدول ۶ غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و کل برگ‌های گیاهان تولید شده بدون کاربرد سلنیم در محلول غذایی بیشتر از ۲۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه بود. اما با کاربرد سلنیم با غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و با کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو به زیر حد بحرانی رسید. این مطلب نشان‌دهنده آن است که کاربرد سلنیم در محلول غذایی در کاهش غلظت نیترات شاخساره کاهو موثر است. این کاهش از لحاظ تغذیه‌ای دارای اهمیت زیادی بوده و مصرف این نوع کاهو خطری را برای سلامتی انسان از نظر غلظت نیترات ایجاد نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد سلنیم در محلول غذایی با غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار قطر کاهو، وزن تازه شاخساره و شاخص سبزیگی کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. اگرچه سایر شاخص‌های رشدی از قبیل تعداد کل برگ و طول و عرض برگ تحت تأثیر معنادار کاربرد سلنیم قرار نگرفتند. کاربرد سلنیم به‌خصوص در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار غلظت این عنصر در شاخساره کاهو شد که به لحاظ غنی‌سازی این محصول با سلنیم دارای اهمیت زیادی است. همچنین کاربرد سلنیم با غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر منجر به کاهش تجمع نیترات در ریشه و شاخساره کاهو شد که از لحاظ سلامتی مصرف‌کننده دارای اهمیت زیادی است. براساس نتایج این پژوهش و با توجه به غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو، کاربرد سلنیم با غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر برای تولید کاهوی فرانسوی قرمز در کشت هیدروپونیک توصیه می‌شود.

با آسیمیلاسیون نیتروژن همراه است. در پژوهش‌های قبلی هم مشخص شد کاربرد سلنیم با تحریک و افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز باعث کاهش تجمع نیترات در جو (Aslam et al., 1990) و آفتابگردان (Ruiz et al., 2017) شد. یکی از عوامل اولیه تنظیم فعالیت نیترات ردوکتاز در گیاه، میزان نیترات است. حضور نیترات میزان mRNA نیترات ردوکتاز را افزایش داده و باعث تحریک سنتز این آنزیم می‌شود. نیترات در سیتوپلاسم سلول‌ها از طریق آنزیم نیترات ردوکتاز به نیتريت تبدیل می‌شود و این اولین مرحله از مسیر متابولیکی آسیمیلاسیون نیترات در گیاهان است که با کمک این آنزیم انجام می‌گردد. در واقع سلنیم با کاهش فعالیت ناقلین نیترات و افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز منجر به کاهش غلظت نیترات برگ می‌شود (Rios et al., 2010). از طرف دیگر سلنیم باعث کاهش انتقال نیترات از ریشه‌ها به برگ‌های کاهو شده و در نتیجه باعث کاهش تجمع نیترات در برگ‌های این گیاه می‌شود (Lei et al., 2018). در مطابقت با نتایج این پژوهش لی و همکاران (Lei et al., 2018) در بررسی تأثیر کاربرد سلنیم بر تجمع نیترات در گیاه کاهو در سیستم کشت هیدروپونیک دریافتند کاربرد سلنیم به‌طور قابل توجهی سبب کاهش تجمع نیترات در کاهو در سیستم کشت هیدروپونیک شد و کمترین میزان تجمع نیترات تحت تأثیر غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم از منبع سلنیت سدیم به‌دست آمد. همچنین استفاده از سلنیم سبب افزایش میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، بازده ترق و در نتیجه افزایش ظرفیت فتوسنتزی کاهو شد. علاوه بر این، سلنیم با افزایش فعالیت آنزیم‌های موثر بر متابولیسم نیتروژن از جمله نیترات ردوکتاز، نیتريت ردوکتاز، گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سنتتاز عملکرد مثبتی در کاهش تجمع نیترات در کاهو داشت. آنها بیان کردند کاربرد سلنیم منجر به کاهش تجمع نیترات در برگ‌های کاهو از طریق ۱- افزایش انتشار به خارج نیترات از ریشه‌ها، ۲- جلوگیری از انتقال نیترات از ریشه به برگ‌ها و ۳- القای آسیمیلاسیون نیترات شد. از طرف دیگر سلنیم قادر است جذب برخی از عناصر کم‌مصرف مثل مولیبدن که به‌عنوان یک کوفاکتور برای آنزیم نیترات ردوکتاز عمل می‌کند را تغییر دهد (Dordas & Sioulas, 2008). تأثیر مثبت کاربرد سلنیم بر کاهش تجمع نیترات در کاهو (Rios et al., 2008, 2010; Ramos et al., 2010; Lei

References

1. Amerian, M., Dashti, F., & Delshad, M. (2018). Effects of different levels of selenium and nitrogen on some growth and biochemical characteristics of onion (*Allium cepa* L.) plant. *Journal of Plant Production Research*, 25(1), 119-135. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jopp.2018.12032.2101>
2. Aslam, M., Harbit, K.B., & Huffaker, R. (1990). Comparative effects of selenium and selenate on nitrate assimilation in barley seedlings. *Plant, Cell and Environment*, 13(8), 773-782. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1990.tb01093.x>
3. Bazl, S., Dashti, F., & Delshad, M. (2017). Effects of different levels of sulfur and selenium on some morphological and antioxidant properties of onion (*Allium cepa* L.) cv. Germez Azarshahr. *Iranian Journal of Horticultural*

- Science, 48(3), 623-633. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2017.218315.1108>
4. Bian, Z., Bo, L., Cheng, R., Yu, W., Tao, L., & Yang, Q. (2020). Selenium distribution and nitrate metabolism in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.): Effects of selenium forms and light spectra. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(1), 133-144. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62775-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62775-9)
5. Cataldo, D., Maroon, M., Schrader, L.E., & Youngs, V.L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71-80. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>
6. Chen, T.F., Zheng, W.J., Wong, Y.S., & Yang, F. (2008). Selenium-induced changes in activities of antioxidant enzymes and content of photosynthetic pigments in *Spirulina platensis*. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(1), 40-48. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00600.x>
7. Domingues, D.S., Takahashi, H.W., Camara, C.A.P., & Nixdorf, S.L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84(1), 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
8. Dordas, C.A., & Sioulas, C. (2008). Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis, and water use efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions. *Industrial Crops and Products*, 27(1), 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.020>
9. Hajiboland, R., & Keivanfar, N., (2012). Selenium supplementation stimulates vegetative and reproductive growth in canola (*Brassica napus* L.) plants. *Acta Agriculturae Slovenica*, 99(1), 13-19. <https://doi.org/10.14720/aas.2012.99.1.14515>
10. Hawrylak-Nowak, B. (2008a). Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants. *Journal of Elementology*, 13(4), 513-519.
11. Hawrylak-Nowak, B. (2008b). Enhanced selenium content in sweet basil (*Ocimum basilicum*) by foliar fertilization. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 69(1), 63-72. <https://doi.org/10.2478/v10032-008-0021-4>
12. Hawrylak-Nowak, B. (2013). Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions. *Plant Growth Regulation*, 70(1), 149-157. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9788-5>
13. Hawrylak, B., Matraszek, R., & Szymanska, M. (2007). Response of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to selenium in nutrient solution contaminated with nickel. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 67(1), 63-70. <https://doi.org/10.2478/v10032-007-0031-7>
14. Jalali, M., & Salehi Chegeni, N. (2020). The positive effect of selenium on nitrate accumulation in spinach (*Spinacia oleracea* L.) and lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Horticultural Science*, 34(2), 321-334. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v34i2.85540>
15. Kapolna, E., & Fodor, P. (2006). Speciation analysis of selenium enriched green onions (*Allium fistulosum*). *Microchemical Journal*, 84(1-2), 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2006.04.014>
16. Khademi Astaneh, R., Tabatabaie, S.J., & Bolandnazar, S.A. (2015). The effect of different concentrations of Se on yield and physiological characteristics of brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. Gemmifera). *Journal of Horticultural Science*, 28(4), 535-543. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.22780>
17. Lee, M.J., Lee, G.P., & Park, K.W. (2001). Effects of selenium on growth and quality in hydroponically-grown Korean mint (*Agastache rugosa*). *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 42(5), 483-486.
18. Lei, B., Bian, Z.H., Yang, Q.C., Wang, J., Cheng, R.F., Li, K., Liu, W.K., Zhang, Y., Fang, H., & Tong, Y.X. (2018). The positive function of selenium supplementation on reducing nitrate accumulation in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 17(4), 837-846. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63784-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63784-X)
19. Longchamp, M., Angeli, N., & Castrec-Rouelle, M. (2013). Selenium uptake in *Zea mays* supplied with selenate or selenite under hydroponic conditions. *Plant and Soil*, 362(1/2), 107-117. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1259-7>
20. Malik, J.A., Kumar, S., Thakur, P., Sharma, S., Kau Raman Preet, N., Kaur, D.P., Bhandhari, K., Kaushal, N., Singh, K., Srivastav, A., & Nayyar, H. (2010). Promotion of growth in mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) by selenium is associated with stimulation of carbohydrate metabolism. *Biological Trace Element Research*, 143(1), 530-539. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8872-1>
21. Malorgio, F., Diaz, K., & Ferrante, A. (2009). Effects of selenium addition on minimally processed leafy vegetables grown in a floating system. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(13), 2243-2251. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3714>
22. Maneetong, S., Chookhampaeng, S., Chantiratikul, A., Chinrasri, O., Thosaikham, W., Sittipout, R., & Chantiratikul, P. (2013). Hydroponic cultivation of selenium-enriched kale (*Brassica oleracea* var. *alboglabra* L.) seedling and speciation of selenium with HPLC-ICP-MS. *Microchemical Journal*, 108(1), 87-91. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.01.003>
23. Manzocco, L., Foschia, M., Tomasi, N., Maifreni, M., Dalla-Costa, L., Marino, M., Cortella, G., & Cesco, S. (2011). Influence of hydroponic and soil cultivation on quality and shelf life of ready-to-eat lamb's lettuce (*Valerianella*

- locusta* L. Laterr). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(8), 1373-1380. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4313>
24. Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.
25. Marsic, N.K., & Osvald, J. (2002). Effects of different nitrogen levels on lettuce growth and nitrate accumulation in iceberg lettuce (*Lactuca sativa* var. *Capitata*) grown hydroponically under greenhouse conditions. *Gartenbauwissenschaft*, 67(4), 128-134.
26. Pennanen, A., Xue, T.L., & Hartikainen, H. (2002). Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. *Journal of Applied Botany*, 76(1-2), 66-76.
27. Ramos, S., Faquin, V., Guilherme, L., Castro, E., Ávila, F., Carvalho, G., Bastos, C., & Oliveira, C. (2010). Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant, Soil and Environment*, 56(12), 584-588. <https://doi.org/10.17221/113/2010-PSE>
28. Rios, J.J., Blasco, B., Cervilla, L.M., Rosales, M.A., Sanchez-Rodriguez, E., Romero, L., & Ruiz, J.M. (2010). Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(11), 1914-1919. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4032>
29. Rios, J.J., Rosales, M.A., Blasco, B., Cervilla, L.M., Romero, L., & Ruiz, J.M. (2008). Biofortification of Se and induction of the antioxidant capacity in lettuce plants. *Scientia Horticulturae*, 116(3), 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.01.008>
30. Risch H.A., Jain M., Choi N.W., Fodor J.G., Pfeiffer C.J., Howe G.R., Harrison L.W., Craib K.J.P., & Miller A.B. (1985). Dietary factors and the incidence of cancer of the stomach. *American Journal of Epidemiology*, 122(6), 947-949. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114199>
31. Ruiz, J.M., Rivero, R.M., & Romero, L. (2017). Comparative effect of Al, Se, and Mo toxicity on NO₃⁻ assimilation in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. *Journal of Environmental Management*, 83(2), 207-212. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.03.001>
32. Saffar Yazdi, A., Lahouti, M., & Ganjeali, A. (2012). The effects of different selenium concentrations on some morpho-physiological characteristics of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Horticultural Science*, 26(3), 292-300. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.15211>
33. Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: toxicity content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(1), 10-17. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2351>
34. Sharma, S., Bansal, A., Dhillon, S.K., & Dhillon, K.S. (2010). Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil*, 329(1-2), 339-348. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0162-3>
35. Tomasi, N., Pinton, R., Gottardi, S., Mimmo, T., Scampicchio, M., & Cesco, S. (2015). Selenium fortification of hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta*). *Crop and Pasture Science*, 66(11), 1128-1136. <https://doi.org/10.1071/CP14218>
36. Sun, H.W., Ha, J., Liang, S.X., & Kang, W.J. (2010). Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(10), 1195-1204. <https://doi.org/10.1080/00103621003721395>
37. US Department of Agriculture. (2001). Dietary reference intakes: elements. Available at [http://www.iom.edu/Global/News Announcements/~media/48FAAA2FD9E74D95BBDA2236E7387B49.ashx](http://www.iom.edu/Global/News%20Announcements/~media/48FAAA2FD9E74D95BBDA2236E7387B49.ashx)
38. Van-der-Lugt, G., Holwerda, H.T., Hora, K., Bugter, M., Hardeman, J., & deVries, P. (2020). Nutrient Solutions for Greenhouse Crops. *Geerten*, 4, 1-98.

The Effect of Different Tillage Methods and Application of Plant Residues on Yield, Protein and Nitrogen Percentage of Triticale Plant (*X Triticosecale* Wittmack) and Physical and Chemical Indicators of Soil

S. Hosseinzadeh¹, E. Fateh^{2*}, A. Ayneband³, M. Farzaneh⁴, J. Habibi Asl⁵

1, 2, 3 and 4- Ph.D. Student of Agroecology, Associate Professor, Professor and Assistant Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetic, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: e.fateh@scu.ac.ir)

5- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Ahvaz, Iran

Received: 08-05-2024	How to cite this article: Hosseinzadeh, S., Fateh, F., Ayneband, A., Farzaneh, M., & Habibi Asl, J. (2025). The effect of different tillage methods and application of plant residues on yield, protein and nitrogen percentage of triticale plant (<i>X Triticosecale</i> Wittmack) and physical and chemical indicators of soil. <i>Journal of Water and Soil</i> , 38(6), 713-732. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2025.89709.1433
Revised: 09-12-2024	
Accepted: 01-01-2024	
Available Online: 01-01-2024	

Introduction

Tillage is an important component of soil management that affects the production of crops. Maintaining and improving the quality of the soil is a basic requirement to ensure the sustainability of the ecosystem. This experiment was conducted in order to investigate the effect of different tillage methods and the use of plant residues on the yield, protein and nitrogen percentage of triticale plant and physical and chemical indicators of the soil.

Materials and Methods

The experiment was carried out as split plots based on a randomized complete block design with three replications at Shahid Chamran University of Ahvaz during 2023-2024. The main factor including different methods of tillage at three levels (conventional tillage, reduced tillage and no tillage) and the sub factor also including 5 levels of plant residue application (without residues (control), wheat residues, mung bean, sesame and half of wheat residues + half of residues Mung bean) were considered. The amount of residues used for each plot was approximately 30% of the biological yield of the product, which was considered to be 3, 1.5 and 1 ton.ha⁻¹ for wheat, sesame and mung bean, respectively. At the end of the experiment yield and yield components, seed nitrogen and protein of triticale plant and physical characteristics (bulk density, percentage of porosity) and chemical (pH, EC, organic carbon content, nitrogen) soil properties were measured. All statistical calculations were made using SAS 9.3 statistical software and for the LSD test was used to compare the means at a probability level of 5%.

Results and Discussion

The interaction of tillage treatments and the use of plant residues showed that the highest grain yield was equal to 8.6 ton.ha⁻¹ from the treatment of reduced tillage and the use of Mung bean residues, and the lowest value obtained was related to the effect of the treatment conventional tillage and no residues (control) with 3.5 ton.ha⁻¹. The grain yield in the reduced tillage method was 12.5% and 7.6% higher than the conventional tillage and no tillage methods. The reduced tillage method resulted in a 32.2% increase in seed protein and a 32% increase in



seed nitrogen compared to conventional tillage. The results also indicated a significant interaction effect between tillage treatments and residue application on grain yield ($p < 0.01$). Additionally, the interaction between tillage and residue application had a significant effect on soil bulk density ($p < 0.01$). The lowest bulk density (1.3 g.cm^{-3}) was observed in the conventional tillage treatment combined with wheat and mung bean residues, with this combination falling within the same statistical group. The highest bulk density (1.75 g.cm^{-3}) was obtained from the no-tillage treatment and the use of NO residues (Control). Based on the obtained results, the interaction effect of tillage treatments and the use of residues on soil organic matter, soil organic carbon and nitrogen soil ($p < 0.05$). The interaction between the effects of tillage and the use of residues showed that the highest soil organic matter (1.53%) was from the treatment of reduced and the use of wheat residues.

Conclusion

The results showed that tillage methods and the use of plant residues, in addition to affecting the percentage of nitrogen and protein of triticale seeds, also affected the physical and chemical indicators of the soil. The changes related to the physical and chemical indicators of the soil in the method No tillage are more than the two methods of reduced tillage and conventional tillage, and the improvement of these characteristics has been limited even at this time. Overall, from the point of view of soil protection, the results of this experiment clearly show the superiority of conservation tillage methods compared to conventional tillage methods. Sustainable agriculture aims to achieve optimal yields while preserving environmental structure and minimizing the adverse impacts of agricultural activities. One of the key challenges in sustainable agriculture is the lack of organic matter and its associated consequences. Implementing conservation tillage and managing plant residues-critical elements of agricultural production-can help address this issue. By improving soil quality, these practices contribute to increased productivity in farming.

Acknowledgement

We would like to thank the Research and Technology Vice-Chancellor of Shahid Chamran University of Ahvaz for funding this research, which is part of the research contract SCU.AA1400.309.

Keywords: Organic matter, Organic carbon content, Soil fertility, Soil health, Sustainable agriculture

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۳، ص. ۷۳۲-۷۱۳

تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و کاربرد بقایای گیاهی بر عملکرد، درصد پروتئین و نیتروژن گیاه تریتیکاله (*X Triticosecale* Wittmack) و شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

سهیلا حسین‌زاده^۱ - اسفندیار فاتح^{۲*} - امیر آینه‌بند^۳ - معصومه فرزانه^۴ - جعفر حبیبی اصل^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

چکیده

خاک‌ورزی جزء مهمی از مدیریت خاک محسوب می‌شود که بر تولید گیاهان زراعی تأثیر می‌گذارد. این پژوهش به منظور بررسی تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی و کاربرد بقایای گیاهی بر درصد پروتئین و نیتروژن گیاه تریتیکاله و شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه آموزشی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه شهید چمران اهواز در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا گردید. فاکتور اصلی، شامل روش‌های خاک‌ورزی در سه سطح (خاک‌ورزی مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی) و فاکتور فرعی نیز شامل ۵ سطح کاربرد بقایای گیاهی (بدون کاربرد یا افزودن بقایا (شاهد)، بقایای گندم، لوبیا چشم بلبلی، کنجد و نصف بقایای گندم + نصف بقایای لوبیا چشم بلبلی) بود. ملاک انتخاب بقایا کشت رایج منطقه و میزان بقایای مورد استفاده برای هر کرت، تقریباً ۳۰٪ عملکرد کاه و کلش و بیولوژیک محصول بود که بر این اساس برای گندم، کنجد و لوبیا چشم بلبلی به ترتیب ۳، ۱/۵ و ۱ تن در هکتار در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد عملکرد دانه در روش کم‌خاک‌ورزی ۱۲/۵ درصد و ۷/۶ درصد بیشتر از روش‌های مرسوم و بی‌خاک‌ورزی بود. همچنین روش کم‌خاک‌ورزی ۳۲/۲ درصد افزایش پروتئین دانه و ۳۲ درصد افزایش نیتروژن دانه نسبت به روش خاک‌ورزی مرسوم نشان داد، نتایج نشان داد اثر متقابل تیمارهای خاک‌ورزی و کاربرد بقایا بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد. همچنین اثر متقابل خاک‌ورزی و کاربرد بقایا بر صفت جرم مخصوص ظاهری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار و بر روی صفت ماده آلی و کربن آلی و نیتروژن خاک در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. نتایج نشان داد، بیشترین ماده آلی خاک (۱/۵۳ درصد) از تیمار کم‌خاک‌ورزی و با کاربرد بقایای گندم بود. با توجه به اینکه اهداف کشاورزی پایدار در راستای تولید عملکرد مطلوب و در عین حال حفظ ساختار محیط و کمینه‌سازی پیامدهای منفی فعالیت‌های کشاورزی بوده و کمبود مواد آلی و تبعات آن یکی از مشکلات اصلی در کشاورزی پایدار می‌باشد، اجرای خاک‌ورزی حفاظتی و مدیریت بقایای گیاهی که یکی از ارکان اصلی تولید در کشاورزی است با بهبود کیفیت خاک، افزایش بهره‌وری در تولید را در پی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: حاصل‌خیزی خاک، سلامت خاک، کشاورزی پایدار، ماده آلی، محتوی کربن آلی

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، دانشیار، استاد و استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

*- نویسنده مسئول (Email: e.fateh@scu.ac.ir)

۵- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.89709.1433>

مقدمه

خاک به عنوان یکی از مهم ترین ارکان طبیعت و عوامل تولید به شمار می رود که تجدیدنپذیر بوده و زندگی بشر به آن وابسته است (Arriaga et al., 2017). به دلیل افزایش شدید جمعیت کره ی زمین، بشر به منظور تأمین تقاضای جمعیت جوامع خود، فشار زیادی به خاک وارد نموده است که فرسایش، آلودگی و تخریب خاک و کاهش کیفیت آن را به همراه داشته است (O'Brien & Daigh, 2019). در حال حاضر، خاک های قابل کشت به دلیل شیوه های کشت ناپایدار در معرض تهدیدات قابل توجهی قرار دارند و مدیریت پایدار و محتاطانه خاک به منظور دستیابی به تولید کشاورزی پایدار امری ضروری و اجتناب ناپذیر است (Houshyar & Esmailpour, 2020). خاک به عنوان بستر کشت گیاهان و مخزن عناصر غذایی معدنی، مهم ترین عامل تولید گیاهان می باشد و حفظ کیفیت آن برای تولید پایدار محصولات کشاورزی ضروری است (Castellini & Domenico, 2012). مصرف بی رویه سموم و کودهای شیمیایی در کشاورزی بر روی محیط زیست و به ویژه سلامت انسان ها اثر گذاشته و آلودگی منابع آب، خاک و غذا را به دنبال دارد. این مسئله موجب گردیده تا صاحب نظران توسعه پایدار، مصرف انرژی در کشاورزی را به عنوان یکی از چالش های مهم تهدید کننده محیط زیست مورد توجه قرار دهند، مصرف انرژی در تولید محصولات زراعی و باغی رابطه مستقیمی با سیستم های خاک ورزی کشاورزی دارد (Bahrami, 2019). از آنجا که عملیات خاک ورزی که یکی از اجزای اصلی سیستم های تولیدات کشاورزی است، با اثرات سودمند بر خصوصیات زیستی، فیزیکی و شیمیایی خاک می تواند تأثیر مثبت بر تولید محصولات زراعی داشته باشد، بنابراین باید بر سیستم های خاک ورزی و تأثیرات آنها بر سلامت خاک تمرکز شود. شدت خاک ورزی می تواند تا حد زیادی بر خصوصیات خاک و عملکرد گیاه تأثیر بگذارد. این امر به ویژه در خاک هایی که مواد آلی کمی دارند، بسیار مهم می باشد (Nouraein et al., 2019).

فشار بر اراضی کشاورزی برای برداشت حداکثر سود، بدون توجه به برگرداندن حداقل مواد آلی برای پایداری فیزیکی و شیمیایی خاک، سبب کاهش ماده آلی در خاک ها و در نتیجه کاهش باروری خاک می شود که این موضوع در اکثر مناطق، مشکل اصلی خاک های کشور می باشد (Asadi et al., 2016). امروزه به دلیل به مخاطره افتادن پایداری سیستم های تولید کشاورزی و نیز افزایش هزینه های تولید، خاک ورزی حفاظتی که نوعی روش مدیریتی بوم نظام های کشاورزی در جهت بهره وری، پایداری و نیز بالا بردن منافع و امنیت غذایی و در عین حال، حفاظت منابع و محیط است، مطرح شده است (Sharma, Thind, Sidhu, Jat & Parihar, 2019).

از آن جمله می توان به خاک ورزی حفاظتی (Zhang et al., 2015)، حفظ و کاربرد بقایای گیاهی (Devi, Gupta, Jat, & Parmar, 2017)، کاربرد کود دامی و آیش زمین های کشاورزی (Liu, Chang, Stoorvogel, Verburg & Sun, 2012) در جهت تبدیل شیوه های متداول کشاورزی به حفاظتی اشاره کرد. حداقل بهم خوردگی مکانیکی خاک، پوشش دائمی خاک با مواد آلی و تنوع گیاهی، سه اصل اساسی کشاورزی حفاظتی می باشد.

کشاورزی حفاظتی از طریق مدیریت تلفیقی منابع بیولوژیکی، آب و خاک در ترکیب با ورودی های خارجی به حفظ، بهبود و استفاده مؤثرتر از منابع طبیعی کمک می کند. بنابراین نوع خاک ورزی و استفاده از بقایای موجود در سطح خاک از مهمترین عوامل موفقیت در کشاورزی به شمار می آید که هر دو این عوامل بر کمیت و کیفیت عملکرد گیاهان زراعی تأثیر بسزایی دارند.

در این راستا شیوه های مدیریتی مختلفی برای حفظ سلامت و کیفیت خاک ایجاد شده است. تکنیک های خاک ورزی حفاظتی شامل روش های مختلفی مانند بی خاک ورزی و کم خاک ورزی می باشد. از جمله مزایای خاک ورزی حفاظتی، جلوگیری از فشردن لایه سطحی خاک، جلوگیری از تبخیر، حفظ و نگهداری رطوبت خاک، افزایش مقدار مواد آلی (Cooper et al., 2020)، جلوگیری از فرسایش در اراضی دیم، کاهش هزینه ها، کاهش مصرف سوخت و احیاء اراضی کم بازده را می توان بیان کرد (Zhang, Wang, Fu, & Zhao, 2018) که با بهبود ساختمان خاک (Verhulst, 2010)، تأمین ذخیره مواد غذایی و افزایش دسترسی به عناصر غذایی، جلوگیری از فرسایش خاک و افزایش نفوذپذیری (Hobbs, Sayre & Gupta, 2008) وضعیت خاک را از نظر فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک بهبود می بخشد.

ماده آلی خاک تنها منبع کربن و انرژی لازم برای ادامه فعالیت ریز جانداران تجزیه کننده و هتروتروف خاک است و هر گونه کاهش در ورود مواد آلی به خاک موجب اختلال در فعالیت این موجودات و کاهش تجزیه مواد آلی می شود. ماده آلی با افزایش پایداری خاکدانه ها به خصوص در قسمت سطحی خاک، مانع از پراکندگی ذرات خاک در طی وزش باد و جریان یافتن آب می شود (Nunes et al., 2018). اردل و بریک (Erdel & Barik, 2023) گزارش دادند که استفاده از بقایای گیاهی و روش های خاک ورزی حفاظتی باعث افزایش ماده آلی، پایداری خاکدانه ها و فسفر قابل دسترس گیاه شد. فینک و همکاران (Fink et al., 2016) در بررسی اثر سه ساله خاک ورزی حفاظتی و خاک ورزی مرسوم بر جذب و رهاسازی فسفر در خاک های زراعی برزیل گزارش کردند که روش خاک ورزی مرسوم نسبت به بی خاک ورزی در پایان سال سوم سبب افزایش جذب و رهاسازی فسفر به میزان ۶ درصد شد. آنها معتقدند اعمال خاک ورزی حفاظتی

شیمیایی خاک در شرایط آب و هوایی اهواز، انجام گردید.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی روش‌های خاک‌ورزی بر عملکرد و درصد نیتروژن و پروتئین دانه گیاه تریتیکاله و شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، یک آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فاکتور اصلی روش‌های مختلف خاک‌ورزی در سه سطح شامل (T1: خاک‌ورزی مرسوم، T2: کم‌خاک‌ورزی و T3: بی‌خاک‌ورزی) و فاکتور فرعی کاربرد بقایای گیاهی در پنج سطح شامل (M1: شاهد (بدون کاربرد یا افزودن بقایای گیاهی)، M2: کاربرد بقایای گندم، M3: کاربرد بقایای لوبیا چشم‌بلبلی، M4: کاربرد بقایای کنجد و M5: کاربرد نصف بقایای گندم + نصف بقایای لوبیا چشم‌بلبلی) بود. کشت قبلی گندم بود که تمامی بقایا قبل از انجام تهیه زمین و اجرای نقشه کشت از سطح مزرعه آزمایشی جمع‌آوری شد. بقایای مورد استفاده در طرح آزمایشی با توجه به زمان برداشت هر کدام از آنها از سطح مزارع استان جمع‌آوری و میزان بقایای در نظر گرفته برای هر کرت، تقریباً ۳۰٪ عملکرد کاه و کلش و بیولوژیک محصول بوده که بر این اساس برای گندم، کنجد و لوبیا چشم‌بلبلی به‌ترتیب ۳، ۱/۵ و ۱ تن در هکتار می‌باشد. با توجه به مساحت هر کرت فرعی که ۶ متر مربع بود، به‌ترتیب مقادیر ۱۸۰۰، ۹۰۰ و ۶۰۰ گرم از بقایای مورد نظر استفاده شد. از نظر نحوه کاربرد بقایا در زمان تهیه کرت‌های فرعی با توجه به نقشه کشت بقایای مورد نظر به‌صورت پاییل با خاک مخلوط شدند، جهت اعمال تیمار خاک‌ورزی مرسوم از گاوآهن برگردان‌دار به همراه دو دیسک و ماله استفاده شد. در تیمار کم‌خاک‌ورزی فقط از دو بار دیسک استفاده گردید و در تیمار بی‌خاک‌ورزی کشت مستقیم بذر بدون هیچ‌گونه عملیات خاک‌ورزی انجام شد. رقم تریتیکاله کاشته شده رقم، سناباد بود. بذر رقم مورد نظر از مؤسسه بذر و نهال کرج تهیه و در تاریخ ۲۸ آبان ۱۴۰۲ با توجه به نقشه کشت، عملیات کاشت تریتیکاله با استفاده از دست و به میزان ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار برای هر کرت محاسبه و انجام پذیرفت. هر تیمار در ۳ تکرار و هر تکرار شامل ۱۵ واحد آزمایشی بود که در مجموع تعداد ۴۵ کرت در نظر گرفته شد. نیازهای کودی خاک با توجه به نتایج آزمون خاک و دستورالعمل فنی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان (۱۳۸۶) تأمین شد (جدول ۱). از نظر میزان کود مصرفی تمامی کود فسفات (حدود ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل) و پتاس (حدود ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم) و یک سوم کود اوره (نیترات آمونیوم به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) در زمان کاشت به‌عنوان کود پایه و مابقی کود اوره در دو مرحله (پتجه‌زنی

سبب غنی شدن مواد آلی خاک می‌شود و مواد آلی با فسفر پیوند برقرار کرده و فراهمی زیستی فسفر در خاک افزایش یافته و از هدرروی فسفر جلوگیری می‌کند.

افزایی گروه و همکاران (Afzali Groh et al., 2018) تأثیر خاک‌ورزی حفاظتی و مدیریت بقایای گندم بر برخی خصوصیات خاک و عملکرد ذرت را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که استفاده از سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی و مدیریت بقایای گندم باعث تغییر در مقدار یا درصد کربن آلی خاک در طی آزمایش شد. به‌طوری‌که کربن آلی خاک در سال سوم نسبت به سال اول به‌ترتیب، ۱۳، ۱۹ و ۱۹ درصد افزایش نشان داد، همچنین کم‌خاک‌ورزی با چیزل پکر در سال سوم آزمایش با حفظ ۷۵ درصد بقایا، باعث افزایش ۸ درصدی کربن آلی خاک گردید.

میرزاوند (Mirzavand, 2018) با بررسی تغییرات ماده‌آلی خاک و میزان عملکرد محصول در دو سامانه خاک‌ورزی حفاظتی و مرسوم با اجرای تناوب گندم-ذرت در منطقه زرقان فارس گزارش داد که حفظ بقایای گیاهی، ضمن بهبود درصد ماده‌آلی خاک نقش مثبتی نیز در حفظ پتانسیل عملکرد محصول دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که حفظ بقایای گیاهی در تمام سامانه‌های خاک‌ورزی مورد ارزیابی، ضمن بهبود درصد ماده‌آلی خاک نقش مثبتی نیز در حفظ پتانسیل عملکرد محصول دارد. به‌طور کلی و با توجه به اینکه حفظ بقایای گیاهی موجب افزایش درصد ماده آلی خاک می‌شود، این کاربرد توصیه شده است. در ایران به علت رعایت نکردن تناوب، انجام کشت‌های متراکم تک محصولی، عدم مدیریت صحیح ماده آلی و خاک‌ورزی شدید در هنگام کاشت محصول، بیشتر خاک‌های کشاورزی احتمالاً فاقد ساختمان مناسب و دچار نوعی فشردگی است. بنابراین تغییر روش خاک‌ورزی از روش‌های مرسوم به روش‌های حفاظتی اجتناب‌ناپذیر است. در خاک‌ورزی حفاظتی با کم کردن عملیات خاک‌ورزی و حفظ مقدار کافی بقایای گیاهی در سطح خاک، ضمن بهبود ساختمان خاک و افزایش راندمان آب، نیروی کار، انرژی مصرفی و هزینه تولید کاهش می‌یابد. نظر به اهمیت حفظ منابع تولید به‌ویژه خاک در طول مراحل تولید پایدار محصول، مدیریت بقایای گیاهی و کاهش شدت خاک‌ورزی به ضرورت احساس می‌شود. بنابراین با توجه مطالب ذکر شده و در راستای تأمین عناصر غذایی و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی، توجه جدی به حفظ کیفیت خاک بعنوان مولفه اصلی در کشاورزی پایدار و با فرض اینکه مدیریت خاک‌ورزی و بقایای گیاهی، عملکرد و اجزای عملکرد تریتیکاله را تحت‌تأثیر قرار خواهد داد و بقایای اعمال شده در مقدار ماده آلی خاک مؤثر بوده و انجام عملیات خاک‌ورزی حفاظتی و مدیریت بقایای گیاهی می‌تواند موجب افزایش محتوی ماده آلی خاک و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گردد این آزمایش با هدف بررسی تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی و کاربرد بقایای گیاهی بر ویژگی‌های فیزیکی

خاک به روش اولسون (۱۹۵۴) و قرائت با دستگاه اسپکتوفتومتر، اندازه گیری پتاسیم قابل جذب خاک از روش جکسون و قرائت با دستگاه فلم فتومتر، تعیین محتوای کربن آلی خاک از روش اکسایش با دی کرومات (Walkly & Black, 1934)، محاسبه ماده آلی خاک از معادله زیرصورت که با استفاده از کربن آلی، میزان ماده آلی محاسبه شد. در این فرمول، عدد ۱/۷۲۴ به این علت است که ۵۸ درصد مواد آلی از کربن آلی تشکیل می شوند.

$$\%OM = 1.724 \times \%OC$$

جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و پارافین، وزن مخصوص حقیقی خاک به روش استوانه مدرج، در صد تخلخل خاک نیز از معادله زیر محاسبه شد (Bay Bordi, 1993).

$$F = (1 - BD/SD) \times 100$$

در این رابطه F درصد تخلخل خاک، BD جرم مخصوص ظاهری خاک و واحد آن گرم بر سانتی متر مکعب، و SD جرم مخصوص حقیقی خاک و واحد آن گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. تعیین میزان نیتروژن خاک و دانه با استفاده از روش هضم تر با دستگاه کج لال انجام و میزان پروتئین دانه به صورت درصد نیتروژن در ماده خشک دانه ضرب در ضریب ثابت ۵/۸ محاسبه گردید.

کلیه محاسبات آماری با استفاده از نرم افزار آماری SAS 9.3 انجام و برای مقایسه میانگین ها هم از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید.

نتایج و بحث

عملکرد دانه

عملکرد دانه تریتیکاله به طور معنی داری ($p \leq 0.01$) تحت تأثیر تیمارهای مختلف خاک ورزی، بقایا و برهم کنش اثرات خاک ورزی و کاربرد بقایا قرار گرفت (جدول ۲). بررسی برهم کنش اثرات خاک ورزی و کاربرد بقایا نیز نشان داد بیشترین عملکرد دانه (۸/۶ تن در هکتار) مربوط به تیمار کم خاک ورزی با کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی و کمترین عملکرد (۵ تن در هکتار) از تیمار بی خاک ورزی و عدم کاربرد بقایا (شاهد) به دست آمد (جدول ۴ شکل ۱).

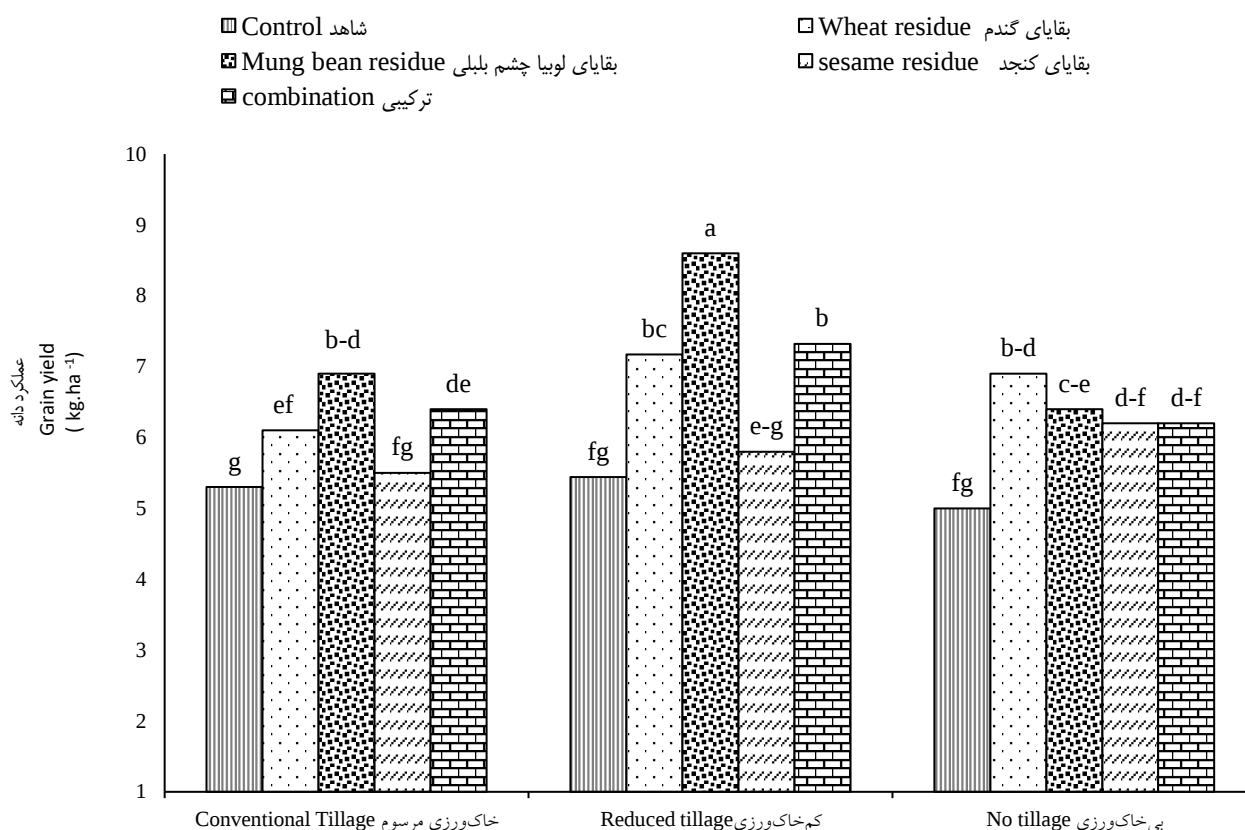
و اوایل گلدهی) به صورت سرک (هر مرحله ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) با دست در مزرعه پخش و دو مرحله نیز از کود کم مصرف هومو کسال ۹۵٪ مولتی کم که یکی از کودهای با اهمیت در بخش مصرف در گیاهان بوده و در واقع از ترکیبات فعال مواد آلی خاک می باشد (Sanchez Sanchez et al., 2006) که نوعی ترکیب پلیمری طبیعی به همراه مواد آلی است و در اثر پوسیدگی مواد آلی خاک، پیت، لیگنین و غیره به وجود می آید. اسید هیومیک، مخلوط متراکم و ترکیب با اسیدهای آلی آروماتیک بوده و دارای نیتروژن، فسفر، گوگرد با درصدهای مختلف و برخی عناصر نظیر کلسیم، منیزیم، روی، مس و غیره است و به صورت محلول پاشی و نیز خاک کاربرد استفاده می شود (Ahmad-Mayi, 2014) تهیه این کود از شرکت توسعه و بهبود نهاده های کشاورزی پارس یزد به عنوان واردکننده این کود کم مصرف بود و به صورت محلول پاشی همراه آب آبیاری (به میزان یک کیلوگرم در هکتار) در کرت ها استفاده شد. این کود کم مصرف شامل ۴۸٪ اسید هیومیک و ۲۵٪ اسید فولویک و عناصر کم مصرف روی، منگنز، بور و مس بصورت کلات کاملاً پایدار و محلول در آب می باشد.

سایر عملیات زراعی شامل آبیاری کرتی و وجین علف های هرز بطور یکسان برای تمامی کرت ها اعمال شد. همچنین در طول اجرای آزمایش از هیچ گونه کود شیمیایی، علفکش و یا آفت کش شیمیایی استفاده نشد. در پایان اجرای آزمایش عملکرد و نیتروژن و پروتئین دانه گیاه تریتیکاله و خصوصیات فیزیکی (جرم مخصوص ظاهری، حقیقی، درصد تخلخل) و شیمیایی (pH، قابلیت قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن) خاک محاسبه شد، در زمان برداشت که در ۱۴ اردیبهشت ۱۴۰۳ و به صورت یکسان برای کلیه تکرارها صورت گرفت، بوته های تریتیکاله از مساحت یک متر مربع با در نظر گرفتن اثر حاشیه ای با داس بریده و برداشت شدند. در این پژوهش بافت خاک به روش هیدرومتری براساس قانون استوکس با ۵ قرائت، تعیین pH در عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه pH متر و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع خاک با استفاده از دستگاه EC متر (Page et al., 1982)، اندازه گیری فسفر قابل جذب

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک محل آزمایش قبل از کاشت

Table 1- Soil analysis results of the test site before planting

عمق خاک Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	نیتروژن کل Total N (%)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	ماده آلی Organic matter (%)
0-30	رسی لومی Loamy clay	0.1	14.4	144	7.8	1.24	0.3



شکل ۱- مقایسه میانگین برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر عملکرد دانه

Figure 1- Comparison of the average interaction between the effects of tillage and residue spreading on grain yield

به علت شرایط مطلوب ایجاد شده در این روش خاک‌ورزی و به تبع آن بهبود حفاظت از آب و حفظ رطوبت مطلوب، جرم مخصوص ظاهری کمتر، تجمع بهتر میکروارگانیزم‌های مفید خاک در ناحیه ریشه و بازیافت مؤثرتر عناصر غذایی به دلیل افزایش کربن آلی خاک بهبود می‌بخشد که با نتایج حاصل از این آزمایش همخوانی دارد. نتایج ضد و نقیض دیگری نیز در پژوهش‌های مختلف در خصوص تأثیر روش‌های حفاظتی گزارش شده است، اسنسو و همکاران (Asenso *et al.*, 2018) اثر روش‌های خاک‌ورزی بر خواص شیمیایی خاک و عملکرد ذرت در جنوب چین را در طی سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند و گزارش نمودند عملکرد ذرت در روش بی‌خاک‌ورزی نسبت به روش‌های دیگر کاهش یافت، بر اساس گزارش آن‌ها در طی دو سال آزمایش وزن هزار دانه، ماده خشک تولیدی، عملکرد دانه و شاخص برداشت در روش بی‌خاک‌ورزی نسبت به روش‌های دیگر کاهش یافت.

نتایج مقایسات میانگین نشان داد که بیشترین عملکرد دانه مربوط به تیمار کم‌خاک‌ورزی (۶/۸۶ تن در هکتار) و کمترین عملکرد دانه مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم (۶/۰۴ تن در هکتار) بود. عملکرد دانه در روش کم‌خاک‌ورزی به ترتیب ۱۲/۵ درصد و ۷/۶۳ درصد بیشتر از روش‌های خاک‌ورزی مرسوم و بی‌خاک‌ورزی بود. اثر اعمال کاربرد بقایا نشان داد که بیشترین عملکرد (۷/۳ تن در هکتار) از تیمار کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی و کمترین (۵/۴ تن در هکتار) از تیمار بدون کاربرد بقایا (شاهد) بدست آمد (جدول ۳).

نوع عملیات خاک‌ورزی بر نحوه تأثیر شخم بر رشد ریشه، میزان آب در دسترس و اندازه خاک‌دانه‌های لایه متراکم خاک و مصرف کودهای شیمیایی تأثیرگذار است. گوپتا و همکاران (Gupta *et al.*, 2016) در بررسی اثر متقابل مدیریت بقایای گیاهی و کوددهی فسفر بر روی عملکرد گندم و سلامت خاک با حفظ بقایای برنج-گندم گزارش نمودند حفظ بقایا عملکرد را در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی

جدول ۲- میانگین مربعات اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر عملکرد، درصد پروتئین و نیتروژن دانه گیاه تریتیکاله و شاخص‌های فیزیکی شیمیایی خاک

Table 2- Mean square of the effects of tillage and residue spreading on yield, protein and nitrogen percentage of triticale plant seeds and soil physical and chemical indicators

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی (df)	عملکرد دانه Seed yield	پروتئین دانه Seed protein	نیتروژن دانه Seed nitrogen	pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC	نیتروژن خاک Soil Nitrogen
تکرار Rep	2	2.3 *	9.7**	0.35**	0.21 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.0005*
خاک‌ورزی Tillage	2	2.6**	71.12**	2.55**	0.004 ^{ns}	0.14**	0.002**
خطای اصلی Ea	4	0.4	0.57	0.02	0.03	0.0055	0.0005
بقایا Residues	4	5.05**	4.1**	0.14*	0.004**	0.09**	0.001**
خاک‌ورزی × بقایا Tillage × Residues	8	0.9**	0.6 ^{ns}	0.023 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.00002*
خطای فرعی Eb	24	0.2	0.3	0.01	0.0003	0.003	0.00001
ضریب تغییرات C.V.(%)		7.06	4.31	4.39	0.22	3.5	3.7

S.O.V منابع تغییر	درجه آزادی (df)	کربن آلی خاک Soil organic carbon	کربن/نیتروژن خاک Soil carbon/nitrogen	جرم مخصوص ظاهری Bulk density	وزن مخصوص حقیقی Apparent density	درصد تخلخل Porosity percent	ماده آلی خاک Soil organic matter
تکرار Rep	2	0.001 ^{ns}	2.3*	0.09*	0.12*	8.8 ^{ns}	0.003 ^{ns}
خاک‌ورزی Tillage	2	0.09**	0.31*	0.54**	0.26**	312.7*	0.3**
خطای اصلی Ea	4	0.0002	0.3	0.005	0.01	18.5	0.0006
بقایا Residues	4	0.08**	7.9**	0.007**	0.03**	66.2**	0.24**
خاک‌ورزی × بقایا Tillage × Residues	8	0.0012*	0.05 ^{ns}	0.001**	0.005 ^{ns}	4.57 ^{ns}	0.004*
خطای فرعی Eb	24	0.0005	0.08	0.0001	0.003	3.6	0.001
ضریب تغییرات C.V.(%)		3.4	3.86	0.75	2.5	5.43	3.5

*, **, و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیرمعنی را نشان می‌دهند.

***, **, and ns indicate significance at five percent, one percent and no significance levels, respectively.

می‌گذارد. قاضی نژاد و همکاران (Ghazinejad et al., 2022) در بررسی اثر روش خاک‌ورزی و بقایای گندم بر بهره‌وری فیزیکی آب مصرفی و عملکرد ذرت دانه‌ای در منطقه دزفول اعلام کردند بیشترین عملکرد دانه ذرت در سامانه کم‌خاک‌ورزی و حفظ بقایا حاصل شد که نسبت به سامانه بی‌خاک‌ورزی منجر به افزایش ۳۴ درصدی عملکرد محصول شد. آنها گزارش دادند، استفاده و توسعه سامانه‌های کشت حفاظتی (به‌خصوص کم‌خاک‌ورزی) در ذرت می‌تواند به حفظ و سیانت از منابع تولید از قبیل آب، خاک و محیط‌زیست کمک نماید (Ghazinejad et al., 2022).

دو و افه (Du, Li & Effah, 2022) در بررسی اثرات مالچ کاه و کلش و کم‌خاک‌ورزی بر عملکرد در شرایط محیطی گانسو چین گزارش نمودند مالچ کاه و کلش می‌تواند محتوی مواد آلی خاک را افزایش داده و با حفظ رطوبت دمای خاک را تعدیل نموده ولی با این‌حال مستعد افزایش آفات و بیماری‌ها و تغییر ساختار جامعه میکروبی خاک گردد، آن‌ها بیان کردند کاربرد مالچ باعث افزایش عملکرد از طریق افزایش کارایی مصرف آب می‌گردد، کاهش خاک‌ورزی یکپارچگی خاک را حفظ نموده که منجر به حفاظت از آب و خاک می‌شود اما در عین حال بر عملکرد محصول تأثیر منفی

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر عملکرد، درصد پروتئین و نیتروژن دانه گیاه تربیتیکاله و شاخص‌های فیزیکی شیمیایی خاک

تیماها Treatments	عملکرد دانه Seed yield (ton.ha ⁻¹)	پروتئین دانه Seed protein (%)	نیتروژن دانه Seed nitrogen (%)	pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC(dS.m ⁻¹)	نیتروژن خاک Soil nitrogen(%)
Tillage خاک‌ورزی						
مرسوم Conventional	6.04 ^b	11.21 ^c	2.1 ^c	7.45 ^a	1.53 ^b	0.081 ^c
کم خاک‌ورزی Reduced tillage	6.86 ^a	15.54 ^a	2.9 ^a	7.46 ^a	1.58 ^b	0.01 ^a
بی خاک‌ورزی no tillage	6.27 ^{ab}	13.71 ^b	2.6 ^b	7.43 ^a	1.72 ^a	0.089 ^b
بقایا residues						
شاهد Control	5.44 ^c	12.6 ^c	2.38 ^c	7.47 ^a	1.45 ^d	0.07 ^e
بقایای گندم Wheat residue	6.74 ^b	13.4 ^b	2.56 ^b	7.45 ^b	1.71 ^a	0.09 ^c
بقایای لوبیا چشم بلبلی Mung bean residue	7.31 ^a	14.4 ^a	2.74 ^a	7.42 ^c	1.61 ^{bc}	0.1 ^a
بقایای کنجد sesame residue	5.82 ^c	13.2 ^b	2.5 ^b	7.47 ^a	1.67 ^{ab}	0.08 ^d
ترکیبی combination	6.63 ^b	13.7 ^b	2.59 ^b	7.43 ^c	1.59 ^c	0.09 ^b
تیماها Treatments	کربن آلی خاک Soil organic carbon(%)	کربن/نیتروژن خاک Soil carbon/nitrogen (%)	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (mg.m ⁻³)	جرم مخصوص حقیقی Apparent density (mg.m ⁻³)	تخلخل Porosity percent (%)	ماده آلی خاک Soil organic matter (%)
Tillage خاک‌ورزی						
مرسوم Conventional	0.60 ^c	7.58 ^a	1.34 ^c	2.2 ^a	39.2 ^a	1.03 ^c
کم خاک‌ورزی Reduced tillage	0.75 ^a	7.49 ^a	1.52 ^b	2.4 ^b	35.2 ^a	1.3 ^a
بی خاک‌ورزی no tillage	0.63 ^b	7.29 ^a	1.7 ^a	2.5 ^c	30.2 ^b	1.1 ^b
بقایا residues						
شاهد Control	0.54 ^e	7.28 ^b	1.57 ^a	2.25 ^c	30.21 ^c	0.93 ^e
بقایای گندم Wheat residue	0.78 ^a	8.83 ^a	1.49 ^d	2.33 ^b	36.12 ^{ab}	1.35 ^a
بقایای لوبیا چشم بلبلی Mung bean residue	0.65 ^c	6.19 ^c	1.52 ^c	2.4 ^a	36.9 ^a	1.12 ^c
بقایای کنجد sesame residue	0.62 ^d	7.55 ^b	1.53 ^b	2.35 ^{ab}	34.91 ^b	1.06 ^d
ترکیبی combination	0.72 ^b	7.41 ^b	1.52 ^c	2.38 ^{ab}	36.28 ^{ab}	1.25 ^b

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری در سطح پنج درصد بر مبنای آزمون LSD ندارند.

Averages with common letters in each column do not have a statistically significant difference at the five percent level based on LSD's test

نیتروژن و پروتئین دانه

بررسی نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر متقابل تیمارهای خاک‌ورزی و کاربرد بقایا بر نیتروژن دانه معنی‌دار نبوده ولی اثر هر کدام به تنهایی بر این صفت معنی‌دار بوده و در تیمار خاک‌ورزی در سطح احتمال یک درصد و در تیمار کاربرد بقایا در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۲). بررسی مقایسه میانگین روش‌های مختلف خاک‌ورزی افزایش ۳۲ درصدی نیتروژن دانه در روش

کم‌خاک‌ورزی نسبت به مرسوم و ۱۰/۹۱ درصدی نسبت به بی‌خاک‌ورزی را نشان داد، بر این اساس بیشترین نیتروژن دانه از تیمار کم‌خاک‌ورزی (۲/۹ درصد) و کمترین از تیمار خاک‌ورزی مرسوم (۲/۱ درصد) به‌دست آمد، همچنین بررسی مقایسه میانگین نوع کاربرد بقایا نشان داد بیشترین نیتروژن دانه از تیمار کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی (۲/۷۴ درصد) و کمترین (۲/۳۸ درصد) مربوط به تیمار عدم کاربرد بقایا (شاهد) می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر عملکرد، درصد پروتئین و نیتروژن دانه گیاه تریتیکاله و شاخص‌های فیزیکی شیمیایی خاک

Table 4- Comparison of the average interaction between the effects of tillage and residue spreading on yield, percentage of protein and nitrogen of triticale plant seeds and physical and chemical indicators of soil

خاک‌ورزی Tillage	کاربرد بقایا Application of residues	عملکرد دانه Seed yield (ton/ha ⁻¹)	پروتئین دانه Seed protein(%)	نیتروژن دانه Seed nitrogen(%)	pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	نیتروژن خاک Soil nitrogen (%)
مرسوم Conventional	شاهد Control	5.3 ^g	9.69 ^g	1.83 ^h	7.49 ^a	1.34 ^b	0.07 ^g
	بقایای گندم Wheat residue	6.1 ^{ef}	11.36 ^{ef}	2.15 ^{fg}	7.45 ^{d-f}	1.65 ^{cd}	0.08 ^f
	بقایای لوبیا چشم بلبلی Mung bean residue	6.9 ^{b-d}	12.1 ^e	2.29 ^f	7.43 ^{f-h}	1.54 ^{ef}	0.09 ^{de}
	بقایای کنجد sesame residue	5.5 ^{fg}	10.92 ^f	2.07 ^g	7.47 ^{a-d}	1.58 ^{d-f}	0.07 ^g
	ترکیبی combination	6.4 ^{de}	11.97 ^e	2.27 ^f	7.43 ^{f-h}	1.52 ^{fg}	0.09 ^e
کم خاک‌ورزی Reduced tillage	شاهد Control	5.44 ^{fg}	14.8 ^{bc}	2.79 ^{b-d}	7.48 ^{ab}	1.45 ^g	0.08 ^f
	بقایای گندم Wheat residue	7.17 ^{bc}	15.23 ^b	2.93 ^b	7.46 ^{a-e}	1.7 ^{bc}	0.1 ^c
	بقایای لوبیا چشم بلبلی Mung bean residue	8.6 ^a	16.9 ^a	3.22 ^a	7.44 ^{e-g}	1.6 ^{d-f}	0.12 ^a
	بقایای کنجد sesame residue	5.8 ^{e-g}	15.21 ^b	2.88 ^{bc}	7.48 ^{a-c}	1.62 ^{c-e}	0.09 ^{cd}
	ترکیبی combination	7.32 ^b	15.52 ^b	2.89 ^b	7.45 ^{c-f}	1.52 ^{fg}	0.11 ^b
بی خاک‌ورزی No tillage	شاهد Control	5.1 ^{fg}	13.32 ^d	2.52 ^e	7.46 ^{b-f}	1.56 ^{d-f}	0.07 ^g
	بقایای گندم Wheat residue	6.9 ^{b-d}	13.72 ^d	2.6 ^e	7.44 ^{ef}	1.8 ^a	0.09 ^e
	بقایای لوبیا چشم بلبلی Mung bean residue	6.4 ^{c-e}	14.2 ^{cd}	2.7 ^{c-d}	7.41 ^h	1.7 ^{bc}	0.1 ^b
	بقایای کنجد sesame residue	6.2 ^{d-f}	13.53 ^d	2.56 ^e	7.45 ^{d-f}	1.8 ^a	0.08 ^f
	ترکیبی combination	6.2 ^{d-f}	13.77 ^d	2.61 ^{de}	7.41 ^{gh}	1.75 ^{ab}	0.09 ^{cd}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری در سطح پنج درصد بر مبنای آزمون LSD ندارند.

Averages with common letters in each column do not have a statistically significant difference at the five percent level based on LSD's test

درصد) و کمترین از تیمار خاک‌ورزی مرسوم (۱۱/۲۱ درصد) بدست آمد، همچنین بررسی مقایسه میانگین نوع کاربرد بقایا نشان داد بیشترین پروتئین دانه از تیمار کاربرد لوبیا چشم بلبلی (۱۴/۴ درصد) بود که نسبت به تیمارهای کاربرد بقایای گندم ۷/۱۹ درصد، بقایای کنجد ۸/۷ و ترکیبی ۴/۹۸ و عدم کاربرد بقایا (شاهد) ۱۳/۳۳ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳).

آرمسین و همکاران (Armecin et al., 2015) گزارش کردند کود سبز محتوای نیتروژن خاک را افزایش داده و نیتروژن را در دسترس گیاه قرار می‌دهد که از این طریق باعث افزایش رشد محصول و افزایش عملکرد می‌گردد (Armecin et al., 2015).

باغبانی و همکاران (Baghbani, Kadkhodaie & Modarres- Sanavy, 2016) گزارش دادند افزودن بقایای گیاهان خانواده لگوم به خاک باعث افزایش نیتروژن گیاه می‌شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تیمارهای خاک‌ورزی و کاربرد بقایا بر پروتئین دانه معنی‌دار نمی‌باشد این در حالی است که اثر هر کدام به تنهایی بر این صفت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۲).
بررسی مقایسه میانگین روش‌های مختلف خاک‌ورزی افزایش ۳۲/۲۱ درصدی پروتئین دانه تریتیکاله در روش کم‌خاک‌ورزی نسبت به مرسوم و ۱۲/۳۳ درصدی نسبت به بی‌خاک‌ورزی را نشان داد، بر این اساس بیشترین پروتئین دانه از تیمار کم‌خاک‌ورزی (۱۵/۵۴)

قابلیت هدایت الکتریکی

بر اساس نتایج اثر متقابل خاک‌ورزی و بقایا بر روی صفت قابلیت هدایت الکتریکی معنی‌دار نبود ولی اثر هر کدام به تنهایی بر این صفت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نشان داد (جدول ۲). در بین تیمار روش‌های مختلف خاک‌ورزی، بیشترین قابلیت هدایت الکتریکی از تیمار بی‌خاک‌ورزی ($1/72 \text{ ds.m}^{-1}$) به‌دست آمد که نسبت به تیمار مرسوم $11/69$ درصد و نسبت به کم‌خاک‌ورزی $8/48$ درصد افزایش نشان داد. در بین تیمار کاربرد بقایای گیاهی، تیمار بدون کاربرد بقایا (شاهد)، کمترین قابلیت هدایت الکتریکی ($1/64 \text{ ds.m}^{-1}$) و تیمار کاربرد بقایای گندم بیشترین میزان ($1/71 \text{ ds.m}^{-1}$) را داشت (جدول ۳). قابلیت هدایت الکتریکی کمتر در سامانه خاک‌ورزی مرسوم و تا حدودی کم‌خاک‌ورزی نسبت به بی‌خاک‌ورزی را می‌توان به علت شخم و به هم‌خوردگی لایه سطحی خاک و شستشوی املاح محلول در خاک‌ورزی مرسوم نسبت داد. خاک‌ورزی مرسوم سبب کاهش قابلیت هدایت الکتریکی خاک نسبت به خاک‌ورزی حفاظتی گردید که علت را می‌توان به املاح محلول در اراضی شخم شده با روش مرسوم نسبت داد که به تدریج بر اثر آبیاری‌های مکرر، شسته و از دسترس خاک خارج می‌گردند. شخم زدن خاک باعث می‌شود مسیرهای موئینی ریز تخریب شده و حرکت آب حاوی املاح از لایه‌های زیرین به لایه‌های فوقانی را کمتر خواهد نمود. گلچین و عسکری (2008) (Golchin & Asgari) اعلام کردند که عملیات زراعی همچون شخم زدن و کشت و کار در خاک‌های بکر زمانی که عمق آب زیرزمینی زیاد است، EC خاک را کاهش می‌دهد.

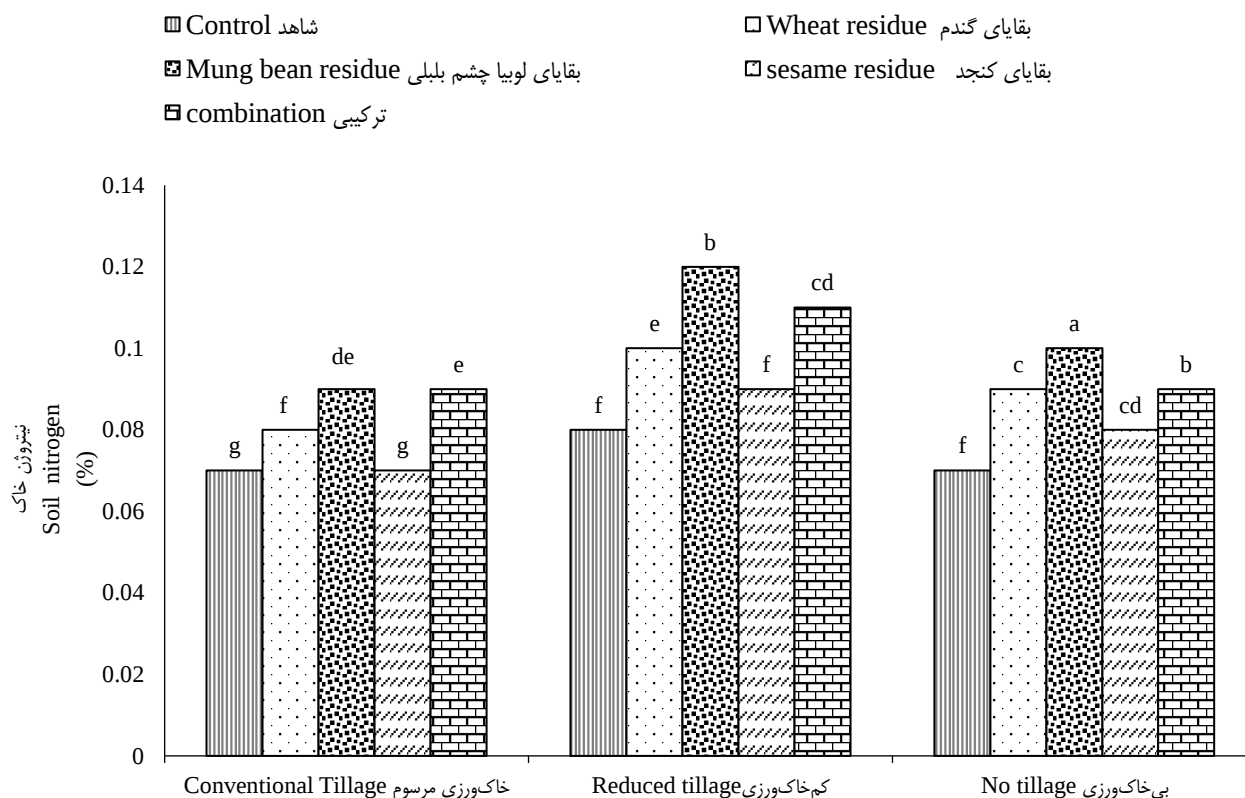
نیتروژن خاک

نتایج بیانگر آنست که برهم‌کنش خاک‌ورزی و کاربرد بقایا بر صفت نیتروژن خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۲). برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و کاربرد بقایا در مورد این صفت نشان داد که بیشترین نیتروژن خاک مربوط به تیمار کم‌خاک‌ورزی با تیمار کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی ($0/12$ درصد) و کمترین مقدار ($0/07$ درصد) نیز در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و کاربرد بقایای کنجد و عدم کاربرد بقایا (شاهد) و بی‌خاک‌ورزی با بدون کاربرد بقایا می‌باشد که در یک گروه قرار گرفتند (جدول ۴، شکل ۲). نتایج نشان داد در بین روش‌های خاک‌ورزی، بیشترین نیتروژن خاک مربوط به تیمار کم‌خاک‌ورزی ($0/01$ درصد) و کمترین مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم ($0/081$ درصد) بود. در خصوص تیمار کاربرد بقایا، نتایج نشان داد بیشترین نیتروژن خاک ($0/1$ درصد) از کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی و کمترین ($0/07$ درصد) از تیمار عدم کاربرد (شاهد) به‌دست آمد (جدول ۳).

زیبیلکس و همکاران (2012) (Zibilske et al.) اعلام نمودند در سیستم کم‌خاک‌ورزی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در سطح خاک و در منطقه فعالیت ریشه بهبود می‌یابد و به‌دلیل تغییر در معدنی شدن و ثبات بیشتر عناصر غذایی در خاک به‌وسیله افزایش فعالیت جمعیت میکروبی، عرضه عناصر غذایی به گیاه افزایش می‌یابد (Zibilske et al., 2012).

pH

نتایج نشان داد اثر متقابل تیمارهای خاک‌ورزی و کاربرد بقایا و اثر روش‌های خاک‌ورزی بر pH خاک معنی‌دار نمی‌باشد ولی اثر تیمار کاربرد بقایا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نشان داد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر تیمار کاربرد بقایا بر pH خاک در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین pH خاک ($7/47$) به‌طور مشابه در تیمارهای شاهد (عدم کاربرد بقایا) و کاربرد بقایای کنجد و کمترین ($7/42$) از تیمار کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی بدست آمد که تفاوت چندانی با تیمار ترکیبی نداشت و در یک گروه قرار گرفتند (جدول ۴). به‌نظر می‌رسد که نگهداری مقادیر مختلف بقایای گیاهی در خاک قادر به ایجاد افزایش معنی‌دار pH نبوده است که مشابه با یافته‌های آدامز و همکاران (2020) (Adams et al.) می‌باشد. اردل و همکاران (2023) (Erdel et al.) در بررسی شیوه‌های مختلف مدیریت خاک در برخی خاک‌ها در ترکیه گزارش دادند pH خاک تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی قرار گرفت و در تیمار بی‌خاک‌ورزی کاهش نشان داد آنها بیان نمودند کاهش pH در شرایط بی‌خاک‌ورزی ممکن است ناشی از افزایش مواد آلی باشد. لئوگراند و ویتی (2019) (Leogrande & Vitti) گزارش دادند که محصولات اسیدی آزاد شده از تجزیه مواد آلی بر pH خاک تأثیر می‌گذارد. رومانکاس و همکاران (2009) (RomanEckas et al.) اعلام کردند محفوظ ماندن بقایای گیاهی در سطح خاک در روش‌های حفاظتی محیطی مطلوب جهت کاهش تبخیر از سطح خاک، نفوذ آب در خاک، بهبود ساختمان خاک فراهم می‌سازد و بنابراین با اثر بروی میزان نفوذپذیری و رطوبت خاک باعث آبشویی کاتیون‌های بازی از لایه‌های سطحی خاک به اعماق می‌گردد و در نهایت کاهش واکنش خاک در لایه‌های فوقانی خاک را در پی دارد. رحیم زاده و نوید (2011) (Rahimzadeh & Navid) گزارش دادند روش‌های خاک‌ورزی بر pH خاک تأثیر معنی‌دار دارد، آنها کاهش pH خاک به مقدار جزئی در تیمار بی‌خاک‌ورزی را گزارش دادند. بالسدنت و همکاران (2000) (Balesdent et al.) اعلام کردند خاک‌ورزی مرسوم به‌دلیل تأثیر بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها و کربن آلی خاک موجب افزایش pH خاک می‌گردد.



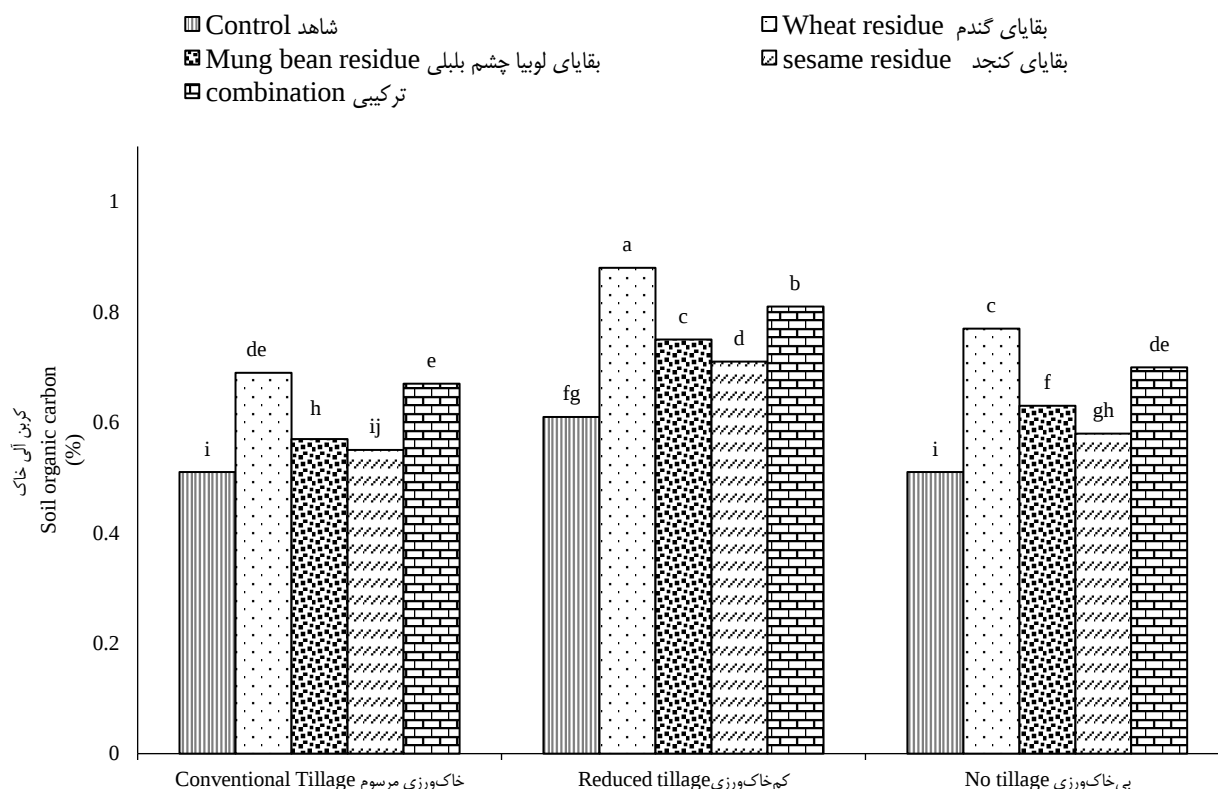
شکل ۲- مقایسه میانگین برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر درصد نیتروژن خاک
Figure 2- Comparison of the average interaction between the effects of tillage and residue spreading on soil nitrogen percentage

فصل رشد و شرایط اقلیمی نیز قرار گیرد. افزایش آن در تیمار بی‌خاک‌ورزی ممکن است در ارتباط با بهبود شرایط محیطی برای تثبیت نیتروژن توسط باکتری‌های تثبیت کننده باشد (Ranjbar et al., 2018).

کربن آلی خاک

بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش اثر متقابل خاک‌ورزی و کاربرد بقایا بر روی صفت کربن آلی خاک در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج اثرات متقابل خاک‌ورزی و پخش بقایا نشان داد بیشترین مقدار کربن آلی خاک از برهم‌کنش کم‌خاک‌ورزی و پخش بقایای گندم (۰/۸۸) و کمترین مقدار (۰/۵۱) هم از برهم‌کنش تیمار خاک‌ورزی مرسوم و عدم کاربرد بقایا بود که تفاوت معنی‌داری با بی‌خاک‌ورزی و عدم کاربرد بقایا نداشت و از یک گروه قرار گرفتند (جدول ۵، شکل ۲).

به‌طور کلی نقش مؤثر اجرای سامانه‌های حفاظتی در مقایسه با خاک‌ورزی رایج، از نظر افزایش میزان و کربن آلی خاک ممکن است ناشی از برهم زدن و تخریب کمتر ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک باشد. اجرای کم‌خاک‌ورزی یا حفاظتی در مقایسه با خاک‌ورزی رایج، سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها، افزایش نفوذپذیری، بهبود محتوی رطوبتی خاک، فراهمی مواد آلی و عناصر غذایی می‌شود (Thierfelder & Wall, 2010). به‌طور کلی، مکانیسم جلوگیری از افزایش نیتروژن کل خاک از طریق عملیات بی‌خاک‌ورزی یا مالچ می‌تواند به‌وسیله افزایش برگشت ماده آلی و بهبود فعالیت میکروبی مرتبط با تثبیت نیتروژن توضیح داده شود، با توجه به نتایج بدست آمده برگرداندن بقایای گیاهی باعث گردیده نیتروژن مورد نیاز گیاه فراهم و در نتیجه علاوه بر افزایش عملکرد گیاه، مازاد نیتروژن هم به‌صورت پروتئین در دانه ذخیره شود. گزارش شده است که با افزایش نیتروژن، مقدار پروتئین دانه گندم و کل بوته گندم افزایش می‌یابد (Siyadat & Moradi Telavat, 2011). تغییرات در نیتروژن کل و نیتروژن معدنی ممکن است تحت تأثیر کود مصرفی،



شکل ۳- مقایسه میانگین برهم کنش اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر درصد کربن آلی خاک

Figure 3- Comparison of the average interaction between the effects of tillage and residue spreading on soil organic carbon percentage

گیاهی روی سطح خاک در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی باعث کاهش دما می‌شود بنابراین از میزان هدررفت ماده آلی جلوگیری می‌نماید (Hobs, 2008). کومار و همکاران (Kumar et al., 2018) در بررسی اثرات خاک‌ورزی، بقایای گیاهی و سطوح نیتروژن بر پویایی کربن آلی خاک، بهره‌وری و کیفیت دانه گندم در شمال غربی هند گزارش دادند شیوه‌های کشاورزی حفاظتی به‌طور قابل توجهی بر محتوی کربن آلی خاک تأثیر گذاشت، صرف‌نظر از حفظ بقایا گندم کاشته شده در کرت‌های بدون بقایا تا ۳۶/۹ درصد در خاک سطحی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش نشان داد، همچنین کاربرد بقایا در بی‌خاک‌ورزی باعث افزایش ۲۴/۱ درصدی در محتوی کربن آلی خاک نسبت به تیمارهای بدون بقایا گردید.

کربن/نیتروژن (C/N)

بر اساس نتایج اثر متقابل خاک‌ورزی و بقایا بر روی نسبت C/N معنی‌دار نمی‌باشد، همچنین تجزیه واریانس نشان داد اثر تیمار

در بررسی اثر روش‌های خاک‌ورزی، بیشترین کربن آلی خاک مربوط به تیمار کم‌خاک‌ورزی (۰/۷۵ درصد) و کمترین مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم (۰/۶ درصد) بود. از نظر تیمار کاربرد بقایای گیاهی، بیشترین کربن آلی خاک به‌ترتیب از تیمار کاربرد بقایای گندم (۰/۷۸ درصد) و ترکیبی (نصف بقایای گندم + نصف بقایای لوبیا چشم بلبلی) به مقدار ۰/۷۲ درصد حاصل شد. کمترین مقدار به‌دست آمده نیز مربوط به تیمار شاهد (عدم کاربرد بقایا) (۰/۵۴ درصد) بود (جدول ۳). نتایج به‌دست آمده با یافته‌های اکثر محققین مطابقت دارد. هوبس (Hobs, 2008) گزارش داد که کربن آلی در سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم است. کاهش برهم‌خوردگی خاک تحت سیستم بی‌خاک‌ورزی تجزیه ماده آلی خاک را کند نموده و باعث تثبیت کربن در ریز دانه‌ها می‌شود، که متعاقباً کاهش فرسایش خاک را در پی دارد. همچنین اعلام شده که با افزایش دمای خاک میزان تجزیه مواد آلی افزایش می‌یابد. این مسئله به خصوص در مناطق گرمسیری (مانند کشور ما) بسیار مهم است. باقی گذاشتن بقایای

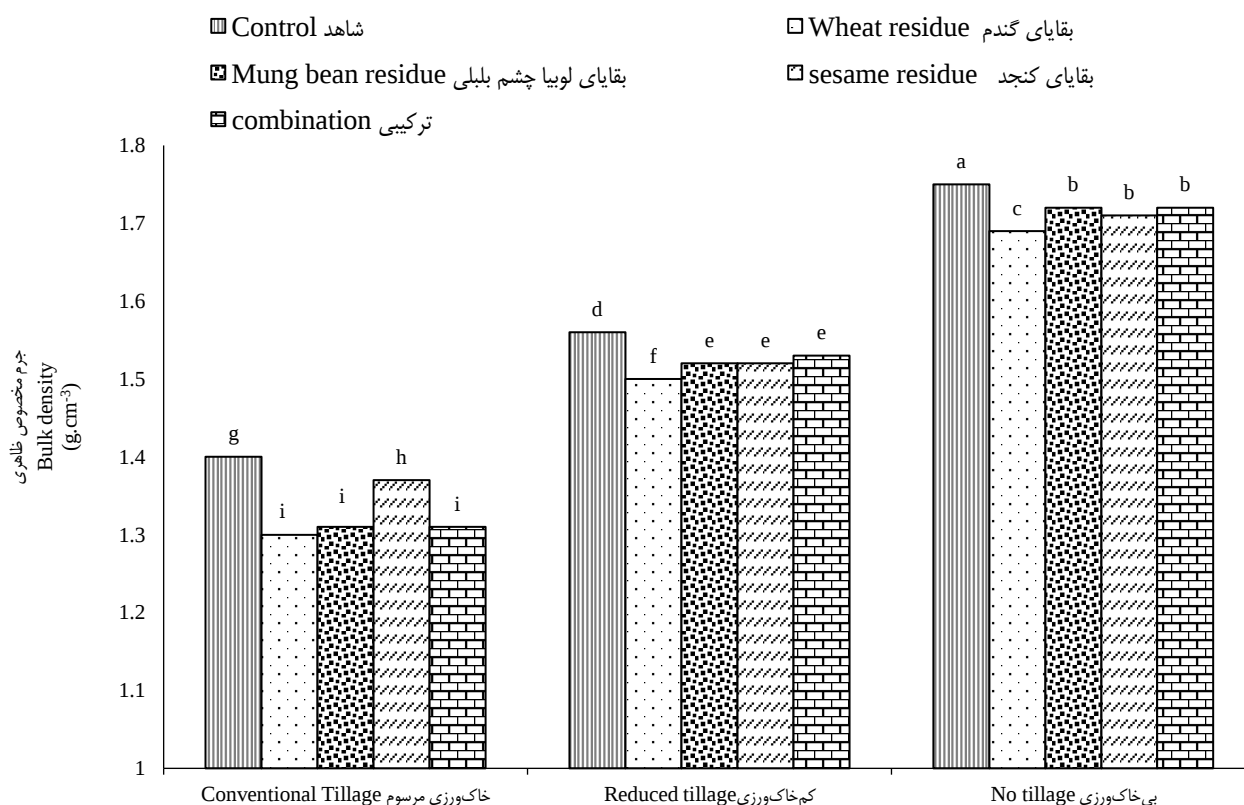
نیز نشان داد کمترین جرم مخصوص ظاهری خاک ($1/3 \text{ g/cm}^3$) مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم و کاربرد بقایای گندم و لوبیا چشم بلبلی و ترکیبی بود که در یک گروه قرار گرفتند. بیشترین جرم مخصوص ظاهری خاک ($1/75 \text{ g/cm}^3$) از تیمار بی‌خاک‌ورزی و کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی به‌دست آمد (جدول ۵، شکل ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین جرم مخصوص ظاهری از تیمار بی‌خاک‌ورزی ($1/7 \text{ g/cm}^3$) و کمترین مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم ($1/34 \text{ g/cm}^3$) بود. جرم مخصوص ظاهری در روش بی‌خاک‌ورزی $23/68$ درصد و $11/18$ درصد بیشتر از روش‌های خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی بود (جدول ۳).

در خاک‌ورزی مرسوم وجود گاو آهن برگردان‌دار به‌دلیل ایجاد کلوخه و برگرداندن خاک سطحی، خلل و فرج زیادی را در خاک سطحی ایجاد کرده که در نتیجه منجر به کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شده است. یکی از دلایل افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در سامانه بدون خاک‌ورزی این است که در این سامانه فقط در هنگام کاشت لایه سطحی خاک به هم می‌خورد و در اعماق پایین‌تر نه تنها به هم خوردگی ایجاد نمی‌شود.

خاک‌ورزی بر این صفت در سطح احتمال ۵ درصد و اثر کاربرد بقایا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که در بین سطوح مختلف خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و همه در یک گروه قرار گرفتند، بیشترین نسبت C/N ($7/58$) در تیمار خاک‌ورزی مرسوم و کمترین ($7/29$) در تیمار بی‌خاک‌ورزی مشاهده گردید، در بین سطوح مختلف بقایا، کاربرد بقایای گندم بیشترین ($8/83$ درصد) مقدار را به خود اختصاص داد، این در حالی بود که کمترین مقدار ($6/19$) از تیمار کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی به‌دست آمد (جدول ۳). برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و کاربرد بقایا نشان داد که بیشترین نسبت C/N ($9/2$) از تیمار کم‌خاک‌ورزی و با کاربرد بقایای گندم و کمترین مقدار ($6/02$) از تیمار بی‌خاک‌ورزی و کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی به‌دست آمد (جدول ۵).

جرم مخصوص ظاهری

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر متقابل خاک‌ورزی و بقایا بر روی جرم مخصوص ظاهری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۲). بررسی برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و کاربرد بقایا



شکل ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر جرم مخصوص ظاهری

Figure 4- Comparison of the average interaction between the effects of tillage and residue spreading on Bulk density

گیاهی در خاک و تأثیری که بر روی جمعیت موجودات زنده خاک دارد باعث جلوگیری از این تغییرات می‌شود (Kay & Vanden, 2002). بر اساس تجزیه واریانس داده‌ها اثر متقابل روش‌های خاک‌ورزی و کاربرد بقایا بر درصد تخلخل خاک معنی‌دار نمی‌باشد ولی اثر هر کدام از تیمارهای مورد بررسی به تنهایی معنی‌دار بوده که برای تیمار خاک‌ورزی در سطح احتمال ۵ درصد و برای تیمار کاربرد بقایا در سطح احتمال یک بدست آمده است. نتایج مقایسه میانگین در جدول ۳ نشان داد که بیشترین درصد تخلخل خاک به ترتیب در تیمار خاک‌ورزی مرسوم (۳۹/۲ درصد) و کم‌خاک‌وری (۳۵/۲ درصد) که در یک گروه قرار گرفتند و کمترین درصد تخلخل نیز در تیمار بی‌خاک‌ورزی (۳۰/۲ درصد) بود. مطابق جدول ۳، کاربرد بقایای لوبیا چشم بلبلی (۳۶/۹ درصد) بیشترین درصد و تیمار شاهد (عدم کاربرد بقایا) کمترین (۳۰/۲۱ درصد) تخلخل خاک را داشت. دلیل این موضوع بقایای بیشتر در خاک بوده که باعث تخلخل بیشتر شده است. بقایای گیاهی در خاک باعث افزایش مواد آلی شده و مواد آلی خاک باعث دانه‌بندی بهتر خاک می‌شود. بهبود ساختمان خاک و خاکدانه‌سازی، تخلخل آن را افزایش داده و باعث کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک می‌شود (Azimzadeh et al., 2002).

بر اساس تحقیقات محققین بیشترین درصد تخلخل خاک در لایه صفر تا ۱۵ سانتی‌متری در شخم با گاوآهن قلمی و کمترین درصد تخلخل در سیستم بدون شخم مشاهده شده است. همچنین محققین تأثیر سیستم بدون شخم و شخم برگردان‌دار در لایه صفر تا ده سانتی‌متری روی تخلخل خاک معنی‌دار نبوده است ولی توزیع منافذ درشت در سیستم بدون شخم یکنواخت‌تر می‌باشد (Mehboobi & Numan Fawzi, 1992). دهقان و الماسی (Dehghan & Almasi, 2009) گزارش دادند جرم مخصوص ظاهری خاک در خاک‌ورزی مرسوم بیشتر از کم‌خاک‌ورزی است هرچه جرم مخصوص ظاهری بیشتر باشد فشردگی خاک بیشتر است در نتیجه تخلخل و تهویه خاک کمتر می‌باشد که با نتایج این آزمایش همخوانی دارد (Dehghan & Almasi, 2009).

ماده آلی خاک

نتایج نشان داد اثر متقابل خاک‌ورزی و بقایا بر روی ماده آلی خاک در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و کاربرد بقایا نشان داد که بیشترین ماده آلی خاک (۱/۵۳ درصد) از تیمار کم‌خاک‌ورزی و با کاربرد بقایای گندم بود (جدول ۵، شکل ۴).

بلکه در اثر تردد ماشین‌ها در سطح مزرعه به میزان زیادی فشردگی خاک تشدید می‌شود و جرم مخصوص ظاهری خاک به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد (Azim zadeh et al., 2002). نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2020) مطابقت دارد. اثر اعمال کاربرد بقایا نشان داد که بیشترین جرم مخصوص ظاهری خاک ($1/57 \text{ g/cm}^3$) از تیمار بدون کاربرد بقایا (شاهد) و کمترین ($1/49 \text{ g/cm}^3$) از تیمار کاربرد بقایای گندم بدست آمد (جدول ۳). در تحقیقی که غلامی و همکاران (Gholami et al., 2013) در منطقه چناران انجام دادند اثر سه تیمار خاک‌ورزی شامل خاک‌ورزی متداول (شخم با گاوآهن برگردان‌دار)، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی روی جرم مخصوص ظاهری و تخلخل و عملکرد گندم آبی بررسی شد و تیمار روش متداول بیشترین عملکرد و کمترین جرم مخصوص ظاهری را به خود اختصاص داد. محقق اعلام کرد که در شرایط رطوبتی یکسان تیماری که دارای تخلخل بیشتر می‌باشد می‌تواند عملکرد بیشتری حاصل کند که با نتایج حاصل از این آزمایش همخوانی دارد (Gholami et al., 2013). بحرپور و همکاران (Bahrpour et al., 2015) در مطالعه موردی در منطقه معتدل سرد استان خراسان رضوی اثر مدیریت بقایا و خاک‌ورزی حفاظتی بر فشردگی خاک را ارزیابی نمودند نتایج این پژوهش نشان داد که روش بدون خاک‌ورزی با افزایش جرم مخصوص ظاهری شاخص مخروطی بالاتری را نسبت به سایر روش‌های خاک‌ورزی نشان داد. چقازردی و همکاران (Chaghazardi et al., 2015) با مطالعه تأثیر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی بر عملکرد گندم دیم در اقلیم‌های سرد، معتدل و نیمه‌گرمسیری استان کرمانشاه مشاهده کردند که سیستم‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی رایج درصد رطوبت حجمی و جرم مخصوص ظاهری خاک را بهبود دادند، و بالا بودن درصد رطوبت حجمی خاک نسبت به سیستم رایج را، برگردان نکردن خاک و باقی گذاشتن مقداری از بقایای گیاه قبلی در سطح خاک بیان کردند که بازدارنده فرسایش و کاهش دهنده تبخیر سطحی می‌باشد (Chaghazardi et al., 2015).

درصد تخلخل

اندازه، شکل و میزان پیوستگی خلل و فرج خاک بر میزان نفوذپذیری و قابلیت ذخیره آب و هوا مؤثر می‌باشد، این خلل و فرج در اثر عوامل غیر زنده هم‌چون شخم و عوامل زنده مانند رشد ریشه و حرکت و فعالیت موجودات خاک‌زی در خاک به وجود می‌آیند (Kay & Vanden Bygaart, 2002) تغییرات در نظام‌های خاک‌ورزی خصوصیات این خلل و فرج را دچار تغییر می‌نماید. وجود بقایای

جدول ۵- مقایسه میانگین برهم کنش اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر عملکرد، درصد پروتئین و نیتروژن دانه گیاه تریتیکاله و شاخص‌های فیزیکی شیمیایی خاک

Table 5- Comparison of the average interaction between the effects of tillage and residue spreading on yield, percentage of protein and nitrogen of triticale plant seeds and physical and chemical indicators of soil

خاک‌ورزی Tillage	کاربرد بقایا Application of residues	کربن آلی خاک Soil organic carbon (%)	کربن /نیتروژن خاک Soil carbon/nitrogen (%)	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (mg.m ⁻³)	وزن مخصوص حقیقی Apparent density (mg.m ⁻³)	تخلخل Porosity percent %	ماده آلی خاک Soil organic matter %
مرسوم Conventional	شاهد Control	0.51 ^j	7.52 ^b	1.4 ^g	2.16 ^e	35.23 ^{cd}	0.88 ^j
	بقایای گندم Wheat residue	0.69 ^{de}	8.89 ^b	1.3 ⁱ	2.16 ^e	39.87 ^{ab}	1.19 ^{eh}
	بقایای لوبیا چشم بلبلی Mung bean residue	0.57 ^h	6.28 ^d	1.31 ⁱ	2.25 ^{de}	41.59 ^a	0.98 ^{hi}
	بقایای کنجد Sesame residue	0.55 ^{ij}	7.71 ^b	1.37 ^h	2.22 ^{de}	38.12 ^{bc}	0.96 ⁱ
	ترکیبی Combination	0.67 ^e	7.51 ^b	1.31 ⁱ	2.25 ^{de}	41.6 ^a	1.15 ^f
کم خاک‌ورزی Reduced tillage	شاهد Control	0.61 ^{fg}	7.32 ^{bc}	1.56 ^d	2.3 ^{cd}	31.85 ^e	1.05 ^{gh}
	بقایای گندم Wheat residue	0.88 ^a	9.02 ^a	1.5 ^f	2.35 ^{bc}	36.02 ^c	1.53 ^a
	بقایای لوبیا چشم بلبلی Mung bean residue	0.75 ^c	6.29 ^d	1.52 ^e	2.4 ^b	36.68 ^{bc}	1.3 ^{cd}
	بقایای کنجد Sesame residue	0.71 ^d	7.45 ^{bc}	1.52 ^e	2.35 ^{bc}	35.22 ^{cd}	1.23 ^{de}
	ترکیبی Combination	0.81 ^b	7.36 ^{bc}	1.53 ^e	2.4 ^b	36.26 ^c	1.4 ^b
بی خاک‌ورزی No tillage	شاهد Control	0.51 ⁱ	7 ^c	1.75 ^a	2.3 ^{cd}	23.55 ^f	0.87 ^j
	بقایای گندم Wheat residue	0.77 ^c	8.59 ^a	1.69 ^c	2.5 ^a	32.47 ^{de}	1.32 ^c
	بقایای لوبیا چشم بلبلی Mung bean residue	0.63 ^f	6.02 ^d	1.72 ^b	2.55 ^a	32.43 ^{de}	1.08 ^g
	بقایای کنجد Sesame residue	0.58 ^{gh}	7.51 ^b	1.71 ^b	2.5 ^a	31.4 ^e	1.01 ^{hi}
	ترکیبی Combination	0.7 ^{de}	7.37 ^{bc}	1.72 ^b	2.5 ^a	31 ^e	1.21 ^{ef}

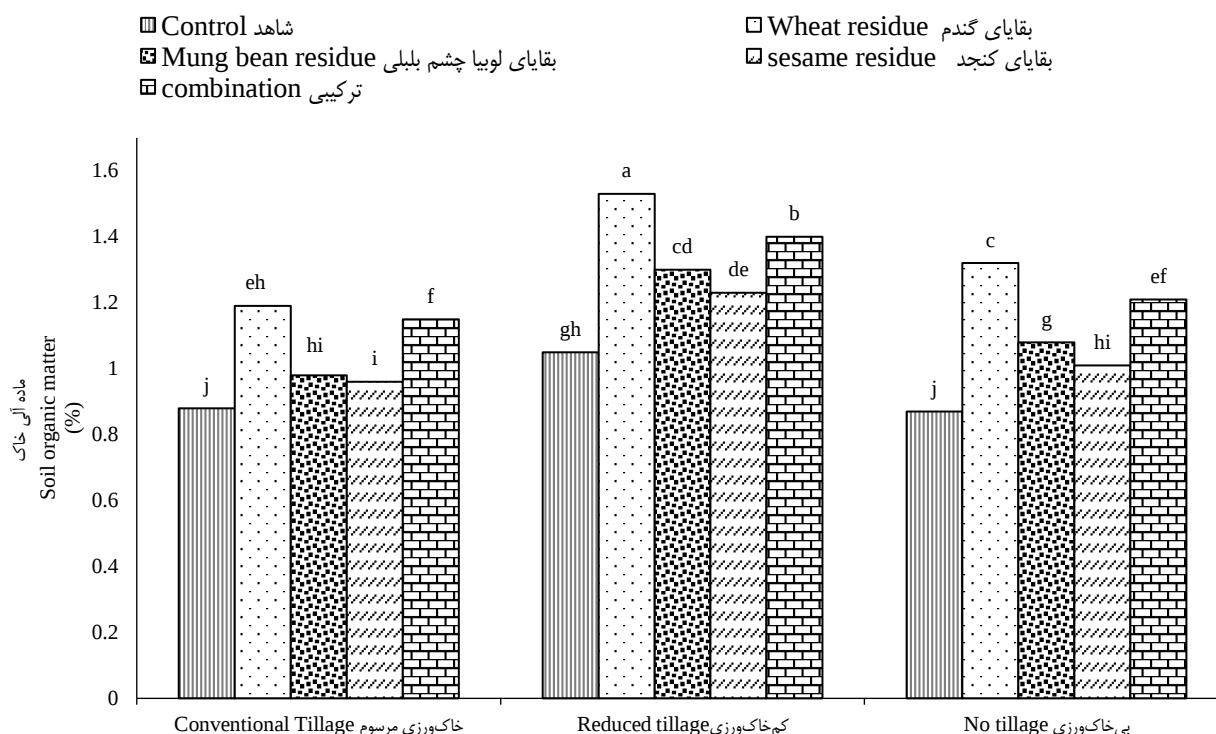
میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری در سطح پنج درصد بر مبنای آزمون LSD ندارند.

Averages with common letters in each column do not have a statistically significant difference at the five percent level based on LSD's test.

(2008).

اردل و همکاران (Erdel et al, 2023) با بررسی اثرات شیوه‌های مختلف مدیریت خاک بر برخی از خاک‌ها گزارش دادند گیاهان پوششی و سیستم‌های خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بر ویژگی‌های خاک انتخابی همچون pH، قابلیت هدایت الکتریکی، پایداری خاک‌دانه‌ها فسفر قابل دسترس و جرم مخصوص ظاهری تأثیر گذاشت. در مطالعه‌ای که سیستم‌های خاک‌ورزی مورد بررسی قرار گرفتند مشخص شد که بی‌خاک‌ورزی باعث افزایش ۱۷ درصدی ماده آلی خاک در مقایسه با سیستم مبتنی بر شخم گردید (Nurse et al., 2018).

در بین سطوح مختلف خاک‌ورزی، بیشترین ماده آلی خاک (۱/۳ درصد) در تیمار کم‌خاک‌ورزی که نسبت به تیمار بی‌خاک‌ورزی ۱۶/۶۷ درصد و نسبت به خاک‌ورزی مرسوم ۲۳/۱۸ درصد افزایش نشان داده است، در بین سطوح مختلف پخش بقایا، کاربرد بقایای گندم، بیشترین مقدار (۱/۳۵ درصد) و کمترین (۰/۹۳ درصد) مربوط به تیمار عدم کاربرد بقایا (شاهد) می‌باشد (جدول ۳). در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی با حضور بقایای گیاهی در سطح مزرعه موجبات بهبود ماده آلی خاک، کاهش فرسایش آبی و افزایش محتوی رطوبت خاک را در پی دارد. محققان بیان کرده‌اند که افزایش تجمع مواد مغذی در سطح خاک‌های تحت سیستم بی‌خاک‌ورزی اغلب به تجمع بقایای گیاهی روی سطح خاک و اختلاط ضعیف آن با خاک نسبت داده می‌شود که باعث افزایش ماده آلی خاک نیز می‌شود (De Santiago et al., ۲۰۱۸).



شکل ۵- مقایسه میانگین برهم‌کنش اثرات خاک‌ورزی و پخش بقایا بر درصد ماده آلی

Figure 5- Comparison of the average interaction between the effects of tillage and residue spreading on soil organic matter percentage

نتیجه‌گیری

و اولویت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده و توسعه سیستم‌های کشت حفاظتی می‌تواند به حفظ و صیانت از منابع تولید از قبیل آب و خاک و محیط‌زیست کمک نماید. نتایج نشان داد خاک‌ورزی حفاظتی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، سبب بهبود خصوصیات خاک گردید. تغییرات مرتبط با شاخص‌های فیزیکی شیمیایی خاک در روش کم‌خاک‌ورزی به مراتب نسبت به دو روش بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بیشتر و سبب بهبود این ویژگی‌ها حتی در زمان محدود شده است. علاوه بر این نتایج نشان داد اثر متقابل تیمارهای مورد بررسی بر صفات جرم مخصوص ظاهری، ماده آلی، کربن آلی، نیتروژن خاک معنی‌دار می‌باشد. در مجموع از دیدگاه حفاظت خاک نتایج این آزمایش برتری روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی در مقایسه با روش خاک‌ورزی مرسوم را نشان می‌دهد، لذا با توجه به معنی‌دار نشدن برخی از صفات مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود آزمایشات مشابهی در مدت زمان بیشتر انجام و در صورت معنی‌دار بودن این پارامترها اثرات آن بر عملکرد و اجزای عملکرد تربیتکاله یا سایر گیاهان خانواده غلات جهت دستیابی به کشاورزی پایدار بررسی گردد. پیشنهاد می‌شود از آنجایی که رشد و نمو گیاهان زراعی به خصوصیات خاک مرتبط می‌باشد، تداوم و

نتایج این آزمایش نشان داد عملکرد دانه در روش کم‌خاک‌ورزی ۱۲/۵ درصد و ۷/۶۳ درصد بیشتر از روش مرسوم و بی‌خاک‌ورزی بود. بر اساس یافته‌های این آزمایش روش‌های حفاظتی باعث بهبود میزان نیتروژن خاک و ماده آلی خاک که خصوصیات مهم در بحث خصوصیات شیمیایی خاک می‌باشند گردیده است که این تأثیر در عملکرد دانه اثر مثبت خود را نشان داد، این در حالی است که تداوم استفاده از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی منجر به دستیابی به عملکرد پایدار می‌گردد، گزارش‌های ضد و نقیضی در رابطه با تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر عملکرد گیاهان زراعی وجود دارد که می‌تواند ناشی از شرایط متفاوت اجرای آزمایش از لحاظ اقلیمی، خاک، گیاه، تناوب زراعی، شرایط اقتصادی و سایر موارد باشد. البته خاک‌ورزی حفاظتی بیشتر از دیدگاه حفاظت خاک مطرح می‌باشد که در مقایسه با خاک‌ورزی رایج برتری دارند که اثرات آن‌ها در مطالعات طولانی مدت قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. شناخت درست منابع خاک و مدیریت صحیح آن به‌منظور بهره‌وری اصولی، برای فراهم ساختن زمینه پیشبرد اهداف و برنامه ریزی‌های کشاورزی و منابع طبیعی کشور، از اهمیت

بهبود ظرفیت نگهداری آب خاک نیز کمک می‌نماید. البته نکته حائز اهمیت این‌ست که در انتخاب نوع عملیات خاک‌ورزی در هر منطقه باید شرایط آب و هوایی و عوامل اقلیمی، ویژگی‌های خاک و شرایط کشاورزان مد نظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهش و فن‌آوری دانشگاه شهید چمران اهواز جهت تأمین هزینه این پژوهش که قسمتی از قرارداد پژوهش SCU.AA1400.309 می‌باشد سپاسگزاری می‌گردد.

استمرار استفاده از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی به منظور تاثیر این خاک‌ورزی بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک در دراز مدت جهت نیل به عملکرد پایدار انجام گیرد. از آنجایی که نتایج خاک‌ورزی حفاظتی در سال‌های اول مشهود نمی‌باشد و گاهی حتی اثرات منفی آن مشاهده می‌شود و با توجه به اینکه فرسایش خاک‌های زراعی عمدتاً به دلیل کاربرد شیوه‌های نامناسب خاک‌ورزی بوده که کاهش مواد آلی خاک که یکی از مهمترین شاخص‌های شیمیایی خاک بوده و نقش مهمی در حساسیت خاک به عوامل مخرب دارد را در پی خواهد داشت. تهیه بستر کاشت به روش خاک‌ورزی حفاظتی با حفظ بقایای گیاهی و افزایش میزان مواد آلی در خاک و به حداقل رساندن به هم خوردگی خاک علاوه بر کاهش فرسایش خاک به

References

- Adams, A.M., Gillespie, A.W., Dhillon, G.S., Kar, G., Miniellya, C., Koala, S., Ouattara, B., Kimaro, A.A., Bationo, A., Schoenau, J.J., & Peak, D. (2020). Long-term effects of integrated soil fertility management practices on soil chemical properties in the Sahel. *Geoderma*, 366, 114207. 17 p. ISSN:1872-6259. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114207>
- Afzali Groh, H., Naqvi, H., Rostami, M.A., & Najafinejad, H. (2018). The effect of conservation tillage and wheat residue management on some soil properties and corn yield. *Soil Research*, 33(1), 1-11. <https://doi.org/10.22092/IJSR.2019.119050>
- Ahmadi Moghadam, P., Eftekhari, L., Mardani Karani, A., & Khodavardilo, H. (2015). Determining the amount of plant residues, physical and mechanical properties of soil in different tillage systems. *Agricultural Machines*, 6(1), 102-113. <https://doi.org/10.22067/jam.v6i1.32700>
- Ahmad-Mayi, A., Ibrahim, Z.R., & Abdurrahman, A.S. (2014). Effect of foliar spray of humic acid, ascorbic acid, cultivar and their interaction on growth of olive (*Olea europaea* L.) transplant cvs. khithairy and sorany. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 7(4), 18-30.
- Armecin, R.B., Seco, M.H., Caintic, P.S., & Milleza, E.J. (2015). Effect of leguminous cover crops on the growth and yield of abaca. *Industrial Crops and Products* 21, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.028>
- Arriaga, F., & Balkcom, K. (2015). Benefits of conservation tillage on rainfall and water management. Proceeding of the 2015 Georgia water Resources Conference. 3 p.
- Arriaga, F.J., Guzman, J., & Lowery, B. (2017). Conventional agricultural production systems and soil functions. In *Soil health and intensification of agroecosystems* pp. 109-125. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805317-1.00005-1>
- Asadi, M.E., Feyzbakhsh, M.T., & Razzaghi, M.H. (2016). Study of silage maize yield and yield components under different managements of tillage. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3), 151-170. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3191>
- Asenso, E., Li, J., Hu, L., Issaka, F., Tian, K., Zhang, L., Zhang, L., & Chen, H. (2018). Tillage effects on soil biochemical properties and maize grown in latosolic red soil of southern China. *Applied and Environmental Soil Science*. Article ID 8426736, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/8426736>
- Azim Zadeh, S., Kuchaki, A., & Pala, M. (2002). Study on the effect of plow different methods on bulk density, porosity, soil moisture and wheat yield. *Iranian Journal Crop Science*, 4, 218-233. <https://sid.ir/paper/57086/en>
- Bahrami, A. (2019). The role of conservation tillage systems in sustainable agricultural and rural development. *Rural Development Strategies*, 6(2), 181-188. <https://doi.org/10.22048/rdsj.2020.187385.1799>
- Baghbani, A., Kadkhodaie, A., & Modarres-Sanavy, S.A.M. (2016). Effects of wheat and bean residues along with zinc sulfate application on some qualitative and quantitative characteristics of wheat. *Ecophysiology of Crop Plants*, 10(39), 555-566. <https://sid.ir/paper/182933/en>
- Bahrpour, V., Rouhani, A., Abbaspourfard, M.H., & Agh Khani, M.H. (2015). Evaluation of the effect of residue management and conservation tillage on soil compaction, a case study in the cold temperate region of Khorasan Razavi province, 10th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystem) and Iran Mechanization, Mashhad. <https://civilica.com/doc/563465>
- Balesdent, J., Chenu, C., & Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Till Research*, 53, 215-230. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)
- Bay Bordi, M. (1993). *Soil physics*. Tehran University Publications. 676 p.

16. Castellini, M., & Domenico, V. (2012). Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.04.008>
17. Chaghazardi, H.R., Jahnsuz, M.R., Ahmadi, A., & Gorji, M. (2015). Effect of using different tillage methods on dryland wheat yield under cold, moderate and semi-warm climatic conditions of Kermanshah province. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 46(4), 605-618. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2015.56810>
18. Cooper, R., HamaAziz, Z., Hiscock, K., Lovett, A., Vrain, E., Dugdale, S., Sünnerberg, G., Dockerty, T., Hovesen, P., & Noble, L. (2020). Conservation tillage and soil health: Lessons from a 5-year UK farm trial (2013–2018). *Soil and Tillage Research*, 202, 104648. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32753.51046>
19. Dehghan, E., & Almasi, M. (2009). Comparison of some technical indexes on conventional tillage with reduced tillage methods. *Journal Water Soil Science*, 13(47), 679-690. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-1086-en.html>
20. De Santiago, A., Quintero, J.M., & Delgado, A. (2008). Long-term effects of tillage on the availability of iron, copper, manganese, and zinc in a Spanish Vertisol. *Soil and Tillage Research*, 98(2), 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.002>
21. Devi, S., Gupta, C., Jat, S.L., & Parmar, M.S. (2017). Crop residue recycling for economic and environmental sustainability: The case of India. *Open Agriculture*, 2(1), 486-494. <https://doi.org/10.1017/S001447971000030X>
22. Du, C., Li, L., & Effah, Z. (2022). Effects of straw mulching & reduced tillage on crop production and environment: A review. *Water*, 14(16), 2471. <https://doi.org/10.3390/w14162471>
23. Erdel, E., & Barik, K. (2023). Effects of different soil management practices on some soil properties in a semi-arid region, Igdir, Turkey. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 25(3), 733-745. <https://doi.org/10.22034/jast.25.3.733>
24. Fink, J.R., Inda, A.V., Bavaresco, J., Sánchez-Rodríguez, A.R., Barrón, V., Torrent, J., & Bayer, C. (2016). Diffusion and uptake of phosphorus, and root development of corn seedlings, in three contrasting subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. *Biology and Fertility of Soils*, 52, 203-210. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1067-3>
25. Ghazinejad, M., Monjezi, N., Rahnama Ghahfarokhi, A., & Sheikhdavoodi, M.J. (2022). Effect of tillage method and wheat residues on physical productivity of water and corn yield in Dezful city. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(1), 17-32. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.43900.2604>
26. Golchin, A., & Asgari, H. (2008). Land use effects on soil quality indicators in northeastern Iran. *Australian Journal of Soil Research*, 46, 27-36. <https://doi.org/10.1071/SR07049>
27. Gupta, N., Yadav, S., Humphreys, E., Kukal, S., Balwinder, S., & Eberbach, P. (2016). Effects of tillage and mulch on the growth, yield and irrigation water productivity of a dry seeded rice-wheat cropping system in north-west India. *Field Crops Research*, 196, 219–236. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.005>
28. Gholami, G., Askari, H.R., Zainli, A., & Saidifar, Z. (2012). The effect of different tillage systems on bulk density, and porosity of the soil and the performance of the yield. *Proceedings of the Second National Conference on Sustainable Development Agriculture and healthy environment, Hamadan*.
29. Hobbs, P.R. (2007). Conservation agriculture: what is it and why is it important for future sustainable food production. *Journal American Soil Agronomy*, 145, 127–137. <https://doi.org/10.1017/S0021859607006892>
30. Hobbs, P.R., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543-555. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
31. Houshyar, E., & Esmailpour, M. (2020). The impacts of tillage, fertilizer and residue managements on the soil properties and wheat production in a semi-arid region of Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(3), 225-232. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.10.001>
32. Husson, O., Brunet, A., Babre, D., Charpentier, H., Durand, M., & Sarthou, J.P. (2018). Conservation agriculture systems alter the electrical characteristics (Eh, pH and EC) of four soil types in France. *Soil and Tillage Research*, 176, 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.005>
33. Kay, B.D., & Vanden Bygaart, A.J. (2002). Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 66, 107-118. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00019-3)
34. Kumar, V., Naresh, R.K., Kumar, S., Kumar, S., Kumar, S., Singh, S.P., & Mahajan, N.C. (2018). Tillage, crop residue, and nitrogen levels on dynamics of soil labile organic carbon fractions, productivity and grain quality of wheat crop in Typic Ustochrept soil. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1), 598-609.
35. Koocheki, A., Nasiri Mahalati, M., & Azimzadeh, J. (2020). Effect of different tillage systems on wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and some soil physical characteristics in a fallow-wheat rotation under rainfed condition. *Journal of Agroecology*, 12(2), 299-317. <https://doi.org/10.22067/jag.v12i2.52175>
36. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
37. Leogrande, R., & Vitti, C. (2019). Use of organic amendments to reclaim saline and sodic soils: a review. *Arid Land Research and Management*, 33(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/15324982.2018.1498038>
38. Liu, Y.L., Chang, K.T., Stoorvogel, J., Verburg, P., & Sun, C.H. (2012). Evaluation of agricultural ecosystem

- services in fallowing land based on farmers' participation and model simulation. *Paddy and Water Environment*, 10, 301-310. <https://doi.org/10.1007/s10333-011-0282-2>
39. Liu, C., & Cooper, R.J. (2000). Humic substances influence creeping bentgrass growth. *Golf Course Management*, 49-53.
 40. Mehboobi, A., & Numan Fawzi, R.L. (1992). Effect of twenty-eight years of tillage and soil type in Ohio. Chosen Papers of the 3rd Iran Soil Science Congress. Geological Society of Iran.
 41. Mirzavand, J. (2018). Changes in soil organic matter and crop yield in conventional and conservation tillage systems in wheat-corn rotation in Zarghan region of Fars. *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 29(2), 121-133. <https://civilica.com/doc/1592639>.
 42. Mukherjee, A., & Lal, R. (2015). Short-term effects of cover cropping on the quality of a Typic Argiaquolls in Central Ohio. *Catena*, 131, 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.025>
 43. Nunes, M.R., van Es, H.M., Schindelbeck, R., Ristow, A.J., & Ryan, M. (2018). No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield. *Geoderma*, 328, 30-43. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.031>
 44. Nouraein, M., Bakhtiarzadeh, R., Janmohammadi, M., Mohammadzadeh, M., & Sabaghnia, N. (2019). The effects of micronutrient and organic fertilizers on yield and growth characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Helia*, 42(71), 249-264. <https://doi.org/10.1515/helia-2019-0015>
 45. Page, K., Dang, Y., & Dalal, R. (2020). The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(31), 17. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031>
 46. Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). Methods of soil analysis. Part II. *Chemical and microbiological. Soil Science Society American Journal*, 64, 918-926.
 47. Rahimzadeh, R., & Navid, H. (2011). Different tillage methods impacts on a clay soil properties and wheat production in rotation with chickpea under rainfed condition. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 21(1), 29-41. <https://doi.org/10.1001.1.24764310.1390.21.1.3.1>
 48. Ranjbar, A., Rahimikhoob, A., Ebrahimian, H., & Varavipour, M. (2018). Estimation of nitrogen nutrition index using aquaCrop and HYDRUS simulation models during maize growing period. *Iranian Journal of Soil Research*, 32(3), 283-303. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2018.117807>
 49. RomanECKas, K., RomanECKien, R., Arauskis, E., Pilipavicius, V., & Sakalauskas, A. (2009). The effect of conservation primary and zero tillage on soil bulk density, water content, sugar beet growth and weed infestation. *Agronomy Research*, 7(1), 73-86.
 50. Sanchez Sanchez, A., Sanchez, A.J., Juarez, M., Jorda, J., & Bermudez, D. (2006). Improvement of iron uptake in table grape by addition of humic substances. *Journal of Plant Nutrition*, 29(2), 259-272. <https://doi.org/10.1080/01904160500476087>
 51. Sharma, S., Thind, H.S., Sidhu, H.S., Jat, M.L., & Parihar, C.M. (2019). Effects of crop residue retention on soil carbon pools after 6 years of rice-wheat cropping system. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8305-1>
 52. Siyadat S.A., & Moradi Telavat, M. (2011). Practical aspects of organic farming. 2 th Ed. *Publication of Agricultural Extension and Education Tehran*. (In Persian)
 53. Thierfelder, C., & Wall, P.C. (2010). Rotation in conservation agriculture systems of Zambia: effects on soil quality and water relations. *Experimental Agriculture*, 46(3), 309-325. <https://doi.org/10.1017/S001447971000030X>
 54. Verhulst, N., Govaerts, B., Verachttert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P., & Sayre, K.D. (2010). Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems. *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality*, 1799267585, 137-208. https://doi.org/10.1201/EBK_1439800577-7
 55. Walkly, A., & Black, I.A. (1934). An Experimentation of Data. 39pp.
 56. O'Brien, P.L., & Daigh, A.L. (2019). Tillage practices alter the surface energy balance—A review. *Soil and Tillage Research*, 195, 104354. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104354>
 57. Zhang, L., Wang, J., Fu, G., & Zhao, Y. (2018). Rotary tillage in rotation with plowing tillage improves soil properties and crop yield in a wheat-maize cropping system. *PLoS One*, 13(6), e0198193. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198193>
 58. Zhang, S., Chen, X., Jia, S., Liang, A., Zhang, X., Yang, X., & Zhou, G. (2015). The potential mechanism of long-term conservation tillage effects on maize yield in the black soil of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 154, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.002>
 59. Zibilske, M., Bradford, & Smart, J.R. (2012). Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen, and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. *Soil Tillage Research*, 66, 153-163. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00023-5)

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۳، ص. ۷۴۷-۷۳۳

ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای نیشکر اراضی شمال استان خوزستان با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND)

عادل نیسی^۱ - مصطفی چرم^{۲*} - حیدر غفاری^۳ - جعفر آل کثیر^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

چکیده

چرخه‌های رشد فنولوژیکی نیشکر باعث تغییرات در نیازهای غذایی گیاه می‌شود، بنابراین تشخیص این امر مستلزم آگاهی کامل از مراحل رشد گیاه و تجزیه خاک و برگ گیاهان در مراحل رشدی می‌باشد. قابلیت دسترسی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در مراحل رشدی گیاه از نکات کلیدی رشد نرمال گیاهان می‌باشد به همین دلیل مدیریت تغذیه گیاه در دست‌یابی به عملکرد مطلوب نقش بسزایی دارد. با توجه به این تغییرات، روش تجزیه و تشخیص برگ می‌تواند از محدودیت‌های ناشی از اختلالات تغذیه‌ای گیاهان و مصرف بهینه کودی مورد نیاز در کشت نیشکر جلوگیری کند. روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) یکی از روش‌های مناسب در تفسیر نتایج تجزیه عناصر غذایی در گیاه، نیازهای عناصر غذایی و وضعیت تعادل تغذیه‌ای در گیاهان می‌باشد. هدف از این مطالعه ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای نیشکر با روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی در ۲۵ مزرعه نیشکر بازرویی با واریته CP69-1062 و مساحت کل ۵۴۱ هکتار در کشت و صنعت نیشکر امام خمینی شمال خوزستان و تعیین ترتیب محدودیت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، مس، آهن، منگنز و روی بود که عملکرد نیشکر را از لحاظ تغذیه‌ای محدود می‌کنند. پایگاه داده شامل غلظت عناصر غذایی برگ نیشکر و عملکرد مزارع است که با جمع‌آوری نمونه‌های مرکب برگ نیشکر در شهریور ماه ۱۴۰۲ و انجام آنالیز، همچنین مشخص شدن عملکرد هر مزرعه پس از پایان برداشت، تشکیل شد. با استفاده از روش CND و تعیین اعداد مرجع و براساس تابع توزیع تجمعی واریانس، عملکرد ۹۹ تن در هکتار نیشکر بعنوان عملکرد میانی مشخص شد در نتیجه مزارع نیشکر مورد مطالعه به دو گروه عملکردی مطلوب و نامطلوب تقسیم شدند. سپس شاخص‌های عناصر غذایی محاسبه و براساس آن اولویت‌بندی نیاز عناصر غذایی به ترتیب $\text{Cu} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{Ca} > \text{K} > \text{P} > \text{N}$ مشخص گردید. میانگین شاخص تعادل تغذیه ای (I^2) در مزارع گروه عملکردی نامطلوب (۸۴/۶۲) بود که نشان دهنده عدم تعادل تغذیه‌ای در این مزارع است. بنابراین از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی CND می‌توان برای شناسایی محدودیت‌های تغذیه‌ای که مسئول عدم تعادل تغذیه‌ای هستند و می‌تواند منجر به بهره‌وری پایین نیشکر شود، استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: شاخص تعادل عناصر غذایی، عملکرد، محدودیت تغذیه‌ای، نیشکر بازرویی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: m.chorom@scu.ac.ir

۴- استادیار، طرح توسعه نیشکر و صنایع جانبی اهواز، خوزستان، ایران

مقدمه

نیشکر با نام علمی (*Saccharum officinarum* L.) گیاهی چند ساله از تیره غلات یک محصول کشاورزی مهم است که در بسیاری از مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری جهان کشت می شود (Salman et al., 2023). در شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان پنج رقم تجاری با سطوح مختلف در اراضی زراعی به زیر کشت می روند که از بین این ارقام، رقم CP69-1062 واریته تجاری متداول بوده و بیشترین سطح زیر کشت در اراضی نیشکر را به خود اختصاص داده است (Jamnani et al., 2019). سیستم زراعت نیشکر به دو دسته مزارع کشت اول^۱ و مزارع بازروئی^۲ تقسیم بندی می شود. مزارعی که در سال اول کشت می شوند، مزارع کشت اول یا پلنت با دوره رشد (۱۸ تا ۲۱ ماه) و سنین بعدی، مزارع بازروئی با دوره رشد (۸ تا ۱۲ ماه) نامیده می شوند (Zhao et al., 2014). مدیریت کوددهی مرسوم در کشت و صنعت نیشکری شمال خوزستان بدین صورت که در مزارع کشت ۱- کود فسفاته (سوپرفسفات تریپل) ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار ۲- کود آلی کمپوست (بقایای نیشکر) ۳۵-۴۰ تن در هکتار و ۳- کود نیتروژنی (اوره) - ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار بوده اما در مزارع بازروئی فقط از کود نیتروژنی (اوره) - ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار مورد استفاده قرار می گیرد.

تجزیه نمونه برگ برای پایش و ارزیابی وضعیت تغذیه نیشکر مناسب است. نیشکر یک چرخه چندین ساله ممکن است داشته باشد و در پایش تغذیه، شاخص مناسبی برای ارزیابی نیازهای غذایی محصول در طول سال های کشت دارد (Silva et al., 2020). بنابراین، تجزیه نمونه برگ تکمیل کننده آنالیز شیمیایی خاک است و امکان پیش بینی اختلالات تغذیه ای را قبل از ظهور علائم بصری در بافت گیاه فراهم می کند (Prado & Cayon, 2012). تجزیه نمونه برگ می تواند از محدودیت های ناشی از کمبود و بیش بود عناصر غذایی مورد نیاز گیاه مانند نیتروژن (N) جلوگیری کند که باعث کاهش قطر ساقه و کاهش پنجه زنی در کمبود آن می شود. با این حال، بیش از حد بودن نیتروژن باعث تیره شدن رنگ سبز برگ ها، شاخ و برگ فراوان، خوابیدگی ساقه، تأخیر در رسیدگی کیفی و سیستم ریشه به سختی توسعه می یابد (Prado, 2020). همچنین، عناصر کم مصرفی مانند مس (Cu) می توانند به دلیل مازاد تغذیه ای در نیشکر محدودیت ایجاد کنند که با پنجه زنی کمتر و ضخیم شدن ریشه مشخص می شود. تغییرپذیری در محدودیت تغذیه ای نیشکر به دلیل

چرخه های رشد فنولوژیکی به نام نیشکر-کشت اول و نیشکر-بازروئی رخ می دهد که تغییراتی را در تولید ماده خشک بین چرخه های تولید ایجاد می کند، که به نوبه خود نیازهای تغذیه ای متفاوتی را فراهم می کند (Segato et al., 2006).

رایج ترین روش ارزیابی وضعیت عناصر غذایی مقایسه غلظت های عناصر غذایی اندازه گیری شده در نمونه های گیاهی با اعداد مرجع غلظت های بحرانی یا دامنه های کفایت، مربوط به گیاه مورد نظر می باشد. در این روش، تنها به غلظت تک تک عناصر تأکید می گردد و تعادل تغذیه ای مورد توجه قرار نمی گیرد (de Mello Prado & Rozane, 2020). اما در این روش اثرات متقابل عناصر در درون محدوده های وسیع غلظت ها مستتر است و قابل تفکیک نیستند (Parent & Dafir, 1992). روش های جدید ارزیابی وضعیت عناصر غذایی گیاهان مانند DOP^۳، DRIS^۴ و CND^۵ امروزه به صورت کمی در آمده است در روش DOP برای بررسی عدم تعادل تغذیه از روابط میان غلظت عنصر غذایی و مقدار اعداد مرجع آن استفاده می شود (Montanes et al., 1993; Martin et al., 2014). در روش DRIS با در نظر گرفتن فرم های بیان دو عنصری تا حدود زیادی اثرات متقابل عناصر منظور گردیده است. روش DRIS با در نظر گرفتن نسبت دو عنصری ولی روش CND با در نظر گرفتن نسبت یک عنصر به همه عناصر اثرات متقابل عناصر را بیان می کند (Parent & Dafir, 1992). با توجه به برتری و مزیت روش هر کدام از روش ها، یکی از مدل های ارزیابی محدودیت تغذیه ای در نیشکر، می تواند با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) انجام شود (Calheiros et al., 2018). روش CND دارای مزایایی است که علاوه بر دریافت سریع استانداردهای به روز، می تواند عناصر غذایی مسئول عدم تعادل تغذیه ای و در نتیجه بهره وری پایین را شناسایی کرد. با این حال، می تواند محدودیت های ناشی از کمبودها، بیش بودها که به ترتیب توسط شاخص های منفی و مثبت شناسایی می شوند را شناسایی کند (Nowaki et al., 2017). روش CND مبتنی بر روابط تبدیل شده بین تک تک عناصر غذایی مورد ارزیابی و میانگین هندسی تمام عناصر غذایی بافت نمونه برداری شده است که در واقع یک روش چند متغیره برای تجزیه و تحلیل روابط همه عناصر غذایی با هم است. ایده اولیه این روش برگرفته از تجزیه و تحلیل داده های ترکیبی (CDA) است که یک داده را به صورت کمی و نسبت به کل توصیف می کند (Parent & Dafir, 1992). مطالعات زیادی در مورد

1- Plant

2- Ratoon

3- Deviation from the optimal percentage

4- Diagnosis and Recommendation Integrated system

5- Compositional Nutrient Diagnosis

و ۳۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی بین رودخانه‌های شطیط (شاخه‌ای از کارون) و دز در ۳۰ کیلومتری جنوب شهرستان شوشتر به مساحت تقریبی ۱۵۳۰۰ هکتار واقع شده‌است، که از شمال به تپه‌های شمالی دشت شیبیه و از غرب به رودخانه دز و از شرق به رودخانه شطیط و از جنوب به واحد دهخدا محدود شده است. طول ابعادی این واحد حدود ۳۴ کیلومتر و عرض آن حداقل ۵ و حداکثر ۱۵ کیلومتر است (شکل ۱).

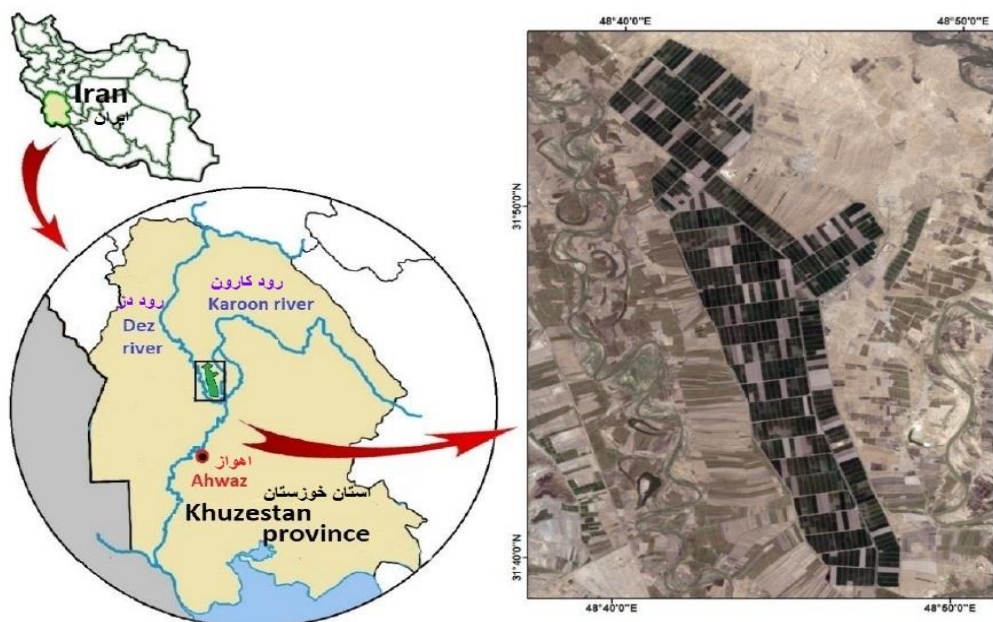
در این پژوهش، تعداد ۲۵ مزرعه با واریته CP69-1062 از مزارع نیشکر بازرویی با مساحت کل ۵۴۱ هکتار انتخاب شد و نمونه‌برداری خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر بصورت نمونه مرکب از هر مزرعه مورد مطالعه جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک صورت پذیرفت. نمونه‌های خاک، هواخشک شده و به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، کوبیده شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع (Rhoades, 1996)، بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1982) و مقدار کربن آلی با استفاده از روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1996) اندازه‌گیری شد. نیتروژن کل به روش کج‌لدال (Bremner & Mulvaney, 1982) و غلظت فسفر قابل جذب خاک به روش استخراج با بیکربنات سدیم (Olsen et al., 1954) عصاره‌گیری و غلظت آن به روش رنگ‌سنجی (Murphy & Riley, 1962) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (HACH DR 3900) اندازه‌گیری شد.

مدیریت عناصر غذایی در گیاهان مختلف با روش‌های متفاوتی همچون CND انجام شده است اما این مطالعات در ارتباط با گیاه نیشکر در ایران انجام نشده و در جهان محدود می‌باشد. از جمله این مطالعات که به روش تشخیص چند گانه عناصر صورت گرفته، مطالعه‌ای توسط کالهیروس و همکاران (Calheiros et al., 2018) در شمال شرقی ایالت آلاگواس و مطالعه دیگری توسط داسیلوا و همکاران (da Silva et al., 2021) در ایالت سائوپائولو برزیل بر روی عناصر غذایی نیشکر نشان دادند روش CND یکی از روش‌هایی می‌باشد که برای شناسایی عدم تعادل‌های تغذیه‌ای که منجر به کاهش عملکرد نیشکر می‌شود، بسیار ارزشمند است.

بنابراین، این پژوهش به‌منظور بررسی اثر مدیریت کوددهی و ارزیابی وضعیت تعادل عناصر غذایی در گیاه نیشکر واریته تجاری CP69-1062 مزارع بازرویی که بیشترین سطح زیر کشت در مزارع شمال خوزستان، شرکت کشت و صنعت امام خمینی^(۵) را داراست، با استفاده از روش CND (تشخیص چندگانه عناصر غذایی) انجام شد. در این زمینه، هدف تعیین ترتیب محدودیت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، مس، آهن، منگنز و روی بود که در صورت مصرف نامتعادل در مدیریت کوددهی عملکرد یا بهره‌وری مزارع نیشکر راتون را محدود می‌کنند.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزارع نیشکر راتون یا سال دوم به بعد (بازروئی) در منطقه شیبیه کشت و صنعت نیشکر امام خمینی^(۵) واقع در ۳۱ درجه



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location of the study area

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مزارع نیشکر مورد مطالعه
Table 1- Soil characteristics of the studied sugarcane fields

ویژگی Property	واحد Unit	بیشینه Maximum	کمینه Minimum	میانگین Average	انحراف معیار Standard deviation
هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع Electrical conductivity of saturated flower extract	dS m ⁻¹	2.05	1.25	1.60	0.26
پ هاش عصاره گل اشباع pH of Saturated flower extract	-	7.87	7.47	7.66	0.11
درصد اشباع Saturation Percentage	%	62.40	46.90	56.25	3.65
شن Sand	%	41.40	5.50	12.75	9.33
سیلت Silt	%	55.50	38.60	47.37	4.16
رس Clay	%	50.00	33.00	39.88	7.73
کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent	%	38.70	33.00	36.28	1.82
کربن آلی Organic carbon	%	0.98	0.65	0.79	0.13
نیتروژن Nitrogen	%	0.09	0.06	0.08	0.01
فسفر قابل جذب Phosphorus	mg kg ⁻¹	9.79	3.18	6.66	2.34
پتاسیم قابل جذب Potassium	mg kg ⁻¹	222.3	120.9	156.0	33.49
کلسیم Calcium	mg kg ⁻¹	424.0	152.0	276.8	1.49
منیزیم Magnesium	mg kg ⁻¹	177.39	48.6	83.35	1.37
آهن Iron	mg kg ⁻¹	36.70	3.08	15.88	7.70
روی Zinc	mg kg ⁻¹	16.78	0.66	6.51	4.72
مس Copper	mg kg ⁻¹	5.55	1.14	3.91	1.26
منگنز Manganese	mg kg ⁻¹	52.56	9.02	23.26	13.66

برگ براساس روش نمونه‌برداری ارائه شده توسط مک کری و میلاواراپو مؤسسه تحقیقات و آموزش کشاورزی دانشگاه فلوریدا (McCray & Mylavarapu, 2020) انجام شد. نمونه‌های برگ نیشکر در هفته اول شهریور و پس از گذشت دوره رشد حداکثری گیاه نیشکر یعنی زمانی که غلظت عناصر غذایی در گیاه نسبتاً ثابت باقی می‌ماند، تهیه گردید. البته در روش CND چون نسبت یک عنصر به همه عناصر بجای غلظت هر عنصر غذایی در نظر گرفته می‌شود بنابراین تفسیر نتایج تجزیه برگ‌ها به سن فیزیولوژیک و محل نمونه‌برداری بستگی ندارد (Parent & Dafir, 1992).

درصد آهک یا کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون اندازه‌گیری شد (Nelson, 1982). غلظت پتاسیم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (Helmke & Sparks, 1996) و با استفاده از دستگاه فلیم‌فوتومتر (BWB Technologies) همچنین غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، منگنز، روی و مس) به روش عصاره‌گیری با ۰/۰۰۵ DTPA مولار و با استفاده از دستگاه طیف‌سنج AAS اندازه‌گیری شد (Lindsay & Norvell, 1978) (جدول ۱).

سپس برای ایجاد پایگاه داده جهت استفاده از روش تشخیص چندگلانه عناصر غذایی و به‌منظور تجزیه برگ‌ها، نمونه‌برداری بافت



شکل ۲- موقعیت برگ کامل قابل مشاهده بالا (TVD Leaf) مورد نظر نمونه برداری
Figure 2- Total visible top leaf (TVD Leaf) position to be sampled



شکل ۳- مراحل آماده سازی نمونه برگ
Figure 3- steps of leaf sample preparation

هواخشک نمودن آنها، حدود ۲۰ سانتی متر از قسمت میانی نمونه برگ ها را جدا کرده و رگبرگ اصلی آنها حذف شد. سپس درون آون در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده تا خشک شدند و در مرحله بعد با دستگاه آسیاب گیاه، آسیاب شده اند (شکل ۳). به منظور اندازه گیری N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn و Zn با

در این روش جهت نمونه برداری برگ، در هر مزرعه ده نقطه مکان تعیین شد و از هر نقطه مکان ۱۰ نمونه برگ کامل قابل مشاهده (سومین برگ از بالا) گرفته شد (شکل ۲). در پایان یک نمونه مرکب برگ (تعداد ۱۰۰ برگ) تهیه شد. به منظور حذف ذرات خاک، ابتدا نمونه های برگ با آب مقطر شستشو داده شدند و پس از

غذایی در گیاه را برای عناصر مورد ارزیابی مانند N, P, K, R نشان می‌دهد.

به‌منظور محاسبه شاخص تک تک عناصر غذایی (I_x) برای دسته‌بندی مزارع براساس عملکرد به دو گروه (مطلوب و نامطلوب)، ابتدا با ترسیم نمودار بین عملکرد و تابع تجمعی نسبت واریانس شاخص‌های عناصر غذایی انجام شد. سپس با مشخص کردن نقطه عطف منحنی (Inflection point) عملکرد میانی بدست آمد. این کار براساس روش تجزیه واریانس کیت-نلسون که از دقت ریاضی مطلوبی برای جداسازی گروه‌های عملکردی برخوردار است، صورت پذیرفت. مراحل این فرآیند به شرح زیر است:

۱- ترتیب عملکردها از زیاد به کم است.

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

۳- واریانس مقادیر V_X برای اولین عملکرد و برای سایر عملکردها محاسبه و نسبت واریانس آن‌ها بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود. این عمل برای دومین عملکرد و تا آخر انجام می‌شود.

$$F_i(V_X) = \frac{\text{Variance } V_X \text{ of } n_1 \text{ observations}}{\text{Variance } V_X \text{ of } n_2 \text{ observations}} \quad (5)$$

۴- تابع تجمعی نسبت واریانس نیز بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$F_i^c = \frac{\sum_{i=1}^{n_1-1} f_i(V_X)}{\sum_{i=1}^{n_1-1} f_i(V_X)} \times 100 \quad (6)$$

۵- تابع تجمعی $F_i^c(V_X)$ مرتبط با عملکرد (Y) با الگوی درجه ۳ نشان داده می‌شود.

$$F_i^c(V_X) = aY^3 + bY^2 + cY + d \quad (7)$$

۶- نقاط عطف منحنی‌ها از طریق محاسبه مشتق درجه دوم معادلات محاسبه شد.

$$\frac{\partial F_i^c(V_X)}{\partial Y} = 3ay^2 + 2by + c \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 F_i^c(V_X)}{\partial Y^2} = 6ay + 2b = 0 \quad (9)$$

عملکرد میانی که نشان‌دهنده یک نقطه میانی بین گروه‌های عملکرد مطلوب و نامطلوب است، از حل رابطه (۹) به‌صورت $-b/3a$ محاسبه شد. تخمین عملکرد میانی با استفاده از روش تابع تجمعی بر اساس واریانس نسبت لگاریتمی شاخص‌های عناصر غذایی داده شده در رابطه ۷ تعیین گردید. بنابراین عملکرد ۹۹ تن در هکتار به‌عنوان عملکرد میانی مرز تفکیک مزارع با عملکرد مطلوب و نامطلوب بدست آمده جهت تعیین اعداد مرجع عناصر غذایی مشخص شد. در مرحله بعد برای تعیین اعداد مرجع CND، غلظت عناصر در جامعه با عملکرد مطلوب به‌عنوان حد بحرانی یا هدف بهینه برای عناصر غذایی در نظر گرفته شد. این حدود بهینه با عملکرد متوسط در نقطه عطف منحنی تابع تجمعی واریانس نسبت لگاریتمی عنصر غذایی مربوطه مطابقت دارد. که معمولاً به‌صورت V^*R و V^*K, V^*P, V^*N نشان داده

استفاده از روش توصیف شده توسط باتاگالیا و همکاران (Bataglia et al., 1983) انجام شد. بازده یا عملکرد مزارع منتخب در این طرح در فصل برداشت، با انجام برداشت مکانیزه توسط دستگاه دروگر نیشکر^۱، در پایگاه داده ثبت گردید.

مدل CND (روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی)

از اطلاعات بدست آمده با تجزیه و تحلیل شیمیایی محتویات برگ و عملکرد مزارع نیشکر راتون، پایگاه داده تشکیل شد. با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی و پایگاه داده شامل عملکرد مزارع نیشکر و غلظت عناصر غذایی برگ، ابتدا مزارع براساس عملکرد و بصورت نزولی (زیاد به کم) مرتب شدند سپس به روش خیار و همکاران (Khayari et al., 2001a) به‌ترتیبی که در ادامه ذکر شده است، به دو گروه عملکردی مطلوب و نامطلوب دسته‌بندی شده و با تعیین اعداد مرجع، ارزیابی وضعیت عناصر غذایی انجام شد. جهت محاسبه استانداردهای CND، ابتدا داده‌های اصلی غلظت عناصر به واحد یکسانی ($gr\ kg^{-1}$) تبدیل شده تا امکان مقایسه بین عناصر غذایی از واحدهای مختلف را فراهم کند (Pereira da Silva, & Justino Chiaia, 2021). سپس مقدار ترکیبات باقی‌مانده (R) برای هر نمونه از مزارع مورد مطالعه که مربوط به مکمل ماده خشک برای ۱۰۰۰ گرم است، با توجه به رابطه (۱) تعیین شد.

$$R = 100 - (VX1 + VX2 + \dots + VXi) \quad (1)$$

که در آن R ترکیبات باقی‌مانده یا مکمل ماده خشک برای ۱۰۰٪ ماده خشک؛ VX غلظت عناصر غذایی که در آن X غلظت هر یک از عناصر غذایی مورد ارزیابی در این پژوهش مانند ($N, P, K, \dots, Zn$) را نشان می‌دهد (Parent & Dafir, 1992).

سپس مراحل انجام محاسبه استانداردهای CND بترتیب معادلات زیر انجام گردید:

۱- میانگین هندسی عناصر غذایی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$G = [N.P.K \dots R]^{\frac{1}{d+1}} \quad (2)$$

۲- نسبت لگاریتم طبیعی عناصر از طریق روابط ذیل بدست آمد.

$$V_X = \log[x_i/g(x)] \quad (3)$$

$$V_N = \ln\left(\frac{N}{G}\right), V_P = \ln\left(\frac{P}{G}\right), V_K = \ln\left(\frac{K}{G}\right), \dots, V_{Rd} = \ln\left(\frac{R}{G}\right) \\ V_N + V_P + V_K + V_R = 0 \quad (4)$$

نسبت لگاریتمی عناصر با V_X برای عناصر X نشان داده می‌شود. رابطه (۴) صحت محاسبات را تأیید می‌کند. مجموع ترکیبات گیاهی بر اساس ۱۰۰ است و مجموع نسبت لگاریتمی عناصر و ترکیبات باقیمانده (R) طبق تعریف صفر است. V_X وضعیت و نسبت عناصر

نتایج و بحث

با توجه به ویژگی‌های خاک نشان داده شده در جدول ۱ خاک مزارع مورد مطالعه دارای متوسط درجه شوری $1/6 \text{ ds m}^{-1}$ و متوسط اسیدیته $7/66$ بوده که برای رشد گیاه نیشکر فاقد محدودیت می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که متفاوت بودن اجزاء بافت خاک (شن، سیلت و رس) برخی از مزارع دارای ۵۰ درصد رس و برخی مزارع دارای ۵ درصد شن نشان‌دهنده وجود بافت متفاوت در مزارع مورد مطالعه است که می‌تواند روی عملکرد محصول نیشکر تأثیرگذار باشد و در فراهمی و ایجاد تعادل بین عناصر غذایی اختلالاتی بوجود بیاورد. نتایج اندازه‌گیری درصد ماده آلی خاک نشان داد که اکثر مزارع مورد مطالعه خصوصاً مزارع با عملکرد کم از فقر ماده آلی برخوردار بوده است که این امر می‌تواند بدلیل اقلیم گرم منطقه و اکسیداسیون سریع ماده آلی خاک باشد. نتایج نشان داد که خاک مزارع مورد مطالعه دارای مقادیر بسیار کمی از عناصر کم‌مصرفی است که از عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد نیشکر است.

نتایج میانگین عناصر غذایی مورد ارزیابی حاصل از تجزیه نمونه‌های برگ نیشکر در جدول ۲ نشان داده شده است. به‌منظور برآورد عملکرد میانی و انجام ارزیابی و تفسیر نتایج غلظت عناصر غذایی برگ نیشکر مزارع مورد مطالعه در مرحله اول با توجه به نتایج عناصر غذایی مورد ارزیابی بدست آمده، نقاط عطف (عملکرد حدواسط یا میانی) از حل مشتق دوم معادله درجه ۳ (رابطه ۹) محاسبه شد و در جدول ۳ گزارش گردید.

با توجه به جدول ۳ بیشترین مقادیر عملکرد نیشکر مربوط به عنصر آهن با مقدار ۱۱۷ تن در هکتار و عنصر نیتروژن برابر با ۱۰۸/۸۹ تن در هکتار و کمترین مقدار برابر ۷۸/۱۰ تن در هکتار مربوط به عنصر منگنز بود. مقدار بدست آمده برای عنصر روی بالاتر از مقادیر عملکرد مزارع مورد مطالعه بوده که در محاسبه عملکرد میانی لحاظ نشده و حذف گردید. بر این اساس مقدار ۹۹ تن در هکتار نیشکر بعنوان عملکرد میانی جهت تفکیک مزارع به دو گروه عملکردی مطلوب و نامطلوب در نظر گرفته شد.

می‌شوند. اگر غلظت عناصر غذایی در گیاه مورد مطالعه با غلظت ایده‌آل یا مقادیر CND استاندارد شود، شاخص عنصر غذایی CND را می‌توان برای عناصر K، P، N و R به شرح رابطه (۱۰) محاسبه کرد.

$$I_x = (V_x - V^*_{x}) / SD^*_{x} \quad (10)$$

بطور مثال برای عناصر P و N:

$$I_P = (V_P - V^*_P) / SD^*_P, \quad I_N = (V_N - V^*_N) / SD^*_N$$

عنصر K و عناصر باقی‌مانده:

$$I_R = (V_{Rd} - V^*_{Rd}) / SD^*_{Rd}, \quad I_K = (V_K - V^*_K) / SD^*_{K}$$

در این روابط $SD^*_K, SD^*_P, SD^*_N, V^*_{Rd}, V^*_{K}, V^*_{P}, V^*_{N}$

، SD^*_R به ترتیب میانگین و انحراف معیار نسبت لگاریتمی عناصر غذایی مزارعی می‌باشند که به‌عنوان مرجع استاندارد و یا ارقام مرجع CND محسوب می‌شوند. V_R, V_K, V_P, V_N نسبت لگاریتمی مربوط به نمونه مزارع مطالعاتی است. I_R, I_K, I_P, I_N به ترتیب شاخص عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر باقیمانده هستند. در روش CND غلظت یک عنصر نسبت به میانگین هندسی کل عناصر مورد ارزیابی و ترکیبات باقی‌مانده در نظر گرفته می‌شود (Parent & Daffir, 1992).

در روش CND شاخص تعادل عناصر غذایی r^2 با استفاده از رابطه (۱۱) زیر محاسبه می‌شود، جایی که r^2 نشان‌دهنده مجموع شاخص‌های مجذور عناصر غذایی است و می‌تواند صفر، مساوی یا بزرگتر از صفر باشد. در تئوری، مقدار کمتر r^2 نشان‌دهنده تعادل مطلوب‌تری از عناصر غذایی است (Ross, 1987).

$$r^2 = I^2_N + I^2_P + I^2_K + \dots + I^2_R \quad (11)$$

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل توصیفی داده‌ها برای تعیین ترتیب محدودیت عناصر غذایی N، P، K، Ca، Mg، Fe، Cu، Mn و Zn انجام شد. میانگین شاخص‌های مزارع با عملکرد مطلوب با استفاده از روش CND (Parent, 2011) در این طرح در نظر گرفته شد. کمبود، بیش بود و تعادل به ترتیب در سطوح منفی، مثبت و نزدیک به صفر شاخص CND شناسایی می‌شوند (Nowaki et al., 2017).

جدول ۲- میانگین غلظت عناصر غذایی مورد ارزیابی در برگ مزارع نیشکر راتون مورد مطالعه

Table 2- Average concentration of evaluated nutrients in leaves of the studied Raton sugarcane fields

منگنز Manganese	مس Copper	روی Zinc	آهن Iron	منیزیم Magnesium	کلسیم Calcium	پتاسیم Potassium	فسفر Phosphorus	نیتروژن Nitrogen
mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	%	%	%	%
58.95	4.25	113.96	202.36	0.34	0.23	0.63	0.13	1.67

جدول ۳- برآورد عملکرد میانی (نقطه عطف) براساس روش توابع تجمعی نسبت واریانس لگاریتمی عناصر غذایی $F_i^c(V_x)$
 Table 3- Estimation of intermediate performance (turning point) based on cumulative functions method of logarithmic variance ratio of food elements

عناصر غذایی Nutrients	معادله درجه ۳ $Fic(VX)=aY^3+bY^2+cY+d$	R^2	نقطه عطف (-b/3a) Ton ha ⁻¹
نیتروژن Nitrogen	$y = -0.0052x^3 + 1.6987x^2 - 183.82x + 6623.7$	0.88	108.89
فسفر Phosphorus	$y = 0.0012x^3 - 0.2956x^2 + 20.46x - 243.71$	0.96	82.11
پتاسیم Potassium	$y = 0.0018x^3 - 0.4662x^2 + 34.277x - 588.23$	0.93	86.33
کلسیم Calcium	$y = -0.007x^3 + 2.2525x^2 - 239.57x + 8466.7$	0.86	107.26
منیزیم Magnesium	$y = 0.0021x^3 - 0.5832x^2 + 49.371x - 1196.3$	0.97	92.57
آهن Iron	$y = -0.0022x^3 + 0.7722x^2 - 90.552x + 3545.1$	0.89	117.00
روی Zinc	$y = -0.0002x^3 + 0.1392x^2 - 25.526x + 1344.3$	0.98	232.00
مس Copper	$y = -0.0074x^3 + 2.3684x^2 - 251.97x + 8899.2$	0.87	106.68
منگنز Manganese	$y = 0.0007x^3 - 0.164x^2 + 8.0432x + 141.9$	0.97	78.10
ترکیبات باقی مانده R	$y = -0.0052x^3 + 1.7082x^2 - 185.45x + 6698.4$	0.95	109.50

(۹۹/۰ تن در هکتار) و تفکیک مزارع به دو گروه عملکردی، براساس غلظت عناصر مزارع گروه عملکردی مطلوب اعداد مرجع محاسبه شده ($V \times x$) در این پژوهش در **جدول ۴** نشان داده است. اعداد مرجع CND حاصل اثرات متقابل عناصر غذایی و تحت شرایط محیطی متفاوت بوده و براساس آن‌ها شاخص عناصر غذایی محاسبه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، میانگین بهینه غلظت عناصر مزارع گروه عملکردی مطلوب و نامطلوب در **جدول ۵** گزارش شده است.

به‌منظور ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای مزارع نیشکر راتون، شاخص CND برای تک تک عناصر غذایی با بدست آوردن اعداد مرجع، براساس رابطه (۱۰) نیز محاسبه شد. با توجه به نتایج بدست آمده از میان شاخص‌های CND در مزارع با عملکرد نامطلوب، اولویت‌بندی نیاز عناصر غذایی به‌ترتیب می‌باشد (شکل ۵). $Cu > Fe > Zn > Mg > Mn > Ca > K > P > N$

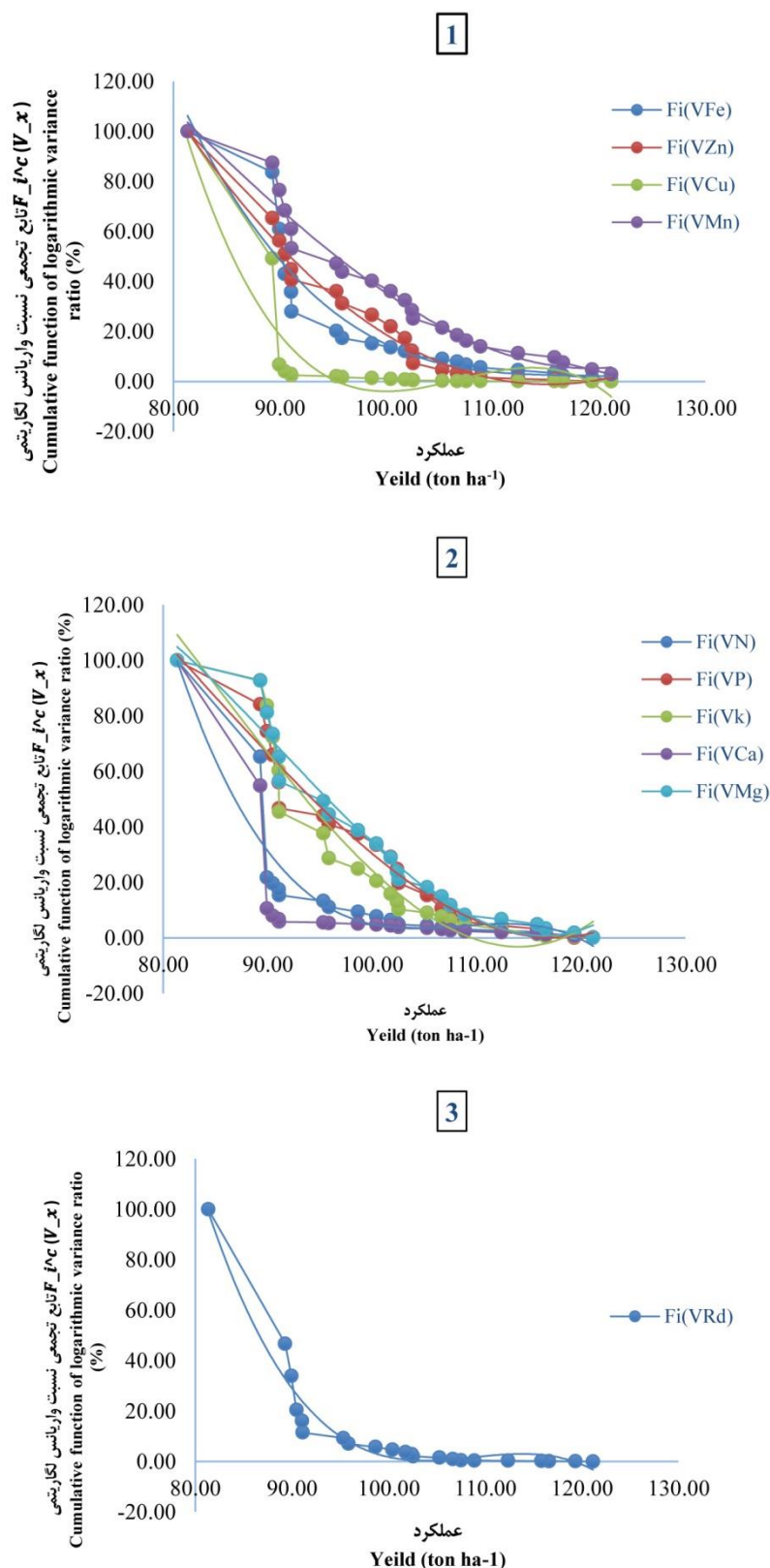
سپس در مرحله بعد با ترسیم نمودار تابع تجمعی نسبت واریانس در مقابل عملکرد مزارع برای تک تک عناصر غذایی مورد ارزیابی در این پژوهش عملکرد میانی نیز مشخص گردید (شکل ۴). براساس نتایج بدست آمده **جدول ۳** و **شکل ۴** در تفکیک مزارع به دو گروه عملکردی ۱- مطلوب و ۲- نامطلوب مشخص شد که ۱۳ مزرعه از ۲۵ مزرعه مورد مطالعه یعنی ۵۲ درصد مزارع نیشکر راتون از عملکرد مطلوبی برخوردار بوده و ۴۸ درصد مزارع یعنی ۱۲ مزرعه در گروه عملکردی نامطلوب قرار گرفتند.

محاسبه اعداد مرجع CND

در روش تشخیص چند گانه عناصر غذایی، غلظت عناصر غذایی در مزارع با عملکرد مطلوب به‌عنوان حد بهینه در نظر گرفته می‌شود (Khiari et al., 2001a). در نتیجه با در نظر گرفتن عملکرد میانی

جدول ۴- محاسبه اعداد مرجع CND
 Table 4- Calculation of CND reference numbers

اعداد مرجع CND	V*R	V*Mn	V*Zn	V*Cu	V*Fe	V*Mg	V*Ca	V*K	V*P	V*N
میانگین Mean	4.13	-3.53	-4.72	-3.92	-1.75	1.29	1.95	2.64	1.04	2.87
انحراف معیار Standard deviation	0.07	0.04	0.04	0.10	0.02	0.08	0.05	0.08	0.07	0.08



شکل ۴- ۱، ۲ و ۳ نمودار تابع تجمعی نسبت واریانس لگاریتمی عناصر غذایی و ترکیبات باقی مانده در مقابل عملکرد محصول نیشکر
Figure 4- 1, 2 & 3 Cumulative function diagram of the logarithmic variance ratio of food elements and remaining compounds against sugarcane yield

جدول ۵- مقایسه غلظت عناصر غذایی مورد ارزیابی مزارع نیشکر راتون (F) در دو گروه عملکردی مطلوب (A) و نامطلوب (B)
Table 5- Comparison of nutrient concentrations evaluated in Ratoon sugarcane fields (F) in two performance groups: favorable (A) and unfavorable (B)

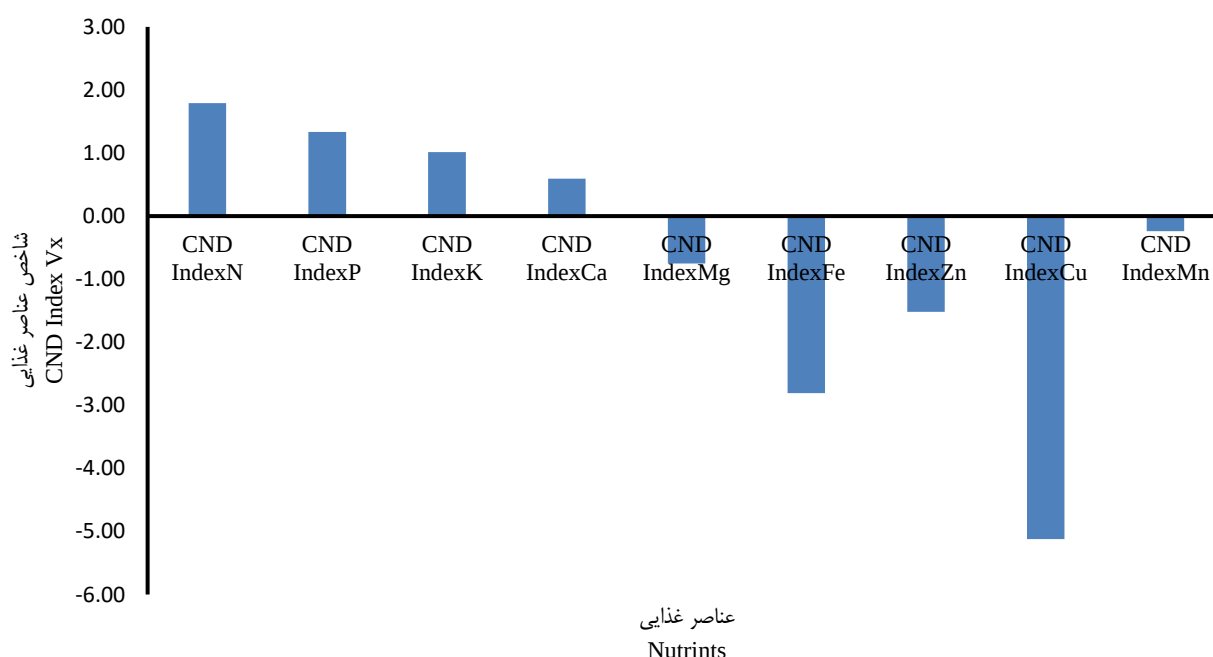
F	عملکرد Yeild	منگنز Manganese	مس Copper	روی Zinc	آهن Iron	منیزیم Magnesium	کلسیم Calcium	پتاسیم Potassium	فسفر Phosphorus	نیتروژن Nitrogen
		mg kg ⁻¹						%		
A	109.28	27.169	8.238	18.538	160.550	0.336	0.655	1.297	0.264	1.648
B	87.35	23.667	5.908	14.025	133.500	0.280	0.593	1.238	0.257	1.675

افزایش عملکرد اثرگذار نشان می‌دهد بطوری که این شاخص در مزارع گروه عملکردی مطلوب با میانگین ۱۰۹/۲۸ تن در هکتار در محدوده (۲/۲۶ تا ۲۰/۵۸) قرار داشته و بیشترین مقدار این شاخص (199.95) $(I^2 = ۷۳/۰۸)$ مربوط به مزرعه نیشکر با عملکرد ۷۳/۰۸ تن در هکتار است (شکل ۶).

نتایج پژوهشی انجام شده با مطالعات انجام شده به روش CND بر روی نیشکر در کشور برزیل توسط کالهیروس و همکاران (Calheiros et al., 2018)، سیلوا، پرادو، وادت و کایون (Silva, Prado, Wadt, Moda, & Caione, 2020) همچنین داسیلوا و همکاران (da Silva et al., 2021) نشان داد که مقدار شاخص تعادل عناصر غذایی در مدیریت‌های کودی مزارع نیشکر بیش از یک و مثبت بوده که نشان‌دهنده عدم تعادل عناصر غذایی است، مطابقت داشته و به نتایج مشابهی دست یافته است.

سپس مقدار شاخص تعادل عناصر غذایی (I^2) استفاده از روش کیت-نلسون بر اساس تابع توزیع آماری کای اسکوئر (K^2) با درجه آزادی ۱ + d رابطه (۱۱) مشخص شد و نتایج آن در جدول ۶ گزارش شده است. براساس شکل ۵ بیش بود عناصر غذایی به ترتیب شدت عبارت است از: نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و کمبود عناصر غذایی به ترتیب شدت شامل: مس، آهن، روی، منیزیم و منگنر در این پژوهش تشخیص داده شد.

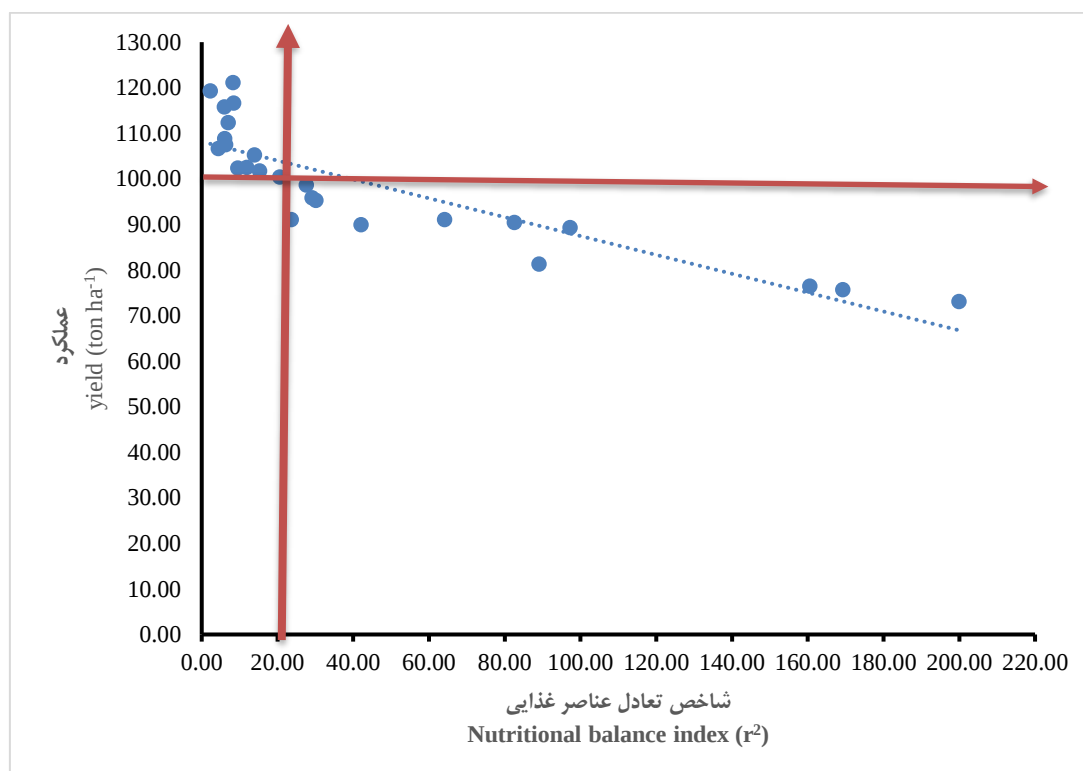
براساس نتایج جدول ۶ شاخص تعادل عناصر غذایی (I^2) نشان داد که مقدار عددی این شاخص با پایین آمدن مقدار عملکرد مزارع نیشکر نیز افزایش می‌یابد و هر چه مقدار عددی این شاخص بزرگتر باشد عدم تعادل عناصر غذایی را نشان می‌دهد در نتیجه عملکرد مزرعه کاهش می‌یابد اما هرچه این مقدار به سمت صفر میل داشته باشد تعادل عناصر غذایی برقرار بوده و مدیریت کوددهی را بر روی



شکل ۵- میانگین شاخص‌های CND عناصر غذایی مزارع نیشکر راتون با عملکرد نامطلوب
Figure 5- The average CND indices of nutrients of Ratoon sugarcane fields with unfavorable yield

جدول ۶- شاخص عناصر غذایی CND در مزارع نیشکر راتون با عملکرد نامطلوب
Table 6- Index of CND nutrients in Raton sugarcane fields with unfavorable yield

عملکرد Yield	CND IndexMn	CND IndexCu	CND IndexZn	CND IndexFe	CND IndexMg	CND IndexCa	CND IndexK	CND IndexP	CND IndexN	r ²
98.64	-0.87	-2.32	-1.25	1.97	-1.35	-1.68	2.75	1.47	0.00	27.60
95.85	-1.52	-4.07	-1.22	0.55	0.85	-0.22	-0.22	0.01	2.34	29.18
95.31	-0.61	-1.63	-0.70	-2.81	-2.18	-0.49	0.31	0.23	2.20	30.17
91.09	-0.75	-2.02	-0.85	0.43	0.06	-0.91	-1.68	0.82	0.48	23.63
91.04	-2.05	-1.56	-1.91	-6.59	2.14	-0.85	1.11	0.98	1.20	64.12
90.46	-0.93	-2.38	-1.55	-4.40	-2.83	-2.89	2.89	5.14	1.62	82.56
89.93	-0.09	-2.77	-0.61	-3.94	-2.04	0.61	0.96	-0.66	2.82	42.07
89.28	-0.12	-5.49	-1.59	-7.26	0.85	0.93	0.51	2.29	1.56	97.27
81.33	0.11	-7.05	-1.27	-0.96	-3.29	1.85	1.70	3.14	0.82	89.05
76.46	0.73	-10.63	-1.74	-2.91	-0.26	3.66	1.77	-1.14	2.74	160.57
75.69	1.00	-11.38	-2.47	-2.13	1.69	3.31	0.00	0.41	2.64	169.26
73.08	2.21	-10.15	-3.00	-5.59	-2.69	3.78	2.07	3.32	3.07	199.95



شکل ۶- میانگین شاخص های CND عناصر غذایی مزارع نیشکر راتون با عملکرد نامطلوب

Figure 6- The average CND indices of nutrients of Raton sugarcane fields with unfavorable yield

نتیجه گیری

اولویت نیاز به این عنصر جزء اولویت های آخر است. بنابراین توصیه های کودی تنها به استناد ویژگی های خاک کافی نیست و انجام تجزیه برگ در شناسایی و جلوگیری از بروز علائم کمبودهای پنهان حائز اهمیت است. در این پژوهش عملکرد ۹۹/۰ تن در هکتار بعنوان عملکرد حدواسط برای تفکیک گروه های عملکردی مطلوب و نامطلوب در نظر گرفته شد که با انجام تحلیل به روش CND نیز تأیید شد و براساس آن ۵۲ درصد مزارع نیشکر راتون در گروه عملکردی مطلوب و ۴۸ درصد مزارع در گروه عملکردی نامطلوب قرار گرفته اند. میانگین عملکرد در کل مزارع نیشکر راتون ۹۸/۷۵ تن در

این پژوهش نشان داد که با توجه به آزمون خاک کمبود نیتروژن، ماده آلی، فسفر و عناصر کم مصرف وجود دارد اما از نظر پتاسیم از وضعیت مناسب تری برخوردار است. همچنین وجود درصد آهک بالا در خاک سبب تثبیت فسفر در خاک ها و کم شدن مقدار قابل جذب فسفر شده است. اما ارزیابی وضعیت عناصر غذایی نشان داد که با وجود عدم کاربرد کودهای پتاسیمی در مدیریت کوددهی و با اینکه این عنصر از عناصر پرمصرف در گیاه نیشکر محسوب می شود اما

کوددهی هدفمند بر اساس تشخیص CND می‌تواند در دسترس بودن و جذب مواد مغذی را افزایش دهد و منجر به بهبود عملکرد و کیفیت نیشکر شود. علاوه بر این، روش CND کارایی خود را به‌عنوان یک ابزار تشخیصی قابل اعتماد نشان داده است که مداخلات به موقع و ترویج شیوه‌های کشاورزی پایدار را ممکن می‌سازد. تحقیقات آتی باید بر پایش بلندمدت و ادغام شیوه‌های بهداشتی خاک برای حفظ تعادل مواد مغذی و حمایت از انعطاف‌پذیری تولید نیشکر در استان خوزستان متمرکز شود. با اتخاذ این استراتژی‌های مبتنی بر شواهد، می‌توان بهره‌وری را بهینه کرد، از دوام اقتصادی اطمینان حاصل نمود و به توسعه پایدار صنعت نیشکر کمک کرد.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه (پژوهانه شماره SCU.AS1402.692) و از مدیریت محترم شرکت کشت و صنعت امام خمینی به خاطر پشتیبانی مالی در اختیار قرار دادن تمام امکانات لجستیکی و مزرعه ای تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

هکتار بوده و در مزارع گروه عملکردی مطلوب و نامطلوب به‌ترتیب ۸۷/۳۵ و ۱۰۹/۲۸ تن در هکتار بدست آمد. نتایج بدست آمده تا حدودی بیانگر مدیریت کوددهی نامتعادل بوده که با توجه به کار بردن دیگر منابع کودی می‌توان رشد و عملکرد مزارع نیشکر و افزایش چرخه آن را در منطقه بهبود بخشید. روش CND به‌دلیل لحاظ نمودن اثرات متقابل همه عناصر غذایی نسبت به روش‌های دیگر جامعیت بیشتری دارد. اعداد مرجع CND بدست آمده برای تشخیص اختلالات تغذیه‌ای و توصیه‌های کودی مورد قرار استفاده می‌گیرد و پیشنهاد می‌شود روش CND برای هر گیاه و منطقه مورد اعتبارسنجی قرار گیرد.

بطور کلی ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای نیشکر در اراضی شمالی استان خوزستان با استفاده از CND بینش قابل‌توجهی را در مورد نیازهای غذایی ضروری برای عملکرد بهینه محصول به‌دست آورده است. این مطالعه کمبود مواد مغذی خاص، به‌ویژه در درشت مغذی‌هایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم و همچنین عناصر کم‌مصرف ضروری برای فرآیندهای متابولیک را نشان داد. این یافته‌ها بر ضرورت یک استراتژی مدیریت مواد مغذی متناسب با شرایط منحصر به فرد خاک و آب و هوای منطقه تأکید می‌کند. اجرای

References

1. Bataglia, O.C., Furlani, A.M.C., Teixeira, J.P.F., Furlani, P.R., & Gallo, J.R. (1983). Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agrônômico. (Boletim Técnico, 78).
2. Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1982). Nitrogen-Total. p. 595–622. In: Page A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
3. Calheiros, L.C., Freire, F.J., Moura Filho, G., Oliveira, E.C., Moura, A.B., Costa, J.V., & Rezende, J.S. (2018). Assessment of nutrient balance in sugarcane using DRIS and CND methods. *Journal of Agricultural Science*, 10(9), 164-79. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n9p164>
4. da Silva, L.C., Freire, F.J., Filho, G.M., de Oliveira, E.C., Freire, M.B.G.D.S., Moura, A.B., & Rezende, J.S. (2021). Nutrient balance in sugarcane in Brazil: diagnosis, use and application in modern agriculture. *Journal of Plant Nutrition*, 44(14), 2167-2189. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1889591>
5. de Mello Prado, R., & Rozane, D.E. (2020). Leaf analysis as diagnostic tool for balanced fertilization in tropical fruits. *Fruit Crops*, 131-143. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00011-3>
6. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1982). Particle size Analysis. p. 404–408. In: Page, A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
7. Helmke, P.A., & Sparks, D.L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods, 5, 551-574.
8. Rahimi Jamnani, M., Liaghat, A., & Sadeghi Loyeh, N. (2019). Sugarcane yield prediction at farm scale using remote sensing and artificial neural network. In 11th World Congress on Water Resources and Environment: Managing Water Resources for a Sustainable Future-EWRA 2019. Proceedings.
9. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001a). The phosphorus compositional nutrient diagnosis range for potato. *Agronomy Journal*, 93(4), 815-819. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.934815x>
10. Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
11. Martín, I., Romero, I., Domínguez, N., Benito, A., & García-Escudero, A. (2016). Comparison of DOP and DRIS methods for leaf nutritional diagnosis of *Vitis vinifera* L., Cv. Tempranillo. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(3), 375–86. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1123720>
12. McCray, J.M., & Mylavarapu, R. (2020). Sugarcane Nutrient Management Using Leaf Analysis: SS-AGR-335/AG345, 2/2020. EDIS, 2020(11).

13. Montañés, L., Heras, L., Abadía, J., & Sanz, M. (1993). Plant analysis interpretation based on a new index: Deviation from optimum percentage (DOP). *Journal of Plant Nutrition*, 16, 1289–308.
14. Murphy, J.A.M.E.S., & Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
15. 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.
16. Nelson, R.E. (1982). Carbonate and Gypsum. p. 181–196. In: Page A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
17. Nowaki, R.H., Parent, S.É., Cecílio Filho, A.B., Rozane, D.E., Meneses, N.B., Silva, J.A., Natale, W., & Parent, L.E. (2017). Phosphorus over-fertilization and nutrient misbalance of irrigated tomato crops in Brazil. *Frontiers in Plant Science*, 8, 825. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00825>
18. Olsen, S.R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
19. Parent, L.E., & Dafir, M. (1992). A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(2), 239-242.
20. Parent, L.-É. (2011). Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. *Revista Brasileira De Fruticultura*, 33(1), 321–34. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000100041>
21. Pereira da Silva, G., & Justino Chiaia, H.L. (2021). Limitation due to nutritional deficiency and excess in sugarcane using the Integral Diagnosis and Recommendation System (DRIS) and Nutritional Composition Diagnosis (CND). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(12), 1458 -1467.
22. Prado, R.M., & Caione, G. (2012). Plant analysis, *Soil Fertility*, 115–34. <https://doi.org/10.5772/53388>
23. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 417-435.
24. Ross, S.M. (1987). *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, New York, NY.
25. Salman, M., Inamullah, Jamal, A., Mihoub, A., Saeed, M.F., Radicetti, E., & Pampana, S. (2023). Composting sugarcane filter mud with different sources differently benefits sweet maize. *Agronomy*, 13(3), 748. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030748>
26. Segato, S.V., A.S. Pinto, E., & Jendiroba, J.C.M. (2006). Nóbrega. *Atualização em produção de cana-de-açúcar*, 415. Piracicaba: PROL.
27. Silva, G.P., Prado, R.D.M., Wadt, P.G.S., Moda, L.R., & Caione, G. (2020). Accuracy of nutritional diagnostics for phosphorus considering five standards by the method of diagnosing nutritional composition in sugarcane. *Journal of Plant Nutrition*, 43(10), 1485–97. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1730902>
28. Zhao, D., Glaz, B., & Comstock, J.C. (2014). Physiological and growth responses of sugarcane genotypes to nitrogen N rate on a sand soil. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200, 290-301. <https://doi.org/10.1111/jac.12084>

Evaluation of Regression and Intelligent Models for Estimating Mean Weight Diameter of Wet Aggregates

Sh. Asghari^{1*}, K. Heidari², M. Hasanpour Kashani³, H. Shahab Arkhazloo⁴

1, 2 and 4- Professor, Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: shasghari@uma.ac.ir)

3- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 03-12-2024

Revised: 31-12-2024

Accepted: 12-01-2025

Available Online: 12-01-2025

How to cite this article:

Asghari, Sh., Heidari, K., Hasanpour Kashani, M., & Shahab Arkhazloo, H. (2025). Evaluation of regression and intelligent models for estimating mean weight diameter of wet aggregates. *Journal of Water and Soil*, 38(6), 749-764. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.2025.91071.1454>

Introduction

The study of soil mean weight diameter (MWD) of wet aggregates that is important for sustainable soil management, has recently received much attention. As the prediction of MWD is challenging, laborious, and time-consuming, there is a crucial need to develop a predictive estimation method to generate helpful information required for the soil health assessment to save time and cost involved in soil analysis. Therefore, it is useful to use different models such as multiple linear regression (MLR) and intelligent models including artificial neural network (ANN) and gene expression programming (GEP) to estimate MWD of wet aggregates through easily accessible and low-cost soil properties. The objectives of this study were (1) to creating MLR, ANN and GEP models for predicting MWD from the easily measurable soil variables in forest, range and cultivated lands of the Fandoghloo region of Ardabil province, (2) to compare the precision of the mentioned models in the prediction of MWD of wet aggregates using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean error (ME) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) criteria.

Materials and Methods

Disturbed and undisturbed soil samples ($n = 80$) were nearly systematically taken from 0-10 cm depth with nearly 50 m distance in forest ($n = 20$), range ($n = 23$) and cultivated ($n = 37$) lands of the Fandoghloo region of Ardabil province, Iran (lat. $38^\circ 24' 10''$ to $38^\circ 24' 25''$ N, long. $48^\circ 32' 45''$ to $48^\circ 33' 5''$ E) in summer 2023. The contents of sand, silt, clay, CaCO_3 , pH, EC, bulk (BD) and particle (PD) density, organic carbon (OC), geometric mean diameter (GMD) of dry aggregates were determined in the laboratory using standard methods. Total porosity (n) was calculated using BD and PD data ($n = 1 - \text{BD}/\text{PD}$). The mean geometric diameter (d_g) and geometric standard deviation (σ_g) of soil particles were computed by sand, silt and clay percentages. The mean weight diameter (MWD) of wet aggregates was measured in the aggregates smaller than 4.75 mm by wet sieving equipment using sieves with 2, 1, 0.5, 0.25 and 0.106 mm pore diameter. All data were randomly divided into two series as 60 data for training and 20 data for testing of models. The SPSS 22 software with the stepwise method, MATLAB and Gene Xpro Tools 4.0 software were used to derive multiple linear regression (MLR), artificial neural network (ANN) and gene expression programming (GEP) models, respectively. A feed forward three-layer (9, 8, 6 and 6 neurons in the hidden layer) perceptron network and the tangent sigmoid transfer function were used for the ANN modeling. A set of optimal parameters were chosen before developing the best GEP model. The number of chromosomes and genes, head size and linking function were selected by the trial and error method, and they are 30, 3, 8, and +, respectively. The rates of genetic operators were chosen according to literature studies. The



©2024 The author(s). 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.2025.91071.1454>

precision of MLR, ANN and GEP models in predicting MWD of wet aggregates were evaluated by the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean error (ME) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) statistics.

Results and Discussion

The values of sand (13.14 to 64.79 %), silt (21.11 to 74.96 %), clay (3 to 42.18 %), OC (1.01 to 7.17 %), PD (2.00 to 2.67 g cm⁻³), n (0.39 to 0.87 cm³ cm⁻³), GMD of dry aggregates (0.8 to 1.33 mm) and MWD of wet aggregates (0.35 to 2.65 mm) showed good variations in the soils of the studied region. The studied soils had clay loam (n= 11), sandy clay loam (n= 6), sandy loam (n= 12), loam (n= 13), silty clay loam (n= 14), silty clay (n= 1) and silt loam (n= 23) textural classes. There were found significant correlations between MWD with OC ($r=0.67^{**}$), sand ($r=0.70^{**}$), GMD ($r=0.30^{**}$) and PD ($r=-0.46^{**}$). Also, significant and positive correlation was found between OC and sand ($r=0.59^{**}$). Due to the multicollinearity of sand with d_g ($r=0.87^{**}$), we did not use the d_g as an input variable to estimate MWD of wet aggregates. Generally, four MLR, ANN and GEP models were constructed to predict MWD of wet aggregates from measured readily available soil variables. The results of MLR, ANN and GEP models indicated that the most suitable variables to estimate MWD of wet aggregates were sand, OC and GMD of dry aggregates. The values of R^2 , RMSE, ME and NS criteria were obtained equal 0.52, 0.48 mm, 0.13 mm and 0.48, and 0.85, 0.30 mm, 0.03 mm and 0.78, 0.79, 0.35 mm, -0.10 mm, 0.95 for the best MLR, ANN and GEP models in the testing data set, respectively. Many researchers also reported that there is a positive and significant correlation between MWD of wet aggregates and OC.

Conclusion

The results showed that sand, OC and GMD of dry aggregates were the most important and readily available soil variables to predict the mean weight diameter (MWD) of wet aggregates in the Fandoghloo region of Ardabil province. According to the lowest values of RMSE and the highest values of R^2 and NS, the precision of ANN models to predict MWD of wet aggregates was more than MLR and GEP models in this study. Because ANN is more flexible and effectively captures non-linear relationships, it performed better than the other models in predicting MWD.

Keywords: Aggregate stability, Artificial neural network, Gene expression programming, Sloped lands, Soil pedotransfer functions

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۳، ص. ۷۴۹-۷۶۴

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی و هوشمند برای برآورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر

شکراه اصغری^{۱*} - کیمیا حیدری^۲ - مهسا حسنیپور کاشانی^۳ - حسین شهاب آرخازلو^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

چکیده

اندازه‌گیری مستقیم میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک، کاری وقت‌گیر و پرهزینه است. هدف پژوهش حاضر مقایسه دقت مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و دو مدل هوشمند شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در برآورد MWD از روی متغیرهای زود یافت و سه‌ل الوصول خاک بود. برای این منظور، ۸۰ نمونه خاک سطحی دست‌خورده و دست‌نخورده از عمق صفر تا ۱۰ cm اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی استان اردبیل جمع‌آوری شد. سپس برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زود یافت آن‌ها و میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر مطابق روش‌های معمول و استاندارد تعیین گردید. داده‌ها به‌طور تصادفی به دو مجموعه آموزشی (۶۰ داده) و آزمونی (۲۰ داده) تقسیم گردید. مدل‌های ANN، MLR و GEP به‌ترتیب با به‌کارگیری نرم‌افزارهای SPSS، MATLAB و Gene Xpro Tools ایجاد شدند. نتایج نشان‌دهنده همبستگی مثبت و معنی‌دار ($r^2 = 0.59^{**}$) بین شن و کربن آلی خاک بود. شن، کربن آلی و میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌های خشک از مهمترین متغیرهای ورودی مدل‌ها در برآورد MWD خاکدانه‌های تر بودند. براساس داده‌های آزمونی، مقادیر ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برابر ۰/۵۲، ۰/۴۸ mm، ۰/۱۳ mm، ۰/۴۸ mm و ۰/۸۵، ۰/۳۰ mm، ۰/۷۸ mm و ۰/۷۹ mm، ۰/۳۵ mm، ۰/۱۰ mm و ۰/۹۵ mm به‌ترتیب در بهترین مدل ANN، MLR و GEP به‌دست آمد. بنابراین مدل MLR در مقایسه با مدل‌های هوشمند از دقت کمتری و خطای بیشتری در برآورد MWD برخوردار بود؛ مدل ANN به علت داشتن R^2 و NS بالا و RMSE پایین توانست در مقایسه با دو مدل دیگر، MWD خاکدانه‌های تر را با دقت زیاد و خطای کم در منطقه مورد مطالعه تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی: ارضی شیبدار، توابع انتقالی خاک، برنامه‌ریزی بیان ژن، پایداری خاکدانه، شبکه عصبی مصنوعی

مقدمه

بررسی پایداری خاکدانه‌ها در آب، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر^۵ (MWD) می‌باشد. اندازه‌گیری مستقیم MWD (روش الک تر) در آزمایشگاه کاری پر زحمت، وقت‌گیر و گران می‌باشد. در دهه‌های اخیر، توابع انتقالی^۶ (PTFs) متعددی برای برآورد MWD از روی متغیرهای زود یافت و سه‌ل الوصول خاک مانند شن، سیلت، رس،

اطلاع از وضعیت پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک از نظر مدیریت آب و خاک به‌ویژه در اراضی شیبدار که در معرض فرسایش قرار دارند حائز اهمیت است. یکی از شاخص‌های مهم و با ارزش برای

۱، ۲ و ۴- به‌ترتیب استاد، دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
 (*- نویسنده مسئول: Email: shasghari@uma.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

MWD، مدل هوشمند نروفازی ($R^2 = 0.97$) نسبت به مدل MLR ($R^2 = 0.90$) از ضریب تبیین بالاتر و در نتیجه دقت بیشتری برخوردار بود. اصغری و همکاران (Asghari et al., 2021) از مدل‌های MLR، ANN و نروفازی برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر در اراضی متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه استفاده کردند. نتایج نشان داد کربن آلی، شن و نسبت جذبی سدیم مهم‌ترین متغیرهای زود یافت در برآورد MWD بودند همچنین مدل ANN به دلیل داشتن خطای کم در مقایسه با توابع رگرسیونی و نروفازی از دقت بیشتری در برآورد MWD تر برخوردار بود. سرکار و همکاران (Sarkar et al., 2023) از مدل‌های رگرسیونی (MLR) و هوشمند شامل ANN، ماشین بردار پشتیبان^۵ (SVM)، درخت تصمیم‌گیری^۶ (RT) و جنگل تصادفی^۷ (RF) برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر از روی شن، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری، بعد فراکتالی، کربن آلی و گلومالین در ۱۲۱ نمونه خاک منتخب از کشور هندوستان استفاده کردند؛ نتایج نشان داد که مدل MLR از دقت کمتری در برآورد MWD در مقایسه با سایر مدل‌های هوشمند برخوردار بود در حالی که مدل SVM دارای بیشترین دقت در تخمین MWD در بین مدل‌های مورد مطالعه بود. اخیراً از مدل GEP نیز به عنوان یک روش هوشمند در برآورد برخی ویژگی‌های دیر یافت خاک استفاده شده است؛ به عنوان مثال، احمدزاده کلپور و فولاد پناه (Ahmadzadeh Kaleibar & Fuladipناه, 2023) گزارش کردند که مدل GEP در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی توانست رطوبت‌های ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی را با دقت بالایی تخمین بزند. نتایج پژوهش زانگ و زانگ (Zhang & Zhangeh, 2024) نیز نشان داد که مدل GEP در مقایسه با سایر مدل‌های هوشمند و روابط ریاضی توانست ضریب نفوذپذیری خاک را با دقت بیشتر و خطای کمتر (R^2 برابر با ۰/۹۴ و RMSE برابر با ۰/۰۰۴۸) برآورد نماید.

بررسی منابع نشان داد مدل‌های MLR و ANN متعددی برای برآورد شاخص‌های پایداری خاکدانه در ایران و جهان ارائه شده است ولی واقعیت آن است که به دلیل تغییرپذیری بالای مکانی و زمانی شاخص‌های پایداری ساختمان خاک، مدل‌های مذکور اغلب برای اراضی مناطق مورد مطالعه کارایی لازم را دارند و کاربرد آن‌ها برای خاک‌های سایر مناطق اقلیمی نیاز به راستی‌آزمایی دارد؛ از سوی دیگر، براساس اطلاعات موجود و در دسترس، تاکنون از مدل GEP برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر به‌ویژه در اراضی شیبدار منطقه فندقلوی اردبیل استفاده نگردیده است لذا پژوهش حاضر از این نظر دارای نوآوری می‌باشد. اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلو

کربن آلی و آهک در مناطق مختلف اقلیمی ایران (Alijanpour Shalmani et al., 2011; Amirabedi et al., 2016; Asghari et al., 2019; Marashi et al., 2021) و جهان (Sarkar et al., 2023) ارائه گردیده است.

توابع انتقالی متعددی بر مبنای مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه^۱ (MLR)، شبکه عصبی مصنوعی^۲ (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن^۳ (GEP) برای برآورد متغیرهای دیر یافت و پرهزینه خاک از روی متغیرهای زود یافت و کم‌هزینه خاک ارائه گردیده است؛ اکثر محققان گزارش کرده‌اند که در بین مدل‌های تخمین‌گر، توابع MLR به علت در نظر نگرفتن روابط غیرخطی بین متغیرهای ورودی (زود یافت) و خروجی (دیر یافت) از عملکرد ضعیفی برخوردار هستند (Bhattacharya et al., 2021; Sarkar et al., 2023). با توجه به این‌که داده‌های واقعی در مقیاس جهانی، عمدتاً غیرخطی هستند لذا مدل‌های هوشمند همانند ANN و GEP بر مبنای روش‌های ماشین یادگیری و تشخیص الگو عمل نموده و قادر به شناسایی بهتر روابط غیرخطی بین متغیرهای زود یافت و دیر یافت خاک هستند.

علی‌جانپور شلمانی و همکاران (Alijanpour Shalmani et al., 2011) از مدل‌های MLR و ANN برای برآورد میانگین هندسی قطر^۴ (GMD) خاکدانه‌های خشک در اراضی جنگلی استان گیلان استفاده کردند. نتایج بیانگر آن بود که مدل ANN به علت داشتن ضریب تبیین بالا و خطای پایین در مقایسه با مدل MLR از دقت بالاتری برخوردار بود و pH، جرم مخصوص حقیقی، سیلت و مقاومت مکانیکی خاک به عنوان مناسب‌ترین متغیرهای ورودی تعیین گردیدند. نتایج پژوهش امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2016) در دشت اردبیل نشان داد که مدل ANN نسبت به مدل MLR توانست MWD خاکدانه‌های تر را با دقت بالاتری برآورد نماید و رس، کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری به عنوان بهترین متغیرهای ورودی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. اصغری و همکاران (Asghari et al., 2017) گزارش نمودند استفاده از بعد فراکتالی خاکدانه^۵ در ورودی مدل‌های MLR و ANN موجب افزایش دقت تخمین MWD خاکدانه‌های تر (مرحله آموزش) در اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی منتخب از استان اردبیل گردید همچنین مدل ANN ($R^2 = 0.95$) در مقایسه با مدل MLR ($R^2 = 0.85$) دارای ضریب تبیین بالاتری بود. مرعشی و همکاران (Marashi et al., 2019) از رس، pH، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و بعد فراکتالی خاکدانه‌ها به عنوان متغیرهای ورودی برای تخمین MWD خاکدانه‌های تر در استان آذربایجان شرقی استفاده کردند. نتایج بیانگر آن بود که در برآورد

5- Fractal dimension
6- Support vector machine
7- Regression tree
8- Random forest

1- Multiple linear regression
2- Artificial neural network
3- Gene expression programming
4- Geometric mean diameter

استوانه‌های استیل (Blake & Hartge, 1986a) و جرم مخصوص حقیقی (PD) به روش پیکنومتر (Blake & Hartge, 1986b) اندازه‌گیری شد. میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌ها به روش الک خشک در ۵۰ گرم خاک هواخشک گذرانده شده از الک ۴/۷۵ میلی‌متر با استفاده از دستگاه شیکر الک خشک و با به‌کارگیری الک‌های با قطر سوراخ به‌ترتیب از بالا به پایین ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ میلی‌متر اندازه‌گیری و محاسبه گردید (Kemper & Rosenau, 1986).

میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر در ۵۰ گرم خاک هواخشک گذرانده شده از الک ۴/۷۵ میلی‌متر با استفاده از دستگاه شیکر الک‌تر با شدت ۳۰ نوسان در دقیقه و مدت ۵ دقیقه در داخل سطل‌های بزرگ آب تعیین گردید. به‌این ترتیب که، MWD خاکدانه‌های تر با به‌کارگیری الک‌های با قطر سوراخ به‌ترتیب از بالا به پایین ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ میلی‌متر پس از تصحیح به وزن شن بر حسب میلی‌متر از رابطه زیر محاسبه گردید (Yoder, 1936).

$$MWD = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{R-s}{m_d-s} \right) i \times d_i \quad (1)$$

در این رابطه، R وزن آون خشک خاکدانه‌ها و شن‌های مانده بر روی الک ۱ام (گرم)، S وزن مجموع شن‌ها (گرم)، m_d وزن آون خشک (گرم) و d_i میانگین قطر سوراخ دو الک متوالی است. لازم به توضیح است که MWD روش الک تر، پایداری خاکدانه‌ها در آب را نشان می‌دهد که برای تعیین آن حدود سه روز زمان لازم است در حالی که برای تعیین GMD روش الک خشک در حدود یک ساعت زمان لازم است.

قبل از اجرای فرآیند مدل‌سازی داده‌ها به روش‌های رگرسیونی و هوشمند، آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها به روش کولموگروف-اسمیرنوف^۴ و نیز محاسبات مربوط به آمار توصیفی و ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرها در نرم‌افزار SPSS 22 انجام گرفت؛ آزمون نرمال بودن نشان داد همه داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار هستند. اشتقاق مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه (MLR) بین متغیرهای زودپافت خاک با متغیر دیرپافت (MWD خاکدانه‌های تر) به روش گام به گام^۵ در نرم‌افزار SPSS 22 انجام شد. در مجموع، بر اساس روش گام به گام چهار نوع مدل MLR بین متغیرهای ورودی (زودپافت) و خروجی (دیرپافت) تشخیص داده شد.

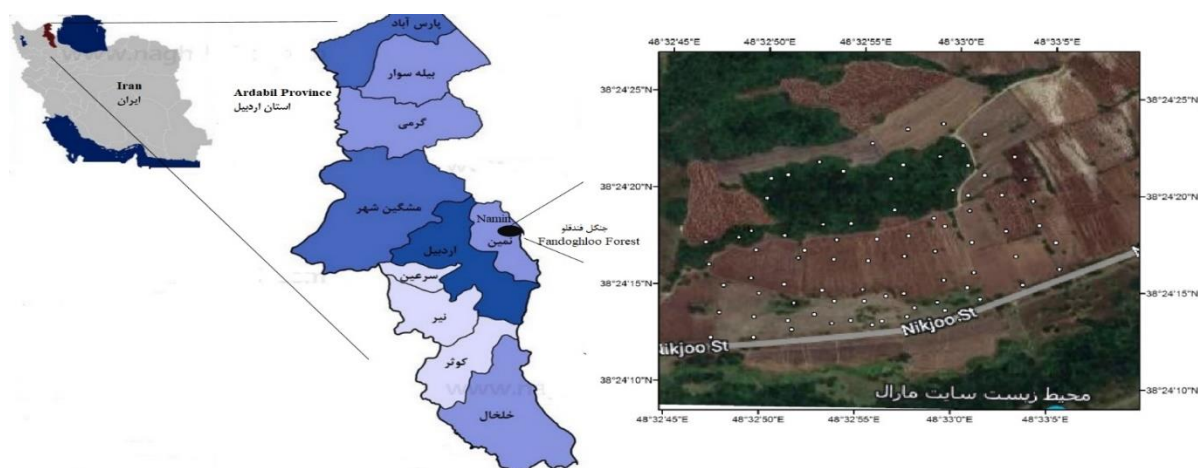
به‌علت شبیدار بودن، تردد کنترل نشده گردشگر در فصول معتدل و گرم سال، چرای بی‌رویه دام‌های سنگین (گاو و گاومیش) و شخم موازی شیب توسط کشاورزان محلی در معرض فرسایش و تخریب شدید قرار دارند لذا ایجاد مدل‌های رگرسیونی و هوشمند برای برآورد پایداری خاکدانه در آب و نیز ارزیابی دقت مدل‌های مذکور به‌منظور اعمال روش‌های مدیریتی صحیح آب و خاک در منطقه مذکور ضروری به‌نظر می‌رسد. اهداف پژوهش حاضر عبارت بودند از (۱) ارائه مدل‌های ANN، MLR و GEP برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر از روی متغیرهای زودپافت خاک در اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی مجاور هم منطقه فندقلوی استان اردبیل (۲) مقایسه و ارزیابی دقت مدل‌های مذکور در برآورد MWD خاکدانه‌های تر با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، میانگین خطا^۲ (ME) و ضریب نش-سانتکلیف^۳ (NS).

مواد و روش‌ها

تعداد ۸۰ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری اراضی شبیدار و مجاور هم شامل: کاربری‌های جنگلی (۲۰ نمونه)، مرتعی (۲۳ نمونه) و زراعی (۳۷ نمونه) منطقه فندقلوی اردبیل با ثبت مختصات جغرافیایی نقاط در فواصل حدود ۵۰ متری و به‌طور تقریباً منظم در تابستان ۱۴۰۲ برداشته شد (شکل ۱). نمونه‌برداری خاک در هر نقطه به دو صورت دست‌خورده (با احتیاط کامل و کمترین تخریب خاکدانه‌ها) با استفاده از بیلچه و دست‌نخورده (استوانه‌های استیل به قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) با استفاده از نمونه‌بردار دستی انجام گرفت. نمونه‌های خاک در آزمایشگاه هواخشک شدند سپس مقداری از آن‌ها برای تعیین میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر و نیز میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌های خشک جدا گردیده و باقیمانده خاک پس از خرد شدن به‌منظور اندازه‌گیری سایر متغیرهای خاک از الک ۲ mm عبور داده شد. درصد ذرات شن، سیلت و رس (کلاس بافت خاک) به روش هیدرومتری چهار قرائته (Gee & Or, 2002) اندازه‌گیری شد سپس متغیرهای میانگین هندسی قطر (d_g) و انحراف استاندارد هندسی (σ_g) ذرات خاک از روی درصد ذرات خاک و با استفاده از روابط ارائه شده توسط شیرازی و بورسما (Shirazi & Boersma, 1984) محاسبه گردید. اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱ به ۲/۵ خاک به آب و آهک به روش تیتراسیون با اسید و سود اندازه‌گیری شد (Page, 1985) کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1982) تعیین گردید. جرم مخصوص ظاهری (BD) به روش نمونه دست‌نخورده در

4- Kolmogorov- Smearnové
5- Stepwise method

1- Root mean square error
2- Mean error
3- Nash-Sutcliffe coefficient



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه توزیع نقاط نمونه‌برداری در تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Geographic position and distribution map of sampled points in satellite image of the studied area

برنامه‌ریزی ژنتیک ترکیب می‌شوند (Ferreira, 2001). جزئیات بیشتر در مورد فرایند اجرای مدل GEP در تحقیق زانگ و زانگ (Zhang & Zhang, 2024) بیان شده است. در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی MWD خاکدانه‌های تر به روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) از نرم‌افزار Gene Xpro Tools 4.0 استفاده گردید. در این نوع مدل‌سازی یک سری عملگرهای ریاضی از قبیل جمع، تفریق، ضرب، تقسیم، ریشه دوم، ریشه سوم، لگاریتم طبیعی، لگاریتم نپری، توان دوم و توان سوم به کار گرفته شد. جدول ۱، مقادیر انتخابی پارامترهای لازم برای اجرای مدل GEP را نشان می‌دهد.

در هر سه روش مدل‌سازی MLR، ANN و GEP از کل ۸۰ داده برای هر متغیر، بعد از تصادفی کردن کل داده‌ها در نرم‌افزار اکسل، ۶۰ داده برای آموزش مدل و ۲۰ داده برای آزمون مدل در نظر گرفته شد. برای ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های MLR، ANN و GEP در برآورد MWD خاکدانه‌های تر از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) (Ghorbani et al., 2019) استفاده گردید.

برای ایجاد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، از همان متغیرهای ورودی در چهار مدل MLR استفاده گردید. برای این منظور، شبکه پرسپترون سه لایه (ورودی، پنهان و خروجی) با الگوریتم پس انتشار خطا و ۱۰۰۰ تکرار برای رسیدن به حداقل خطا و حداکثر پایداری شبکه به کار گرفته شد و تعداد نرون‌های مناسب به روش سعی و خطا در لایه پنهان برای چهار مدل شبکه عصبی به ترتیب برابر ۹، ۸، ۶ و ۶ انتخاب گردید. نرون‌های پنهان داخل شبکه پرسپترون چند لایه، در هر لایه به نرون‌های لایه بعد متصل هستند. به منظور تجزیه و تحلیل ویژگی‌ها در داده‌های ورودی، توابع فعال‌سازی تانژانت سیگموئید و خطی به ترتیب در لایه‌های پنهان و خروجی هر چهار مدل به کار برده شد (Ghorbani et al., 2019). به منظور آموزش شبکه با دقت بالا از الگوریتم آموزشی مارکوارت-لونبرگ استفاده گردید.

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) یک الگوریتم توسعه‌یافته براساس برنامه‌ریزی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک می‌باشد و مبنای تمامی آنها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است که در آن کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت مشابه آنچه در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت مشابه با

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

Table 1- The values of GEP model parameters

مقادیر Values	عوامل ژنتیک Genetic factors	مقادیر Values	تنظیمات عمومی General adjustment
0.044	Mutation rate نرخ جهش	30	تعداد کروموزوم‌ها Number of chromosome
0.1	Inversion rate نرخ وارون‌سازی	8	اندازه سر Head size
0.3	one point recombination rate نرخ ترکیب تک نقطه‌ای	3	تعداد ژن‌ها Number of genes
0.3	two point recombination rate نرخ ترکیب دو نقطه‌ای	جمع (+)	تابع پیوند Linking function
0.1	Gene recombination rate نرخ ترکیب ژن	RMSE	معیار خطای تابع Fitness function error type

تخلخل کل خاک از ۳۹ تا ۶۲ و ۴۳ تا ۸۷ درصد بیانگر این موضوع می‌باشد. علاوه بر آن، از **جدول ۲** مشهود است که مقادیر متوسط متغیرها در مراحل آموزش و آزمون مدل‌ها تقریباً نزدیک هم بوده و به‌ترتیب برای MWD خاکدانه‌های تر ۱/۳ و ۱/۳۵ میلی‌متر، برای GMD خاکدانه‌های خشک ۱/۰۳ و ۱/۰۴ میلی‌متر، برای شن ۳۴/۰۸ و ۳۰/۸۱ درصد، برای کربن آلی ۲/۷۸ و ۲/۸۰ درصد و برای تخلخل کل خاک ۵۳ و ۵۴ درصد می‌باشد. مقادیر زیاد کربن آلی، MWD خاکدانه‌های تر و GMD خاکدانه‌های خشک در کاربری جنگلی به‌دلیل تجمع هر ساله لاشبرگ‌های درختان (عمدتاً فندق) و مقادیر کم متغیرهای مذکور در کاربری زراعی به علت اتلاف ماده آلی خاک در اثر فرسایش خاک ناشی از شخم اراضی شیبدار در منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. این نتایج با یافته‌های اصغری و همکاران (Asghari et al., 2016) در یک راستا می‌باشد؛ این محققان مقادیر متوسط کربن آلی خاک را ۶ و ۲/۲۴ درصد و MWD خاکدانه‌های تر را ۱/۲۸ و ۰/۳۵ میلی‌متر به‌ترتیب در کاربری‌های جنگلی و زراعی منطقه فندقلوی اردبیل گزارش کردند. کلاس بافت خاک‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر براساس درصدهای شن، سیلت و رس و طبق مثلث بافت آمریکایی، لوم سیلتی (n= ۲۳)، لوم رسی سیلتی (۱۴) (n= ۱۳)، لوم شنی (۱۲) (n= ۱۱)، لوم رسی (۱۱) (n= ۶) شنی (۶) (n= ۱) و رسی سیلتی (۱) (n= ۱) به‌دست آمد که مؤید توزیع نسبتاً خوب بافت خاک در داده‌های مورد مطالعه می‌باشد. مقایسه مقادیر متوسط شاخص‌های پایداری خاکدانه (MWD و GMD) و تخلخل کل خاک در پژوهش حاضر با یافته‌های محققان در سایر اراضی واقع در استان اردبیل بیانگر پایداری بیشتر ساختمان خاک و نیز تخلخل بالای خاک به‌علت برخورداری از پوشش گیاهی جنگلی و مرتعی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به‌طور مثال، امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2016) مقدار متوسط MWD خاکدانه‌های تر و تخلخل کل خاک را به‌ترتیب ۰/۵۰ میلی‌متر و ۴۷ درصد در اراضی دشت اردبیل (با فاصله حدود ۳۰ کیلومتر از محل پژوهش حاضر) گزارش نمودند.

جدول ۳ نشان می‌دهد براساس ضرایب همبستگی پیرسون (r)، همبستگی خطی قوی ($r > 0.60$) بین شن با سیلت و میانگین هندسی قطر ذرات (d_g)، سیلت با انحراف استاندارد هندسی ذرات (σ_g) و رس با d_g وجود دارد لذا برای پرهیز از همراستایی چندگانه^۱، این متغیرها به‌طور همزمان به‌عنوان ورودی مدل برای ایجاد مدل‌های MLR در برآورد MWD خاکدانه‌های تر به‌کار گرفته نشدند.

مقادیر بالای R^2 (نزدیک به ۱) بیانگر دقت بالای تخمین می‌باشد. از لحاظ آماری کمترین مقدار RMSE، صفر می‌باشد که در آن شرایط، مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی MWD باهم برابرند؛ هرچه مقدار RMSE کوچکتر باشد تخمین انجام شده توسط مدل برآورد کننده دقیق‌تر است. مقادیر مثبت ME بیش‌برآوردی و مقادیر منفی آن کم‌برآوردی مدل را نشان می‌دهد. اگر ضریب NS برابر یک باشد بیانگر آن است که مدل‌سازی با دقت بالایی انجام گرفته و مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی MWD برهم منطبق هستند؛ مقدار صفر NS نشان‌دهنده آن است که مقادیر تخمینی مدل با میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده دارای دقت یکسان می‌باشند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2}{n}} \quad (2)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{i(p)} - Y_{i(m)}}{n} \quad (3)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i(m)} - \bar{Y}_m)^2} \quad (4)$$

در معادلات ۲، ۳ و ۴، $Y_{i(p)}$ ، $Y_{i(m)}$ و $\bar{Y}_m$ به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری، برآورد شده و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده MWD توسط مدل و n تعداد داده‌ها برای MWD در هر مدل می‌باشد. از میان مدل‌های ایجاد شده برای برآورد MWD، بهترین مدل MLR، ANN و GEP با ترکیب متغیرهای ورودی در داده‌های آزمون، براساس آماره‌های مذکور تعیین شد. آزمون مدل‌ها در شناسایی دقت مدل به ازای داده‌هایی که در آموزش مدل به‌کار نرفته‌اند استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

توصیف آماری متغیرهای خاک

با توجه به **جدول ۲** مشاهده می‌شود که داده‌های به‌کار رفته در مراحل آموزش و آزمون مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) از توزیع نسبتاً مناسبی برخوردار هستند؛ این نکته از نظر ایجاد و ارزیابی مدل‌ها مهم تلقی می‌شود به‌عنوان مثال پراکنش نسبتاً وسیع داده‌ها به‌ترتیب در مراحل آموزش و آزمون برای MWD خاکدانه‌های تر از ۰/۳۵ تا ۲/۶۵ میلی‌متر و از ۰/۶۰ تا ۲/۵۰ میلی‌متر، برای GMD خاکدانه‌های خشک از ۰/۸۰ تا ۱/۳۳ میلی‌متر و از ۰/۸۹ تا ۱/۲۰ میلی‌متر، برای شن از ۱۳/۱۴ تا ۶۴/۸۰ درصد و ۱۵/۳۱ تا ۵۶/۳۵ درصد، برای کربن آلی از ۱/۰۱ تا ۷/۱۷ و ۱/۱۵ تا ۶/۵۵ درصد و برای

جدول ۲- آماره‌های توصیفی متغیرهای خاک در منطقه مورد مطالعه

Table 2- Descriptive statistics of soil variables in the studied area

متغیر Variable	آموزش Training				آزمون Testing			
	Min.	Max.	Mean	Sd.	Min.	Max.	Mean	Sd.
n ($\text{cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$)	0.39	0.62	0.53	0.05	0.43	0.87	0.54	0.09
PD (g cm^{-3})	2.01	2.67	2.43	0.15	2.03	2.68	2.41	0.16
Clay (%)	3.00	42.18	20.59	9.73	3.94	38.40	23.86	10.41
Silt (%)	21.12	65.20	45.33	13.10	23.38	74.97	45.32	11.91
Sand (%)	13.14	64.80	34.07	15.82	15.31	56.35	30.81	13.63
d _g (mm)	0.01	0.21	0.06	0.05	0.02	0.15	0.05	0.04
σ_g (-)	6.94	20.43	11.39	3.21	5.61	17.05	11.92	3.07
MWD (mm)	0.35	2.65	1.30	0.61	0.60	2.50	1.35	0.69
GMD (mm)	0.8	1.33	1.03	0.11	0.89	1.20	1.04	0.09
OC (%)	1.01	7.17	2.78	1.71	1.15	6.55	2.80	1.85
CaCO ₃ (%)	3.12	15.60	7.16	2.00	2.10	10.24	6.82	2.12
pH _{1:2.5}	5.45	7.34	6.28	0.39	5.68	7.09	6.38	0.41
EC _{1:2.5} (dS m ⁻¹)	0.02	1.08	0.15	0.17	0.04	0.80	0.13	0.16

PD: جرم مخصوص حقیقی (particle density)، Clay: رس، silt: سیلت، sand: شن، d_g: میانگین هندسی قطر ذرات (geometric mean diameter)، σ_g : انحراف استاندارد هندسی ذرات (geometric standard deviation)، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (mean weight diameter)، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌های خشک (geometric mean diameter)، OC: کربن آلی (organic carbon)، CaCO₃: کربنات کلسیم معادل، Sd: انحراف استاندارد، Mean: میانگین، Max: حداکثر، Min: حداقل.

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای مورد مطالعه (n=80)

Table 3- Pearson correlation coefficient (r) between studied variables (n=80)

Variable	MWD	GMD	Clay	Sand	Silt	OC	pH	EC	CaCO ₃	σ_g	d _g	PD
GMD	0.30**	1.00										
Clay	-0.48**	0.18 ^{ns}	1.00									
Sand	0.70**	0.11 ^{ns}	-0.55**	1.00								
Silt	-0.46**	-0.27*	-0.10 ^{ns}	-0.76**	1.00							
OC	0.67**	0.14 ^{ns}	-0.59**	0.59**	-0.24*	1.00						
pH	0.52**	0.06 ^{ns}	-0.24*	0.59**	-0.52**	0.33**	1.00					
EC	0.06 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	0.15 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.40**	1.00				
CaCO ₃	0.37**	0.02 ^{ns}	-0.28*	0.41**	-0.27*	0.39**	0.45**	0.14 ^{ns}	1.00			
σ_g	0.33**	0.36**	0.42**	0.41**	-0.83**	0.02 ^{ns}	0.37**	0.02 ^{ns}	0.04 ^{ns}	1.00		
d _g	0.57**	-0.30 ^{ns}	-0.71**	0.87**	-0.49**	0.55**	0.47**	0.18 ^{ns}	0.44**	0.01 ^{ns}	1.00	
PD	-0.46**	-0.08 ^{ns}	0.41**	-0.32**	0.06 ^{ns}	-0.58**	-0.22*	-0.11 ^{ns}	-0.28*	0.08 ^{ns}	-0.36**	1.00
n	-0.23*	-0.02 ^{ns}	0.08 ^{ns}	-0.22*	0.20 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	-0.30**	0.005 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	-0.16 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	0.19 ^{ns}

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد. توصیف علائم متغیرها در زیر جدول ۲ آورده شده است.

Variable symbols description is available under Table 2. *, **: Significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

صورت باید از مدل حذف شود.

نتایج مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) برای

برآورد میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر

چهار نوع مدل MLR برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر از

روی متغیرهای زودیافت خاک شامل شن، کربن آلی، GMD

خاکدانه‌های خشک و جرم مخصوص حقیقی (PD) مطابق روش گام

عامل تورم واریانس^۱ (VIF) از جمله روش‌های تشخیص

همراستایی چندگانه می‌باشد که بیانگر آن است واریانس ضرایب

برآوردی تا چه حد نسبت به حالتی که متغیرهای برآوردی همبستگی

خطی ندارند افزایش یافته است (Yazdani et al., 2014). تحلیل

هم‌خطی حداکثر تورم واریانس (VIF) چهار مدل MLR در جدول ۴

نشان می‌دهد که مقادیر VIF کمتر از ۵ هستند و بیشترین مقدار آن

در پژوهش حاضر ۲/۰۶ می‌باشد. به‌طور کلی، اگر آماره VIF برای

یک متغیر کمتر از ۵ باشد آن متغیر در مدل وارد می‌گردد در غیر این

1- Variance inflation factor (VIF)

MLR شماره ۴ نیز بیانگر آن است که با افزایش جرم مخصوص حقیقی خاک MWD خاکدانه‌های تر کاهش یافته است که علت آن را می‌توان به رابطه همبستگی منفی و معنی‌دار بین کربن آلی با PD ($r = -0.58^{**}$) نسبت داد؛ این نتیجه با یافته‌های علی‌جانپور شلمانی و همکاران (Alijanpour Shalmani et al., 2011) در یک راستا می‌باشد که گزارش کردند متغیر PD با علامت منفی در مدل‌های MLR برای برآورد GMD خاکدانه‌های خشک وارد گردید.

آماره‌های ارزیابی مدل‌های MLR برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر در جدول ۵ آورده شده است. این آماره‌ها شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) بودند. بر پایه نتایج مطالعات قبلی، فقط به کارگیری R^2 برای ارزیابی مدل‌ها شاید گول‌زننده باشد لذا R^2 بالا دلیل بر مطابقت کامل مقادیر اندازه‌گیری با مقادیر برآوردی MWD و کم بودن خطا نمی‌باشد (Kozak et al., 1996) لذا در این پژوهش ارزش‌گذاری مدل‌های MLR، ANN و GEP در برآورد MWD، بر اساس پایین بودن RMSE و بالا بودن NS در داده‌های آزمونی صورت گرفت. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که مدل MLR شماره ۲ با متغیرهای ورودی شن و کربن آلی نسبت به سایر مدل‌های MLR از RMSE پایین و NS بالا و در نتیجه دقت زیاد در برآورد MWD در مرحله آزمون داده‌ها برخوردار بود. مقادیر R^2 ، RMSE، ME و NS این مدل برای داده‌های آموزشی به ترتیب برابر ۰/۶۳، ۰/۳۷ mm، ۰/۰۲ و ۰/۶۳ و برای داده‌های آزمونی برابر ۰/۵۲، ۰/۴۸ mm، ۰/۱۳ و ۰/۴۸ تعیین گردید (جدول ۵). مقادیر مثبت ME برای داده‌های آموزشی و آزمونی بیان‌گر برآورد بیشتر از مقدار واقعی MWD توسط مدل شماره ۲ می‌باشد. در رتبه بعدی، مدل MLR شماره ۳ با متغیرهای ورودی شن، کربن آلی و GMD قرار دارد (جدول ۵).

به گام در رگرسیون خطی چندگانه تعیین گردید (جدول ۴). نتایج ضریب همبستگی پیرسون بین MWD خاکدانه‌های تر با متغیرهای زود یافت خاک در جدول ۳ نشان می‌دهد که بر خلاف انتظار، بالاترین مقدار همبستگی مثبت و معنی‌دار بین MWD با شن ($r = 0.70^{**}$) پیدا شد؛ شن از عوامل مخرب خاکدانه‌سازی محسوب می‌شود دلیل این یافته متناقض در پژوهش حاضر را شاید بتوان به همبستگی مثبت و معنی‌دار بین کربن آلی و شن ($r = 0.59^{**}$) نسبت داد (جدول ۴)؛ به عبارت دیگر، در منطقه مورد مطالعه با افزایش شن، کربن آلی خاک نیز افزایش یافته و موجب افزایش خاکدانه‌سازی (MWD) گردیده است. همچنین همبستگی‌های منفی و معنی‌دار بین MWD خاکدانه‌های تر با سیلت ($r = -0.46^{**}$) و رس ($r = -0.48^{**}$) و همبستگی مثبت و معنی‌دار بین MWD با میانگین هندسی قطر ذرات (d_g) ($r = 0.57^{**}$) تعیین گردید؛ البته به دلیل همراستایی رس، سیلت و d_g با شن از این متغیرها به‌عنوان ورودی در کنار شن برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر استفاده نگردید و سایر متغیرهای ورودی نیز براساس تشخیص روش گام به گام و احتمالاً به‌علت همبستگی ضعیف با MWD، در مدل‌های MLR ظاهر نشدند. مشاهده می‌شود شن و کربن آلی در مدل‌های MLR به‌عنوان متغیر ورودی و با علامت مثبت ظاهر گردیدند البته ضریب کربن آلی از ضریب شن بزرگتر است (جدول ۴). در پژوهش حاضر با توجه به این که شن در هر چهار مدل به کار گرفته شده است بنابراین مهمترین عامل اثرگذار در برآورد MWD خاکدانه‌های تر بوده است و کربن آلی، GMD و PD در درجه بعدی اهمیت قرار دارند. در مدل‌های رگرسیونی ارائه شده توسط اصغری و همکاران (Asghari et al., 2021) و امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2016) نیز شن و کربن آلی به‌عنوان متغیرهای ورودی حائز اهمیت در برآورد MWD خاکدانه‌های تر گزارش گردیده است. علامت منفی PD در مدل

جدول ۴- مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD)

Table 4- MLR models of mean weight diameter of wet aggregates (MWD)

شماره Number	مدل Model	حداکثر VIF Max VIF
1	MWD = 0.028 Sand + 0.346	1.00
2	MWD = 0.018 Sand + 0.148 OC + 0.244	1.55
3	MWD = 0.017 Sand + 0.137 OC + 1.444 GMD - 1.148	1.58
4	MWD = 0.016 Sand + 0.099 OC + 1.519 GMD - 0.746 PD + 0.721	2.06

توصیف متغیرها در زیر جدول ۲ آورده شده است.

Variables description is available under Table 2.

جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه (MLR) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD)

Table 5- Evaluation criteria for MLR models of mean weight diameter of wet aggregates (MWD)

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing				آموزش Training			
		R ²	RMSE (mm)	ME (mm)	NS	R ²	RMSE (mm)	ME (mm)	NS
1	Sand	0.47	0.51	0.14	0.41	0.52	0.42	-0.001	0.52
2	Sand, OC	0.52	0.48	0.13	0.48	0.63	0.37	0.02	0.63
3	Sand, OC, GMD	0.48	0.49	0.08	0.45	0.69	0.34	-0.02	0.69
4	Sand, OC, GMD, PD	0.43	0.51	0.07	0.41	0.71	0.32	-0.004	0.71

NS: ضریب نش-ساتکلِف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، R²: ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۲ آورده شده است.

R²: coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliff coefficient. Variables description is available under Table 2.

داده‌های آموزشی و آزمونی نشان‌دهنده تخمین جزئی بیشتر از مقدار واقعی MWD توسط مدل ANN شماره ۳ در این پژوهش می‌باشد. در درجات بعدی، به ترتیب مدل ANN شماره ۲ و شماره ۴ دارای دقت بالاتری در تخمین MWD می‌باشد؛ مدل ANN شماره ۲ نشان می‌دهد اضافه شدن متغیر کربن آلی به مدل ANN شماره ۱ موجب کاهش خطای مدل و افزایش دقت آن گردید به طوری که بر اساس داده‌های آزمونی، RMSE مدل ANN شماره ۲ نسبت به مدل ANN شماره ۱ به میزان حدود ۲۱ درصد کاهش و ضریب NS مدل ANN شماره ۲ نسبت به مدل ANN شماره ۱ به میزان حدود ۳۲ درصد افزایش یافت. اصغری و همکاران (Asghari et al., 2021) نیز در خاک‌های متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه گزارش نمودند که MWD خاکدانه‌های تر با دقت بالا و خطای پایین ($R^2 = 0.84$ و $RMSE = 0.154$) توسط شبکه عصبی مصنوعی از روی متغیرهای ورودی شن، کربن آلی و نسبت جذب سدیم برآورد گردید.

نتایج مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای برآورد میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر

از چهار مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با همان متغیرهای ورودی مدل‌های MLR (جدول ۵) برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر استفاده گردید. در جدول ۶ آماره‌های ارزیابی مدل‌های ANN برای برآورد MWD ارائه شده است. ارجحیت مدل‌های ANN در برآورد MWD نیز همانند مدل‌های MLR (جدول ۵)، بر اساس پایین بودن میزان RMSE و بالا بودن میزان NS در داده‌های آزمونی تعیین گردید. بر این اساس، بهترین مدل ANN برای برآورد MWD، مدل ANN شماره ۳ با متغیرهای ورودی شن، کربن آلی و GMD در بین سایر مدل‌های ANN بود؛ مقادیر R²، RMSE، ME و NS این مدل برای داده‌های آموزشی به ترتیب برابر ۰/۸۲، ۰/۲۶ mm و ۰/۰۳ و ۰/۸۱ و برای داده‌های آزمونی برابر ۰/۸۵، ۰/۳۱ mm و ۰/۰۳ و ۰/۷۸ به دست آمد (جدول ۶). مقادیر اندک مثبت ME برای

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD)

Table 6- Evaluation criteria for ANN models of mean weight diameter of wet aggregates (MWD)

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing				آموزش Training			
		R ²	RMSE (mm)	ME (mm)	NS	R ²	RMSE (mm)	ME (mm)	NS
1	Sand	0.59	0.43	-0.049	0.56	0.61	0.38	0.03	0.61
2	Sand, OC	0.74	0.34	-0.002	0.74	0.75	0.30	-0.03	0.75
3	Sand, OC, GMD	0.85	0.31	0.030	0.78	0.82	0.26	0.03	0.81
4	Sand, OC, GMD, PD	0.72	0.38	-0.127	0.68	0.78	0.29	0.02	0.77

NS: ضریب نش-ساتکلِف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، R²: ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۲ آورده شده است.

R²: coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliff coefficient. Variables description is available under Table 2.

جدول ۷- معیارهای ارزیابی مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD)
Table 7- Evaluation criteria for GEP models of mean weight diameter of wet aggregates (MWD)

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	R ²	RMSE (mm)	آزمون Testing		R ²	RMSE (mm)	آموزش Training	
				ME (mm)	NS			ME (mm)	NS
1	Sand	0.49	0.50	-0.14	0.89	0.60	0.38	0.00	0.60
2	Sand, OC	0.69	0.37	-0.04	0.94	0.75	0.30	-0.03	0.75
3	Sand, OC, GMD	0.79	0.35	-0.10	0.95	0.80	0.27	0.00	0.80
4	Sand, OC, GMD, PD	0.71	0.40	-0.10	0.93	0.80	0.27	0.01	0.80

NS: ضریب نش-ساتکلیف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، R²: ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۲ آورده شده است.

R²: coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliffe coefficient. Variables description is available under Table 2.

و GEP به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ (الف) نشان داده شده است؛ با توجه به این اشکال مشاهده می‌شود بیشترین مقادیر اندازه‌گیری شده MWD خاکدانه‌های تر مربوط به کاربری‌های جنگلی (F) و مرتعی (C) و کمترین مقادیر آن مربوط به کاربری زراعی (C) می‌باشد که علت آن را می‌توان به مقادیر کم کربن آلی خاک (عامل اصلی سیمانی کننده ذرات خاک و خاکدانه‌سازی) در کاربری زراعی نسبت داد. همچنین مشاهده می‌شود خطای هر سه مدل ANN، MLR و GEP (اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده) در برآورد MWD خاکدانه‌های تر در نمونه‌های خاک برداشته شده از کاربری زراعی (C) به مراتب کمتر از کاربری‌های مرتعی (R) و جنگلی (F) می‌باشد؛ علت این مسأله را می‌توان به سهم بیشتر داده‌های کاربری زراعی در مقایسه با کاربری‌های جنگلی و زراعی در مرحله آموزش هر سه مدل مذکور نسبت داد.

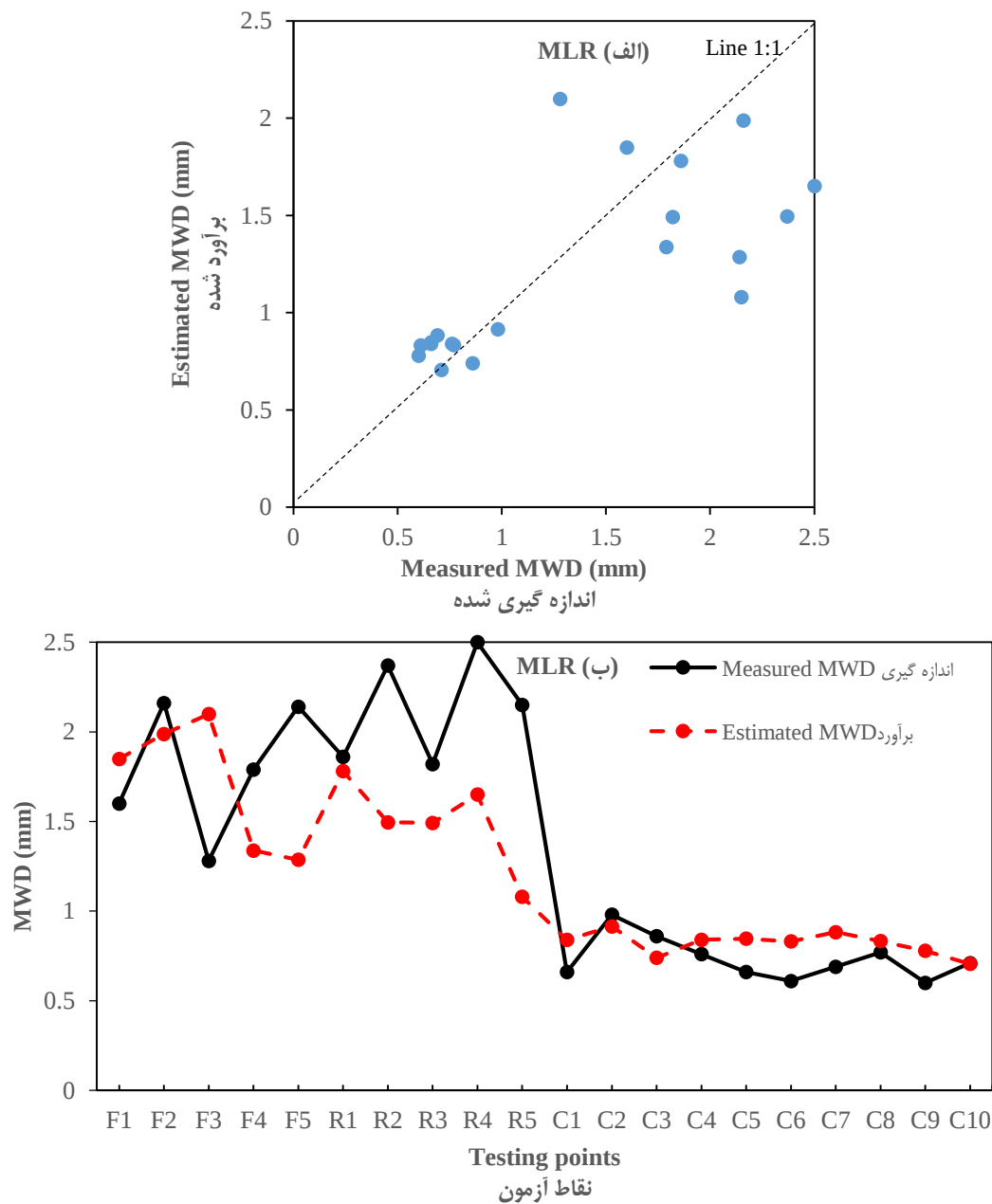
مقادیر R²، RMSE و NS برای مدل‌های ANN (جدول ۵)، MLR (جدول ۶) و GEP (جدول ۷) ارائه شده برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر در داده‌های آزمون بیانگر آن است که مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به علت داشتن R² بالا (از ۰/۵۹ تا ۰/۸۵) و NS بیشتر (از ۰/۵۶ تا ۰/۷۸) و RMSE پایین (از ۰/۳۱ تا ۰/۴۳ میلی‌متر) در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (R² از ۰/۴۳ تا ۰/۵۲، NS از ۰/۴۱ تا ۰/۴۸ و RMSE از ۰/۴۸ تا ۰/۵۱ میلی‌متر) و مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (R² از ۰/۴۹ تا ۰/۷۹، NS از ۰/۸۹ تا ۰/۹۵ و RMSE از ۰/۳۵ تا ۰/۵۰ میلی‌متر) از دقت زیاد و خطای کم در برآورد MWD برخوردار بودند. شکل‌های ۲، ۳ و ۴ (ب) نیز نمودار ۱:۱ مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده MWD را با استفاده از بهترین مدل MLR (مدل شماره ۲ در جدول ۵)، بهترین مدل ANN (مدل شماره ۳ در جدول ۶) و بهترین مدل GEP (مدل شماره ۳ در جدول ۷) برای داده‌های آزمون نشان می‌دهد؛ با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که پراکندگی داده‌ها حول محور ۱:۱ در بهترین مدل ANN در مقایسه با بهترین مدل‌های MLR و GEP کمتر است.

نتایج مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای برآورد میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر

از چهار مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) با همان متغیرهای ورودی مدل‌های ANN و MLR (جداول ۵ و ۶) برای برآورد MWD خاکدانه‌های تر استفاده شد؛ در جدول ۷ آماره‌های ارزیابی مدل‌های مذکور آورده شده است. اهمیت نسبی مدل‌های GEP در برآورد MWD نیز همانند مدل‌های MLR (جدول ۵) و ANN (جدول ۶)، بر اساس پایین بودن میزان RMSE و بالا بودن میزان NS در داده‌های آزمون تعیین گردید. بر این اساس، مدل شماره ۳ با متغیرهای ورودی شن، کربن آلی و GMD نسبت به سایر مدل‌های GEP توانست MWD را با خطای کم و دقت بالا تخمین بزند؛ مقادیر R²، RMSE، ME و NS برای این مدل بر اساس داده‌های آموزشی به ترتیب برابر ۰/۷۹، ۰/۳۵ mm، ۰/۱۰ - و ۰/۹۵ و داده‌های آزمون برابر ۰/۸۰، ۰/۲۷ mm، ۰/۰۰ و ۰/۸۰ تعیین گردید (جدول ۷). مقدار منفی ME در داده‌های آموزشی بیانگر کم‌برآوردی و مقدار صفر آن در داده‌های آزمون بیانگر تخمین دقیق MWD خاکدانه‌های تر توسط مدل GEP شماره ۳ در این پژوهش می‌باشد. در درجات بعدی اهمیت، به ترتیب مدل GEP شماره ۲ و شماره ۴ قرار دارد؛ با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌شود افزودن متغیر کربن آلی به مدل GEP شماره ۱ باعث کاهش RMSE از ۵۰ به ۳۷ mm و افزایش ضریب NS از ۰/۸۹ به ۰/۹۴ در داده‌های آزمون گردید. به علت نبود مطالعه در زمینه مدل‌سازی MWD خاکدانه‌های تر با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، امکان مقایسه دقیق نتایج این قسمت با یافته‌های سایر محققان میسر نشد.

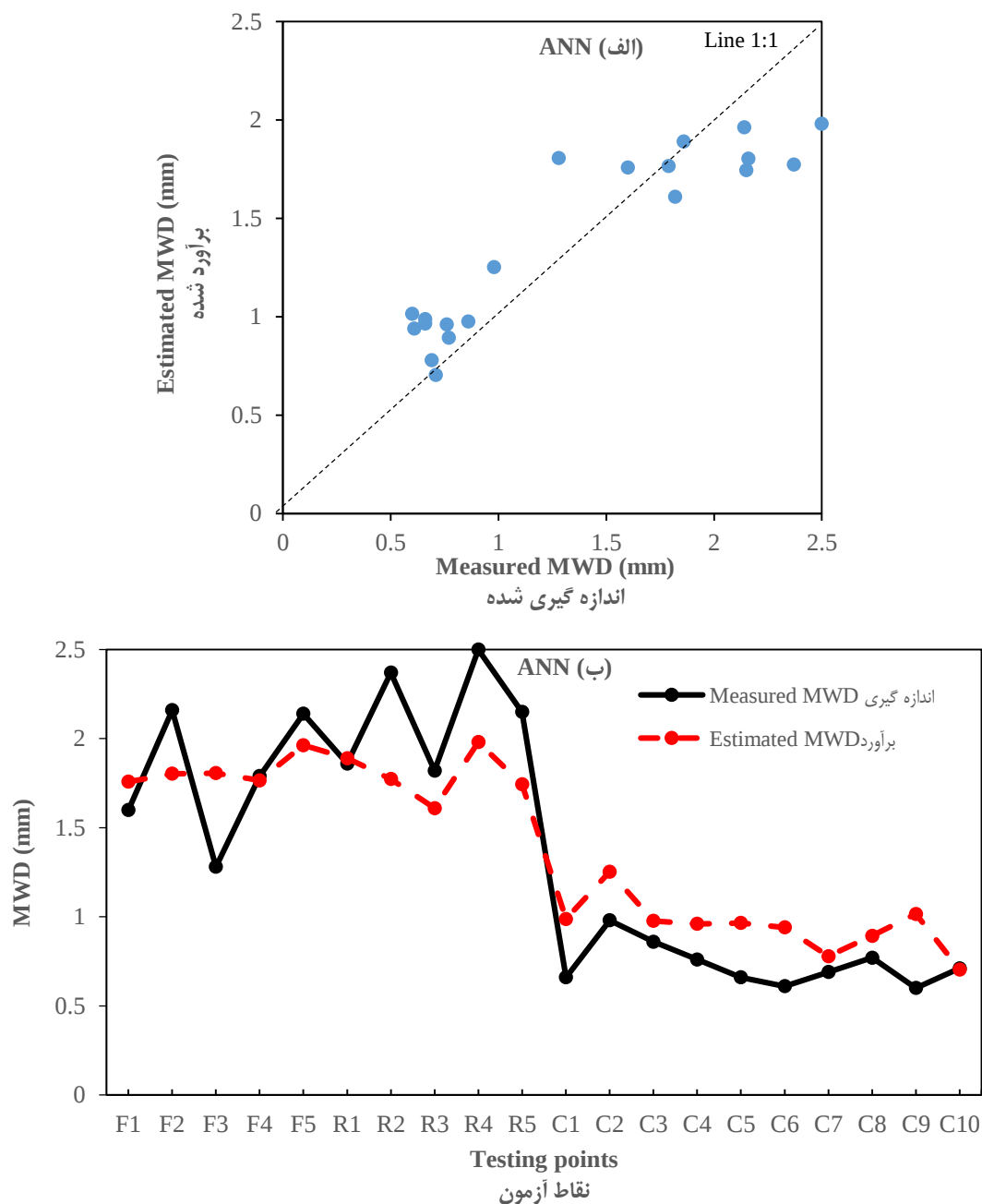
مقایسه دقت مدل‌های ANN، MLR و GEP در برآورد میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر

مقایسه عملکرد بهترین مدل در برآورد MWD خاکدانه‌های تر بر اساس نقاط آزمون (۲۰ داده تصادفی) برای مدل‌های ANN، MLR و GEP



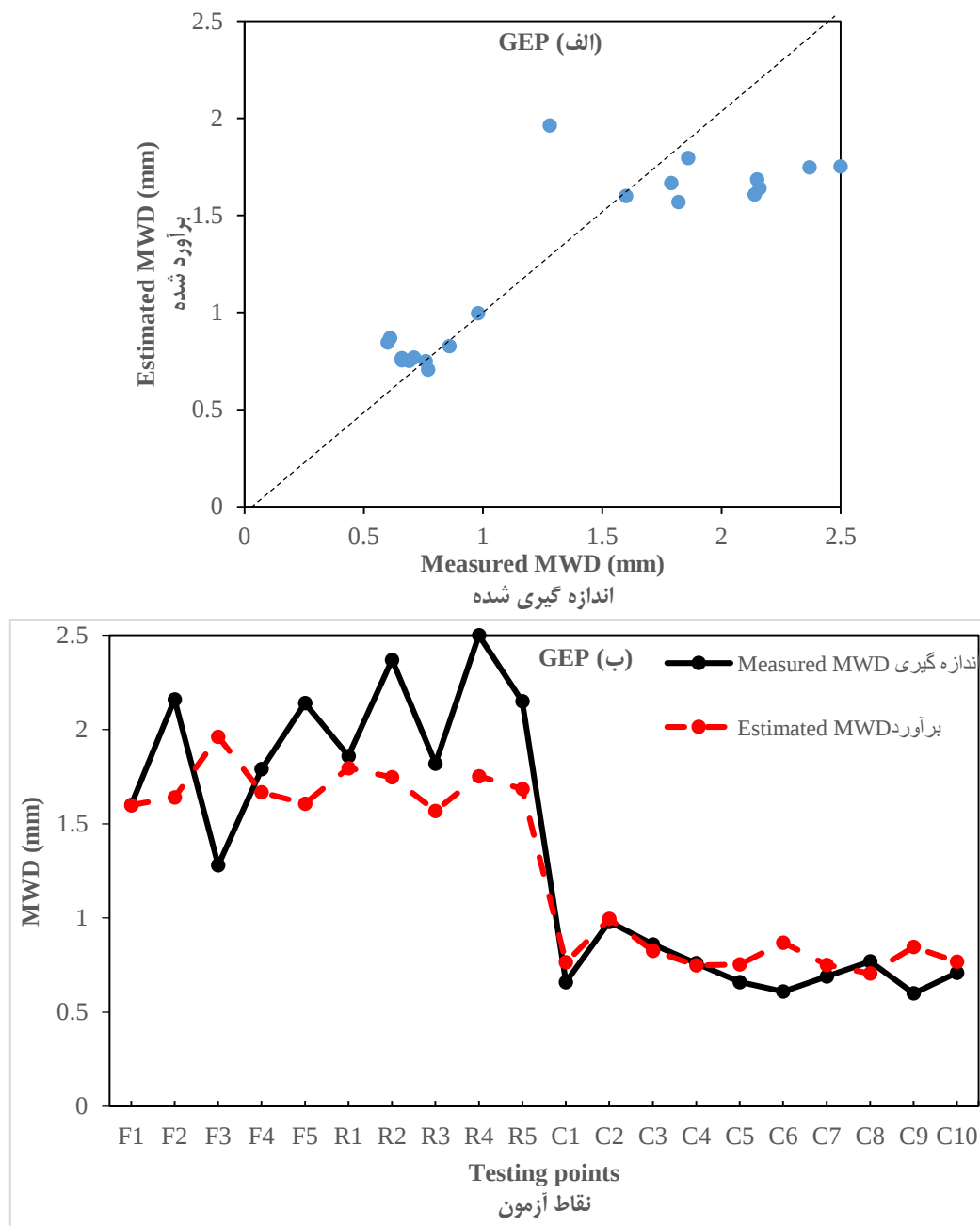
شکل ۲- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD) با استفاده از بهترین مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) بر اساس داده‌های آزمونی (n=20): F: کاربری جنگلی، R: کاربری مرتعی و C: کاربری زراعی
اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۵ آورده شده است.

Figure 2- Comparison of estimated and measured values of mean weight diameter of wet aggregates (MWD) using the best MLR model based on testing data (n=20); F: forest land use, R: range land use and C: cultivated land use
Table 5 provides detailed information about model and input variables.



شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD) با استفاده از بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بر اساس داده‌های آزمونی (n=20): F: کاربری جنگلی، R: کاربری مرتعی و C: کاربری زراعی
اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۶ آورده شده است.

Figure 3- Comparison of estimated and measured values of mean weight diameter of wet aggregates (MWD) using the best ANN model based on testing data (n=20); F: forest land use, R: range land use and C: cultivated land use
Table 6 provides detailed information about each model and input variables.



شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD) با استفاده از بهترین مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) بر اساس داده‌های آزمونی (n=20): F: کاربری جنگلی، R: کاربری مرتعی و C: کاربری زراعی

اطلاعات مربوط به مدل و متغیرهای ورودی در جدول ۷ آورده شده است.

Figure 4- Comparison of estimated and measured values of mean weight diameter of wet aggregates (MWD) using the best GEP model based on testing data (n=20); F: forest land use, R: range land use and C: cultivated land use

Table 7 provides detailed information about each model and input variables.

موفق‌تر عمل نموده‌اند. علت پیش‌بینی‌های با دقت بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی را شاید بتوان به شیوه عملکرد شبکه پرسپترون سه لایه ربط داد. عملکرد این شبکه به این صورت است که ابتدا الگویی به شبکه عصبی عرضه می‌شود و

بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که در این پژوهش، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد MWD از روی متغیرهای زودپافت خاک به‌علت استفاده از روابط غیر خطی پیچیده در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه به مراتب

نتیجه‌گیری

دقت مدل رگرسیونی خطی چندگانه (MLR) و دو مدل هوشمند شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) از نظر تخمین میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های تر از روی متغیرهای زود یافت و سهل‌الوصول خاک در اراضی منطقه فندقلوی اردبیل تحت سه کاربری به هم چسپیده جنگلی، مرتعی و زراعی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. رابطه همبستگی مثبت و معنی‌دار بین MWD خاکدانه‌های تر با کربن آلی و شن یافت شد. مشخص گردید در هر سه روش مدل‌سازی، شن، کربن آلی و میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌های خشک از مهم‌ترین و اثرگذارترین متغیرهای ورودی در برآورد MWD خاکدانه‌های تر در منطقه مورد مطالعه هستند. ارزیابی و مقایسه نتایج مدل‌ها نشان داد ANN به دلیل داشتن ضرایب تبیین (R^2) و نش-ساتکلیف (NS) بالا و ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) پایین‌تر، دارای دقت زیاد و خطای کم در برآورد MWD نسبت به مدل‌های MLR بودند. توصیه می‌گردد در پژوهش‌های آتی از بعد فراکتالی خاکدانه نیز به‌عنوان متغیر ورودی در مدل‌سازی MWD خاکدانه‌های تر استفاده شود همچنین نتایج مدل‌های رگرسیونی غیر خطی و سایر مدل‌های هوشمند مانند نروفازی، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی نیز در برآورد MWD خاکدانه‌های تر مقایسه و بررسی گردد.

خروجی آن محاسبه می‌شود سپس شبکه این خروجی را با مقادیر اندازه‌گیری شده متغیر یا متغیرهای خروجی مقایسه می‌کند و ضرایب وزنی شبکه را به نوعی تغییر می‌دهد که کمترین اختلاف بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده باشد. اصغری و همکاران (Asghari et al., 2021) و امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2016) نیز گزارش نمودند که شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه در برآورد MWD خاکدانه‌های تر بهتر عمل نمودند. باتاچاریا و همکاران (Bhattacharya et al., 2021) بیان نمودند که مدل شبکه عصبی مصنوعی ($R^2 = 0.74$) در مقایسه با مدل رگرسیونی خطی چندگانه ($R^2 = 0.65$) از دقت بیشتری در برآورد MWD از روی شن، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی برخوردار بود. اگرچه تحقیقی برای مقایسه مدل GEP در برآورد MWD یافت نشد ولی محققان قبلی مانند احمدزاده کلیر و فولانپناه (Ahmadzadeh Kaleibar & Fuladipناه, 2023) و زانگ و زانگ (Zhang & Zhang, 2024) به دقت بالای مدل GEP در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی در برآورد ویژگی‌های دیر یافت خاک مانند رطوبت‌های ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی و نفوذپذیری از روی ویژگی‌های زود یافت خاک پی برده‌اند.

References

1. Alijanpour Shalmani, A., Shabanpour, M., Asadi, H., & Bagheri, F. (2011). Estimation of soil aggregate stability in forest's soils of Guilan province by artificial neural networks and regression pedotransfer functions. *Water and Soil Science*, 21(3), 153-162. (In Persian with English abstract)
2. Amirabedi, H., Asghari, Sh., Mesri, T., & Balandeh, N. (2016). Prediction of mean weight diameter of aggregates using artificial neural network and regression models. *Applied Soil Research*, 4(1), 39-53. (In Persian with English abstract)
3. Ahmadzadeh Kaleibar, F., & Fuladipناه, M. (2023). Assessment of regression, support vector machine, and gene expression programming transfer functions to predict soil humidity parameters in Arasbaran plain. *Journal of Water and Soil Science*, 27(2), 135-149. <https://doi.org/10.47176/jwss.27.2.42532>
4. Asghari, Sh., Dizajghoorbani Aghdam, S., & Esmali, A. (2016). Investigation the spatial variability of some soil physical quality indices in Fandoghloou region of Ardabil using geostatistics. *Water and Soil*, 28(6), 1271-1283. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.33460>
5. Asghari, Sh., Alimohammadi, M., Ahmadi, A., & Davatgar, N. (2017). Derivation of pedotransfer functions for estimating wet aggregate stability using fractal dimensions of particles and aggregates. *Water and Soil Science*, 27(1), 107-119.
6. Asghari, Sh., Hatamvand, M., & Hasanpour Kashani, M. (2021). Estimating wet aggregates stability from easily available soil properties in north west of Urmia Lake. *Applied Soil Research*, 9(2), 102-115. (In Persian with English abstract)
7. Bhattacharya, P., Maity, P.P., Ray, M., & Mridha, N. (2021). Prediction of mean weight diameter of soil using machine learning approaches. *Agronomy Journal*, 113(2), 1303-1316. <https://doi.org/10.1002/agj2.20469>
8. Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986a). *Bulk density*. p. 363-375. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
9. Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986b). *Particle density*. p. 377-381. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.

10. Ferreira, C. (2001). Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systematic*, 13, 87–129. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0102027>
11. Ghorbani, M.A., Deo, R.C., Kashani, M.H., Shahabi M., & Ghorbani, S. (2019). Artificial intelligence-based fast and efficient hybrid approach for spatial modeling of soil electrical conductivity. *Soil and Tillage Research*, 186, 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.012>
12. Gee, G.W., & Or, D. (2002). *Particle-size analysis*. p. 255–293. In: Dane J.H., & Topp G.C. (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.
13. Kemper, W.D., & Rosenau, K. (1986). *Size distribution of aggregates*. p. 425–442. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
14. Kozak, E., Pachepsky, Y.A., Sokolowski, S., Sokolowska, Z., & Stepniewski, W. (1996). A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Science Society of America Journal*. 60, 1291–1297.
15. Marashi, M., Mohammadi Torkashvand, A., Ahmadi, A., & Esfandyari, M. (2019). Adaptive neurofuzzy inference system: estimation of soil aggregates stability. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.05.002>
16. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. p. 539–579. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
17. Page, A.L. (ed.). (1985). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Methods*. Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.
18. Sarkar, A., Maity, P.P., Ray, M., Chakraborty, D., Das, B., & Bhatia, A. (2023). Inclusion of fractal dimension in four machine learning algorithms improves the prediction accuracy of mean weight diameter of soil. *Ecological Informatics*. 74, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101959>
19. Shirazi, M.A., & Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society American Journal*, 48(1), 142–147.
20. Yazdani, A., Mosaddeghi, M.R., Khademi, H., Ayoubi, S., & Khayamim, F. (2014). Relationship between surface aggregate stability and some soil and climate properties in Isfahan province. *Soil Management*, 3(2), 23–31. (In Persian with English abstract)
21. Yoder, R.E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society Agronomy*, 28, 337–35.
22. Zhang, R., & Zhang, S., (2024). Coefficient of permeability prediction of soils using gene expression programming. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 128(107504). <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107504>

Projections of Temperature and Precipitation Changes under CMIP6 Scenarios in Sistan-va-Baluchestan Province

S. Mirshekari^{1*}, F. Yaghoubi², S.A. Hashemi³

1- Assistant Professor, Agriculture Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran

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

2- Postdoctoral Researcher, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Hamoun International Wetland Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran

Received: 31-07-2024

Revised: 28-11-2024

Accepted: 31-12-2024

Available Online: 31-12-2024

How to cite this article:

Mirshekari, S., Yaghoubi, F., & Hashemi, S.A. (2025). Projections of temperature and precipitation changes under CMIP6 scenarios in Sistan-va-Baluchestan province. *Journal of Water and Soil*, 38(6), 765-780. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89164.1422>

Introduction

The 21st century is witnessing the increase of climate change as an important challenge due to its destructive environmental and socio-economic effects. Extreme climatic conditions have become frequent and more intense in recent decades as a result of human activities. Iran, as one of the countries in the Middle East with a different climate in each region of the country, has suffered significant adverse effects of climate change. Considering the importance of the climate change, it is important to investigate the changes in climate variables to know the future conditions and make management decisions. In the field of climate research, global climate models are useful tools that are often used to investigate the global climate system, including historical and projected periods. Since the use of the CMIP6 dataset provides improved clarity and accuracy for predicting future climate forecasts, the main objective of the present study is to predict the temperature and precipitation changes in the near, mid, and far future in Sistan-va-Baluchestan province.

Materials and Methods

The minimum temperature, maximum temperature, and precipitation data of 10 general circulation models (GCMs) of the 6th IPCC report for the baseline (1990-2014) were downloaded from the Global Climate Research Program database (<https://esgf-node.llnl.gov>). Then GCMs were including ACCESS-CM2, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1-HR, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-CC, EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM4-8, INM-CM5-0, MIROC6, and NorESM2-MM. Four statistical indicators including correlation coefficient (R^2), RMSE, Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and mean absolute error (MAE) were used to evaluate the performance of 10 GCMs. Based on the results obtained from the these indicators, the models that had higher performance in predicting the temperature and precipitation data were selected as the best models for forecasting in the future. The ensemble of these models under two SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios for the near, middle, and far future (2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100) were extracted from the World Climate Research Program database.

CMhyd (Climate Model data for hydrologic modeling) tool was used to bias correction climate data of the selected models. In order to choose the best bias correction method, the R^2 , RMSE, NSE, and MAE were estimated.

After bias correction, the climate data of selected models were ensembled and then the changes in precipitation and maximum and minimum temperature in three future periods compared to the baseline was estimated.



©2024 The author(s). 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.2024.89164.1422>

Results and Discussion

The results showed that out of 10 GCMs, seven models had good performance ($R^2 > 0.40$, $4.23 < \text{RMSE} < 12.02^\circ\text{C}$, $0.12 < \text{NSE} < 0.74$, and $3.36 < \text{MAE} < 9.59^\circ\text{C}$) in simulating daily minimum and maximum temperature. However, the performance of all models in simulated daily precipitation was poor ($R^2 > 0.19$, $1.24 < \text{RMSE} < 3.70 \text{ mm}$, $-7.41 < \text{NSE} < -0.57$, and $0.23 < \text{MAE} < 0.85 \text{ mm}$).

Among the different bias correction methods of temperature and precipitation available in CMhyd, the distribution mapping method had the best performance.

In all three regions, compared to the baseline, the average annual minimum and maximum temperature under two scenarios will increase in the future periods and precipitation will decrease in most periods and scenarios. These changes will be mainly in the SSP5-8.5 scenario compared to SSP2-4.5 and also in the far future period compared to the middle and near future. Averaged across all locations, annual maximum temperature showed increases in near, middle, and far projected periods of 1.3, 2.1, and 2.8°C under SSP2-4.5 and 1.6, 3.1, and 5.1°C under SSP5-8.5, respectively (Fig. 2), while for minimum temperature, the increases will be of 1.6, 2.6, and 3.4°C for SSP2-4.5 and 1.9, 3.9, and 6.3°C for SSP5-8.5. The range of annual precipitation among all sites was from -58.22 to 49.33% under SSP5-8.5 in the near and far future periods in Zabol and Iranshahr, respectively.

The annual increase in the average maximum and minimum temperature will be mainly due to the increase in air temperature in the months of January, February, August, September, October, November and December. The annual decrease in precipitation will mainly result from the decrease in precipitation in January, February, March, November, and December, and the annual increase in precipitation will result from the significant increase in precipitation in May and October compared to the baseline.

Conclusion

The results showed that under different scenarios of climate change, the maximum and minimum temperatures in the near, middle, and far future periods will face an increase compared to the baseline. However, the precipitation changes in the future time periods are not the same as compared to the baseline, and in some periods the precipitation will decrease and in others it will increase. But in general, the decrease in precipitation will be more than its increase. Therefore, it is very important to formulate and implement appropriate management programs for the needs of each region, in order to properly manage water resources and adapt to extreme temperatures and their consequences.

Keywords: Bias correction, Climate change, CMhyd, Maximum temperature, Minimum temperature

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۳، ص. ۷۶۵-۷۸۰

پیش‌نگری تغییرات دما و بارندگی تحت سناریوهای CMIP6 در استان سیستان و بلوچستان

سمیه میرشکاری^{۱*} - فاطمه یعقوبی^۲ - سید ابوالفضل هاشمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

چکیده

تغییر اقلیم به دلیل تأثیرات مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی آن به مهم‌ترین چالش در قرن بیست و یکم تبدیل شده است. در این مطالعه، ۱۰ مدل گردش عمومی از ششمین گزارش IPCC جهت پیش‌نگری تغییرات بارندگی و دما در سه منطقه ایرانشهر، زابل و زاهدان در استان سیستان و بلوچستان مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس روش‌های مختلف تصحیح اریبی در CMhyd ارزیابی شدند و با استفاده از روشی که از کارایی بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار بود، بارندگی و دمای حداکثر و حداقل مدل‌های منتخب برای سه دوره زمانی در آینده (۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۵۱-۲۰۷۶) تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تصحیح گردیدند. داده‌های تصحیح اریبی شده مدل‌های منتخب میانگین‌گیری شده و سپس تغییرات آن‌ها در دو مقیاس ماهانه و سالانه در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه (۱۹۹۴-۲۰۱۴) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از ۱۰ مدل مورد مطالعه، ۸ مدل از کارایی خوبی ($R^2 < 0.40$ ، $RMSE < 12/02$ ، $MAE < 4/23$ ، $NSE < 0/74$ ، $MAE < 9/59$ ، $NSE < 0/12$)، $MAE < 3/36$ درجه سانتی‌گراد) در شبیه‌سازی دمای حداقل و حداکثر روزانه برخوردار بودند. باین‌حال، کارایی تمامی مدل‌ها در شبیه‌سازی شده بارندگی روزانه ضعیف بود ($R^2 > 0/19$ ، $RMSE < 3/70$ ، $MAE < 1/24$ میلی‌متر، $NSE < -0/57$ ، $MAE < 0/85$ ، $RMSE < 0/23$ میلی‌متر). از بین روش‌های مختلف تصحیح اریبی دما و بارندگی موجود در CMhyd، روش نقشه‌برداری توزیع دما و بارش بهترین عملکرد را داشتند و سبب بهبود کارایی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی گردیدند. به‌طور میانگین در همه مکان‌ها، دمای حداکثر سالانه در دوره‌های پیش‌بینی شده نزدیک، میانه و دور به‌ترتیب ۱/۳، ۲/۱ و ۲/۸ درجه سانتی‌گراد تحت SSP2-4.5 و ۱/۶، ۳/۱ و ۵/۱ درجه سانتی‌گراد تحت SSP5-8.5 افزایش نشان خواهد داد. درحالی‌که برای دمای حداقل، میزان افزایش ۱/۶، ۲/۶ و ۳/۴ درجه سانتی‌گراد برای SSP2-4.5 و ۱/۹، ۳/۹ و ۶/۳ درجه سانتی‌گراد برای SSP5-8.5 خواهد بود. بارندگی سالانه در تمامی مکان‌ها بین ۵۸/۲۲- تا ۴۹/۳۳ درصد نسبت به دوره پایه تحت سناریوی SSP5-8.5 به‌ترتیب در دوره‌های آینده نزدیک و دور در زابل و ایرانشهر متغیر خواهد بود. افزایش سالانه در میانگین دمای حداکثر و حداقل عمدتاً ناشی از افزایش دمای هوا در ماه‌های ژانویه، فوریه، آگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر خواهد بود. کاهش سالانه بارندگی نیز عمدتاً از کاهش بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارچ، نوامبر و دسامبر و افزایش سالانه بارندگی از افزایش قابل‌توجه بارندگی در ماه‌های می و اکتبر نسبت به دوره پایه ناشی خواهد شد. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند به بهبود درک ما از اثرات تغییر اقلیم بر منطقه مورد مطالعه کمک کند و برنامه‌ریزان و ذینفعان را تشویق کند تا راهبردهای بهینه برای کاهش اثرات منفی آن را شناسایی کنند.

واژه‌های کلیدی: تصحیح اریبی، تغییر اقلیم، دمای حداقل، دمای حداکثر، CMhyd

۱- استادیار گروه زراعت، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران

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

۲- پژوهشگر پسادکتری، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران

مقدمه

قرن بیست و یکم شاهد افزایش تغییرات اقلیمی به عنوان یک چالش مهم به دلیل اثرات مخرب زیست محیطی و اجتماعی-اقتصادی آن است. شرایط اقلیمی حدی در دهه های اخیر در نتیجه فعالیت های انسانی مکرر و شدیدتر شده است (Mukheef et al., 2024). این فعالیت ها مانند سوزاندن سوخت های فسیلی، آلودگی های صنعتی، تغییر کاربری زمین و افزایش جمعیت، منجر به افزایش حجم گازهای گلخانه ای منتشر شده در اتمسفر و در نتیجه الگوهای اقلیمی غیرعادی گردیده است (Muhaisen et al., 2024). براساس گزارش هیئت بین الدول تغییر اقلیم^۱ (IPCC, 2020) غلظت گازهای گلخانه ای در سراسر جهان، مانند اکسیدنیترژن، دی اکسیدکربن و متان در نتیجه گسترش اقتصاد و افزایش جمعیت به شدت افزایش یافته است. از اواسط قرن بیستم، گرمایش مشاهده شده بیشتر ناشی از اثرات تشدید انتشار گازهای گلخانه ای است که در سراسر سیستم آب و هوایی شناسایی شده است. بنابراین، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای راه اصلی کنترل تغییرات اقلیمی خواهد بود؛ زیرا این اقدامات، زمانی که با سازگاری ترکیب شوند، می توانند خطرات ناشی از آن را کاهش دهند (Faisal et al., 2023; Rashid et al., 2022).

در زمینه تحقیقات اقلیمی، مدل های آب و هوای جهانی ابزارهای مفیدی هستند که اغلب برای تحقیق در مورد سیستم اقلیمی در سراسر جهان، شامل دوره های تاریخی و پیش بینی شده، استفاده می شوند (Mohsen et al., 2020). از سال ۱۹۹۵ تاکنون، محققان بسیاری از مؤسسات در سراسر جهان به طور مداوم برای توسعه مدل های گردش عمومی جهت تولید مدل های قابل اعتماد و کارآمد برای شبیه سازی سیستم های اقلیمی کار کرده اند (Kamworapan et al., 2021; Hassan, 2021). در حال حاضر، هیئت بین الدول تغییر اقلیم، فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل های اقلیمی (CMIP^۲) را منتشر کرده است که در آن سناریوهای جدید انتشار و کاربری زمین تحت ویژگی های جدید توسعه اجتماعی، یعنی مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSPs^۳) در نظر گرفته شده اند (Mukheef et al., 2024). از زمانی که پیش بینی های اقلیمی CMIP6 در سال ۲۰۱۶ در دسترس قرار گرفت، چندین مطالعه (Bağçacı Yang et al., 2021; et al., 2021; Monte Verde et al., 2022) این پایگاه داده را ارزیابی کرده اند. نتایج این مطالعات نشان می دهد که سناریوهای

جدید اقلیمی CMIP6 نتایج قابل قبول تری نسبت به سناریوهای مسیرهای تمرکز نماینده (RCPS^۴) ارائه می دهند. CMIP6 از پیشرفت های قابل توجهی نسبت به CMIP5 برخوردار است، از جمله این واقعیت که مدل های CMIP6 از وضوح بالاتری برخوردار هستند که امکان پیش بینی دقیق تر تغییرات اقلیمی منطقه را فراهم می کنند. با این حال، در سطح معینی از انتشار گازهای گلخانه ای، مدل های CMIP6 دمای جهانی را کمی بالاتر از CMIP5 پیش بینی می کنند (Mukheef et al., 2024).

ایران به عنوان یکی از کشورهای خاورمیانه با آب و هوای متفاوت در هر منطقه از کشور، اثرات نامطلوب قابل توجهی از تغییرات اقلیمی متحمل شده است. چندین تحقیق در مورد تغییرات اقلیمی در مناطق مختلف ایران که از نتایج حاصل از مدل های گردش عمومی استفاده کرده اند انجام شده است. میان آبادی و همکاران (Mianabadi et al., 2023) تغییرات بارندگی و دما را در کرمان بر مبنای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در دوره ۲۱۰۰-۲۰۵۱ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها بیانگر عدم معنی داری در روند و میانگین بارندگی بود، در حالی که روند تغییرات و میانگین دما از نظر آماری معنی دار بود. همچنین آن ها نشان دادند که احتمال وقوع تنش های گرمایی در آینده افزایش خواهد یافت. عبدالعلی زاده و همکاران (Abdolzadeh et al., 2023) در مطالعه ای به ارزیابی متغیرهای بارندگی و دما در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل های CMIP6 تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در دوره های آینده ۲۵۵-۲۰۳۱ و ۲۰۹۵-۲۰۷۱ پرداختند. نتایج آن ها حاکی از آن بود که میانگین دمای منطقه مورد مطالعه در هر دو دوره آینده تحت هر دو سناریو نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) افزایش و بارندگی کاهش خواهد یافت. قربانی مینائی و همکاران (Ghorbani Minaei et al., 2024) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند بارندگی و دما در سه دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ در حوضه قره سو با استفاده از مدل های CMIP6 پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که داده های میانگین سالانه متغیرهای دمای حداقل و حداکثر بر مبنای سناریوی SSP2-4.5 در دوره آینده نزدیک و میانه و برای سناریوی SSP5-8.5 در هر سه دوره آینده دارای روند افزایشی معنی دار است. با این حال روند میانگین سالانه بارندگی با وجود عدم معنی دار بودن در برخی موارد افزایشی و در برخی کاهش بود.

باتوجه به اهمیت بروز پدیده تغییر اقلیم، بررسی تغییر در متغیرهای اقلیمی برای آگاهی از شرایط آینده و اتخاذ تصمیمات مدیریتی دارای

- 1- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 2- Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
- 3- Shared Socio-economic Pathways

داده‌های مورد استفاده

داده‌های آب و هوایی مشاهداتی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارندگی در مقیاس زمانی روزانه برای سه ایستگاه ایرانشهر، زابل و زاهدان در دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. جهت دریافت داده‌های اقلیمی آینده از داده‌های مدل‌های گردش عمومی CMIP6 استفاده گردید. انتخاب مدل‌ها بر مبنای مقیاس زمانی روزانه، قدرت تفکیک مکانی حداکثر ۲۰۰ کیلومتر و موجود بودن داده‌ها برای سناریوهای مدنظر (SSP2-4.5 و SSP5-8.5) انجام شد.

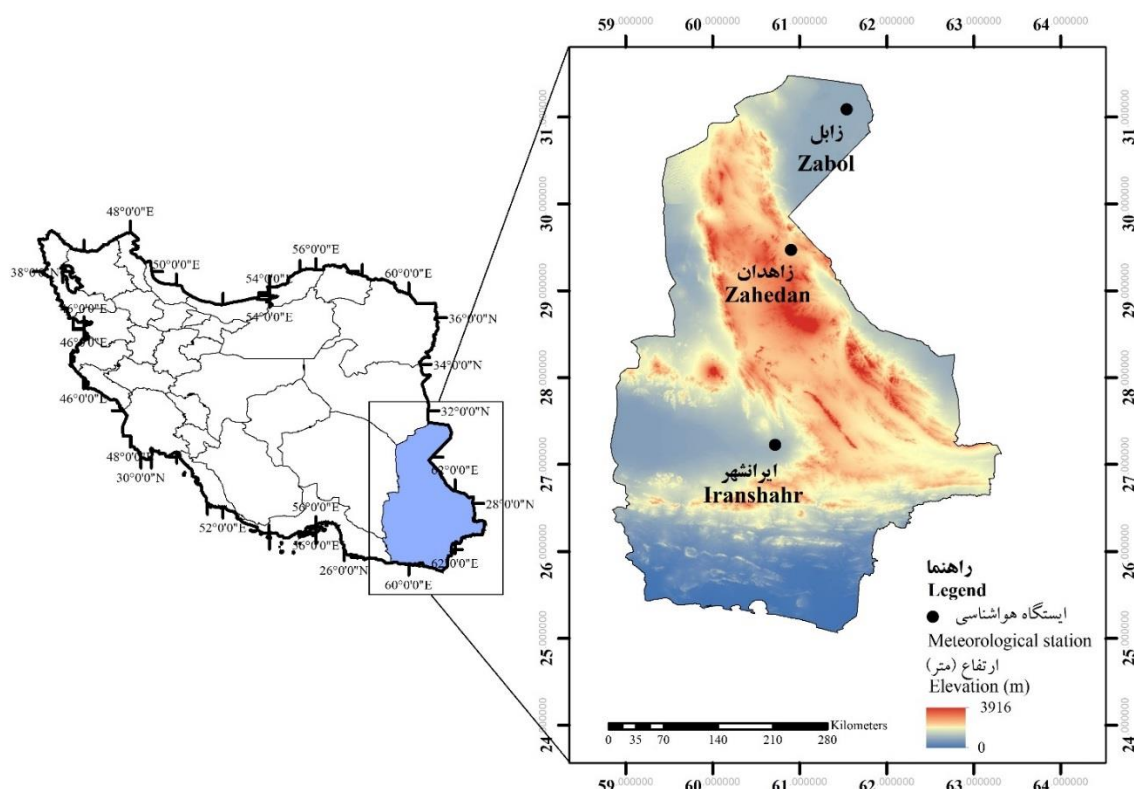
بر این مبنای ۱۰ مدل شامل ACCESS-CM2، CMCC-EC، CNRM-ESM2-1، CNRM-CM6-1-HR، ESM2-INM، INM-CM4-8، EC-Earth3-Veg-LR، Earth3-CC، CM5-0، MIROC6 و NorESM2-MM انتخاب شدند که اطلاعات آن‌ها در **جدول ۲** ارائه شده است. داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارندگی این مدل‌ها برای دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) از پایگاه برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (<https://esgf-node.llnl.gov>) دانلود شدند.

اهمیت می‌باشد. با این وجود تاکنون تحقیقی در مورد استفاده از مجموعه داده‌های CMIP6 برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده در استان سیستان و بلوچستان انجام نشده است. از آنجایی که استفاده از مجموعه داده CMIP6 وضوح و دقت بهبود یافته‌ای را برای پیش‌بینی پیش‌نگری‌های اقلیمی آینده فراهم می‌کند، هدف اصلی مطالعه حاضر پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی دما و بارش در آینده نزدیک، میانه و دور برای این منطقه خشک تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه در این تحقیق شامل سه شهر ایرانشهر، زابل و زاهدان واقع در استان سیستان و بلوچستان و در مختصات جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی می‌باشند (شکل ۱ و جدول ۱). این استان با حدود ۱۸۰۷۲۶ کیلومترمربع وسعت، دومین استان پهناور کشور بوده که بیش از ۱۱ درصد وسعت ایران را دربر می‌گیرد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 1- Geographical location of the study area and stations

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

Table 1- Characteristics of the studied synoptic stations

ایستگاه سینوپتیک Synoptic station	ارتفاع Elevation (m)	عرض جغرافیایی Latitude (decimal degrees)	طول جغرافیایی Longitude (decimal degrees)	دوره آماری Weather data period
ایران شهر Iranshahr	591.1	27.23	60.72	1990-2014
زابل Zabol	489.2	31.09	61.54	1990-2014
زاهدان Zahedan	1370.0	29.47	60.90	1990-2014

جدول ۲- مدل‌های گردش کلی مورد استفاده و قدرت تفکیک مکانی آن‌ها

Table 2- The used GCMs and their spatial resolution

نام مدل Model name	کشور Country	قدرت تفکیک افقی Horizontal resolution (in degrees)	
		طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
ACCESS-CM2	Australia	1.88	1.25
CMCC-ESM2	Italy	1.25	0.94
CNRM-CM6-1	France	1.41	1.41
CNRM-ESM2-1	France	1.41	1.41
EC-Earth3-CC	Europe	0.70	0.70
EC-Earth3-Veg-LR	Europe	1.13	1.13
INM-CM4-8	Russia	2.00	1.50
INM-CM5-0	Russia	2.00	1.50
KACE-1-0-G	South Korea	1.88	1.25
MIROC6	Japan	1.41	1.41
NorESM2-MM	Norway	1.25	0.94

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (4)$$

بر مبنای نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌ها، مدل‌هایی که از کارایی بالاتری در پیش‌بینی داده‌های دما و بارندگی برخوردار بودند به عنوان مدل‌های منتخب جهت پیش‌نگری در آینده تعیین گردیدند. سپس داده‌های این مدل‌ها تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای سه دوره زمانی در آینده نزدیک، میانه و دور (به ترتیب ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰) از پایگاه برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی استخراج گردیدند.

تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی

جهت تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی مدل‌های منتخب از نرم‌افزار CMHyd^۴ استفاده شد. CMHyd یک نرم‌افزار مدل‌سازی برای تصحیح و حذف اریبی‌ها از داده‌های اقلیمی آینده می‌باشد. این

سپس این داده با استفاده از بسته نرم‌افزاری ncd4 نرم‌افزار R برای مناطق مورد مطالعه در قالب فایل‌های Excel استخراج گردیدند.

ارزیابی مدل‌های اقلیمی و انتخاب مدل‌های برتر

جهت بررسی کارایی ۱۰ مدل اقلیمی از شاخص‌های ارزیابی ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربع خطا ($RMSE^1$)، کارایی نش-ساتکلِف (NSE^2) و میانگین خطای مطلق (MAE^3) (معادله‌های ۱ تا ۴) استفاده شد (Mukheef et al., 2024):

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (2)$$

- 1- Root mean square error
- 2- Nash-Sutcliffe efficiency
- 3- Mean absolute error

4- Climate Model data for hydrologic modeling

نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌های اقلیمی و انتخاب مدل‌های برتر

نتایج ارزیابی کارایی مدل‌های اقلیمی (جدول‌های ۳ و ۴) بیانگر کارایی متفاوت این مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارندگی بود. این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت استفاده از مدل‌های بیشتر در مطالعات تغییر اقلیم و اکتفا نکردن به تفکیک افقی مدل‌ها جهت گزینش آن‌ها است. در بین مدل‌های موردبررسی، از نظر شبیه‌سازی دمای حداکثر، بهترین کارایی را مدل INM-CM5-0 برای ایران‌شهر و زاهدان و مدل NorESM2-MM برای زابل داشت. مدل CMCC-ESM2 بهترین کارایی را در شبیه‌سازی دمای حداقل برای ایران‌شهر و زابل و مدل EC-Earth3-Veg-LR بهترین کارایی را برای زاهدان داشت. مدل INM-CM4-8 برای ایران‌شهر و مدل ACCESS-CM2 برای زابل و زاهدان از بهترین کارایی در شبیه‌سازی بارندگی روزانه نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بودند. اشرف و همکاران (Ashraf et al., 2013) بیان داشتند که در یک منطقه الزاماً یک مدل یکسان، بهترین پیش‌بینی را برای تمام متغیرهای اقلیمی ارائه نمی‌دهد و لذا ممکن است دقیق‌ترین پیش‌بینی برای متغیرهای بارندگی و دمای آن منطقه توسط دو مدل مختلف ایجاد گردد.

به‌طورکلی تمامی مدل‌های موردبررسی به‌جز CNRM-CM6-1-HR برای شهر زابل و MIROC6 برای هر سه شهر از کارایی خوبی ($R^2 < 0.40$ ، $RMSE < 12.02$ ، $MAE < 3.73$ درجه‌سانتی‌گراد، $NSE < 0.12$ ، $0.59 < MAE < 3.36$ درجه‌سانتی‌گراد) در شبیه‌سازی دمای حداکثر و حداقل برخوردار بودند (جدول ۳). باتوجه‌به قدرت تفکیک افقی مدل‌های CNRM-CM6-1-HR و MIROC6 در مقایسه با سایر مدل‌های مورد مطالعه (جدول ۲) می‌توان بیان داشت که قدرت تفکیک افقی کمتر یک مدل نمی‌تواند به‌تنهایی موجب عدم قطعیت بالای آن گردد. علاوه‌بر قدرت تفکیک افقی ضعیف، خطاها و عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در برآورد دما در ایران می‌تواند ناشی از پامترسازی ضعیف مدل‌ها و کمبود داده‌های مشاهداتی به‌عنوان ورودی مدل‌ها باشد (Zarrin & Dadashi, Roudbari, 2022). لذا قدرت تفکیک افقی به‌تنهایی نمی‌تواند معیار مناسبی برای انتخاب مدل در نظر گرفته شود. بااین‌حال، یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) همبستگی معنی‌داری بین کارایی مدل‌های CMIP6 و قدرت تفکیک آن‌ها گزارش نمودند.

تمامی مدل‌های موردبررسی از کارایی بسیار ضعیفی ($R^2 > 0.19$ ، $RMSE < 3.70$ ، $MAE < 0.23$ میلی‌متر، $NSE < -0.57$ ، $-0.41 < NSE$)، مناطق برخوردار بودند (جدول ۴) که در این بین، مدل‌های CNRM-CM6-1-HR و MIROC6 کارایی ضعیف‌تری داشتند. لذا استفاده از داده‌های بارندگی مدل‌ها برای کاربردهای

نرم‌افزار به‌دلیل برخورداری از روش‌های گوناگون تصحیح اریبی و اجرای سریع روش‌های منتخب، به‌عنوان مدلی کارا جهت ریزمقایس‌نمایی برونداد مدل‌های CMIP6 در مطالعات مختلف به‌کاررفته است. در این مطالعه، داده‌های هر یک از مدل‌ها برای دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰ با استفاده از روش‌های تصحیح اریبی بارندگی شامل مقیاس‌گذاری خطی^۱، تصحیح تغییر دلتا^۲، مقیاس‌گذاری شدت بارش محلی^۳، تبدیل توان بارش^۴ و نقشه‌برداری توزیع بارش^۵ و روش‌های تصحیح اریبی دمای حداقل و حداکثر شامل مقیاس‌گذاری خطی، تصحیح تغییر دلتا، مقیاس‌گذاری واریانس دما^۶ و نقشه‌برداری توزیع دما^۷ (Teutschbein & Seibert, 2012) تصحیح شدند. سپس با استفاده از شاخص‌های ارزیابی ضریب تبیین R^2 ، RMSE، NSE و MAE (معادله‌های ۱ تا ۴) بهترین روش تصحیح اریبی انتخاب و داده‌های سه دوره آینده برای هر یک از مدل‌های اقلیمی با استفاده از آن روش موردتصحیح قرار گرفتند.

در این معادلات، O_i بیانگر مقدار مشاهده‌شده، P_i مقدار پیش‌بینی‌شده، n تعداد کل داده‌ها و $\bar{O}$ و $\bar{P}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده میانگین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده هستند.

ایده‌آل‌ترین مقدار RMSE و MAE صفر است و هرچه مقدار آن کمتر باشد نشان از برتری روش مورد استفاده دارد و هرچه مقدار آن بزرگ‌تر باشد بیانگر خطای بیشتر مدل است (Willmott, 1981). NSE بین منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است (Nash & Sutcliffe, 1970).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های اقلیمی مدل‌های منتخب پس از تصحیح اریبی میانگین‌گیری‌شده و سپس میزان تغییرات در آن‌ها در دوره‌های آینده (۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۲۶-۲۰۷۵ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) سنجیده شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار R و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Origin 2024 صورت گرفت.

- 1- Linear scaling
- 2- Delta-change correction
- 3- Precipitation local intensity scaling
- 4- Power transformation of precipitation
- 5- Distribution mapping of precipitation
- 6- Variance scaling of temperature
- 7- Distribution mapping of temperature

(پستی‌وبلندی زیاد) باشد (شکل ۱). زیرا زمانی که در یک شبکه، توپوگرافی یکنواخت نباشد (به‌ویژه در مناطق کوهستانی) داده‌های شبیه‌سازی شده به‌طور قابل توجهی متفاوت از داده‌های ایستگاهی ثبت شده برای آن منطقه خواهد بود (Van Wart et al., 2015).
باتوجه به کارایی ضعیف مدل‌های CNRM-CM6-1-HR و MIROC6 در شبیه‌سازی دما و ESM2-1 و MIROC6 در شبیه‌سازی بارندگی (جدول‌های ۳ و ۴)، از بین ۱۰ مدل مورد بررسی، ۷ مدل شامل ACCESS-CM2، EC-Earth3-Veg-LR، EC-Earth3-CC، CMCC-ESM2، INM-CM4-8، INM-CM5-0 و NorESM2-MM به‌عنوان مدل‌های برتر جهت تصحیح اریبی و ارزیابی میزان تغییرات دما و بارندگی انتخاب شدند.

هیدرولوژیکی بدون ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح اریبی می‌تواند منجر به نتایج غیرمنطقی شود. لازم به ذکر است که باتوجه به تغییرات بسیار زیاد مکانی و زمانی بارندگی، مدل‌های اقلیمی توانایی بالایی در شبیه‌سازی این داده‌ها ندارند که این نتیجه در توافق با سایر مطالعاتی است که در این زمینه انجام شده است (Yang et al., 2021; Abdolalazadeh et al., 2023; Rashidi Ghane et al., 2023; Ghorbani Minaei et al., 2024). یزدان‌دوست و همکاران (Yazdandoost et al., 2021) بیان داشتند که شبیه‌سازی‌های مدل‌ها هنوز بسیار نامشخص هستند و قبل از استفاده از شبیه‌سازی‌ها در مطالعات ارزیابی تغییرات اقلیمی، درک خوب خطاها و سوگیری‌های اساسی ضروری است.
در بین مناطق، برای تمامی پارامترها بهترین کارایی به‌ترتیب برای ایرانشهر، زابل و زاهدان حاصل شد (جدول‌های ۳ و ۴). علت این امر می‌تواند قرارگیری زاهدان در شبکه‌ای با توپوگرافی پیچیده

جدول ۳- شاخص‌های کارایی آماری ارزیابی داده‌های دمای حداکثر و حداقل مدل‌های اقلیمی

Table 3- Indicators of statistical performance in evaluating maximum and minimum temperature data from climate models

ایستگاه	مدل	دمای حداکثر				دمای حداقل			
		Tmax				Tmin			
Station	Model	R ²	RMSE (°C)	NSE	MAE (°C)	R ²	RMSE (°C)	NSE	MAE (°C)
ایرانشهر Iranshahr	ACCESS-CM2	0.52	6.09	0.48	4.84	0.58	5.43	0.56	4.46
	CMCC-ESM2	0.63	5.36	0.63	4.12	0.75	4.23	0.73	3.36
	CNRM-CM6-1-HR	0.01	8.80	-0.01	7.35	0.16	7.72	0.06	8.71
	CNRM-ESM2-1	0.46	6.06	0.14	5.66	0.46	7.22	0.27	6.20
	EC-Earth3-CC	0.62	5.45	0.60	4.11	0.41	5.91	0.12	6.78
	EC-Earth3-Veg-LR	0.42	6.24	0.31	4.91	0.44	6.99	0.14	7.91
	INM-CM4-8	0.68	4.94	0.63	3.87	0.48	7.13	0.18	7.98
	INM-CM5-0	0.71	4.70	0.70	3.71	0.50	6.82	0.15	7.74
	MIROC6	-0.75	11.63	-0.73	9.80	0.70	4.61	0.67	3.74
زابل Zabol	NorESM2-MM	0.58	5.69	0.56	4.70	0.69	4.67	0.63	3.78
	ACCESS-CM2	0.59	6.62	0.53	5.14	0.75	4.97	0.73	3.93
	CMCC-ESM2	0.68	5.85	0.62	4.56	0.78	4.63	0.46	3.68
	CNRM-CM6-1-HR	0.54	6.94	0.54	5.36	0.72	5.19	0.70	4.12
	CNRM-ESM2-1	0.62	6.33	0.61	4.92	0.74	5.08	0.73	4.00
	EC-Earth3-CC	0.65	6.08	0.63	4.77	0.73	5.13	0.74	4.03
	EC-Earth3-Veg-LR	0.61	6.60	0.59	4.73	0.47	12.02	0.49	9.59
	INM-CM4-8	0.68	5.79	0.63	4.54	0.49	9.76	0.46	8.54
	INM-CM5-0	0.71	5.54	0.70	4.37	0.42	9.33	0.41	8.10
زاهدان Zahedan	MIROC6	0.04	10.10	0.04	8.41	0.61	6.16	0.60	5.04
	NorESM2-MM	0.66	6.03	0.64	4.77	0.76	4.84	0.73	3.84
	ACCESS-CM2	0.55	5.81	0.52	4.60	0.48	6.91	0.38	5.73
	CMCC-ESM2	0.45	6.42	0.43	5.33	0.45	8.77	0.15	7.62
	CNRM-CM6-1-HR	0.42	6.62	0.41	5.11	0.40	6.33	0.32	5.17
	CNRM-ESM2-1	0.48	6.24	0.47	4.81	0.49	6.36	0.37	5.18
	EC-Earth3-CC	0.58	5.63	0.56	4.31	0.43	6.14	0.41	4.87
	EC-Earth3-Veg-LR	0.58	5.65	0.59	4.47	0.44	6.08	0.40	4.87
	INM-CM4-8	0.50	6.14	0.47	5.05	0.43	6.17	0.43	5.00
	INM-CM5-0	0.53	5.95	0.52	4.88	0.44	6.10	0.45	4.95
	MIROC6	-1.38	13.39	-1.42	11.45	-0.58	10.26	-0.58	8.82
	NorESM2-MM	0.61	5.40	0.62	4.23	0.48	6.43	0.39	5.32

R², RMSE, NSE و MAE به‌ترتیب بیانگر ضریب تبیین، مجذور میانگین مربع خطا، کارایی نش-ساتکلایف و میانگین خطای مطلق می‌باشند.

R², RMSE, NSE, and MAE are correlation coefficient, root mean square error, Nash-Sutcliffe efficiency, and mean absolute error, respectively.

جدول ۴- شاخص‌های کارایی آماری ارزیابی داده‌های بارندگی مدل‌های اقلیمی

Table 4- Indicators of statistical performance in evaluating precipitation data from climate models

ایستگاه Station	مدل Model	R ²	RMSE (mm)	NSE	MAE (mm)
ایران‌شهر Iranshahr	ACCESS-CM2	0.19	2.28	-1.15	0.38
	CMCC-ESM2	0.14	2.09	-0.78	0.46
	CNRM-CM6-1-HR	0.05	3.70	-4.72	0.71
	CNRM-ESM2-1	0.06	3.34	-3.64	0.64
	EC-Earth3-CC	0.13	2.14	-0.91	0.37
	EC-Earth3-Veg-LR	0.16	2.06	-0.78	0.42
	INM-CM4-8	0.17	2.00	-0.66	0.64
	INM-CM5-0	0.15	2.03	-0.71	0.65
	MIROC6	0.05	3.49	-4.08	0.85
زابل Zabol	NorESM2-MM	0.09	2.35	-1.31	0.47
	ACCESS-CM2	0.19	1.39	-0.57	0.27
	CMCC-ESM2	0.10	1.63	-1.14	0.37
	CNRM-CM6-1-HR	0.06	1.91	-3.38	0.38
	CNRM-ESM2-1	0.07	1.60	-2.07	0.30
	EC-Earth3-CC	0.11	1.30	-1.01	0.23
	EC-Earth3-Veg-LR	0.08	1.45	-1.50	0.25
	INM-CM4-8	0.12	1.58	-1.02	0.54
	INM-CM5-0	0.08	1.78	-1.56	0.43
زاهدان Zahedan	MIROC6	0.05	2.65	-7.41	0.67
	NorESM2-MM	0.12	1.60	-2.07	0.35
	ACCESS-CM2	0.14	1.24	-0.86	0.24
	CMCC-ESM2	0.08	1.44	-1.50	0.31
	CNRM-CM6-1-HR	0.03	3.05	-6.52	0.66
	CNRM-ESM2-1	0.05	2.65	-4.67	0.56
	EC-Earth3-CC	0.09	1.66	-1.22	0.36
	EC-Earth3-Veg-LR	0.16	1.49	-0.80	0.33
	INM-CM4-8	0.10	1.30	-1.04	0.33
	INM-CM5-0	0.08	1.49	-1.67	0.40
	MIROC6	0.02	2.45	-3.84	0.65
	NorESM2-MM	0.13	1.55	-0.95	0.35

R², RMSE, NSE, and MAE به ترتیب بیانگر ضریب تبیین، مجذور میانگین مربع خطا، کارایی نش-ساتکلیف و میانگین خطای مطلق می‌باشند. R², RMSE, NSE, and MAE are correlation coefficient, root mean square error, Nash-Sutcliffe efficiency, and mean absolute error, respectively.

تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی

تصحیح اریبی داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو، نیازمند انتخاب بهترین روش آماری جهت دستیابی به صحیح‌ترین نتایج برای پیش‌نگری‌های آینده تغییرات اقلیمی در هر منطقه است (Rashidi Ghane et al., 2023). در بین روش‌های مختلف تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی هفت مدل مورد مطالعه برای تمام مناطق، بهترین کارایی را روش نقشه‌برداری توزیع دما برای دمای حداقل و حداکثر و روش نقشه‌برداری توزیع بارش برای بارندگی داشت (جدول‌های ۵ و ۶). با استفاده از این روش‌ها، در هر سه منطقه مورد مطالعه تغییرپذیری شبیه‌سازی‌های خام GCMs با موفقیت کاهش یافت و به داده‌های واقعی نزدیک‌تر شد. دامنه R²، RMSE، NSE و MAE برای داده‌های تصحیح اریبی شده دمای حداکثر به ترتیب به ۰/۶۵ تا ۰/۸۴، ۳/۸۳ تا ۶/۱ درجه‌سانتی‌گراد، ۰/۶۳ تا ۰/۹۵ و ۲/۹۱ تا ۴/۴۹ درجه‌سانتی‌گراد و برای داده‌های تصحیح اریبی شده دمای حداقل به ترتیب به ۰/۴۳ تا ۰/۸۰، ۳/۵۵ تا ۶/۱۱ درجه‌سانتی‌گراد، ۰/۳۹ تا ۰/۸۱ و ۲/۵۷ تا ۴/۷۸ درجه‌سانتی‌گراد بهبود یافت (جدول ۵). برای

داده‌های بارندگی، تصحیح اریبی با استفاده از روش نقشه‌برداری توزیع بارش باعث شد R² بین ۰/۳۵ تا ۰/۷۶، RMSE بین ۱/۰۲ تا ۱/۸۸ میلی‌متر، NSE بین ۰/۲۱ تا ۰/۶۹ و MAE بین ۰/۱۵ تا ۰/۵۱ میلی‌متر تغییر یابد (جدول ۶). باتوجه به حجم زیاد داده‌ها، نتایج مربوط به ارزیابی کارایی سایر مدل‌ها نشان داده نشده است. رشیدی قانع و همکاران (Rashidi Ghane et al., 2023) در مطالعه‌ای توانمندی روش‌های مختلف تصحیح اریبی با CMhyd را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش مقیاس‌گذاری خطی و نقشه‌برداری توزیع دما به ترتیب برای داده‌های بارش و دما از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها در ایستگاه‌های منتخب حوزه کشف‌رود برخوردار بودند. برارخان‌پور احمدی و همکاران (Bararkhanpour Ahmadi et al., 2024) نیز روش‌های مختلف تصحیح اریبی با CMhyd را ارزیابی نموده و نشان دادند که روش‌های نقشه‌برداری توزیع دما و مقیاس‌گذاری واریانس از همبستگی بالاتری با داده‌های دمای حداقل و حداکثر ایستگاهی استان مازندران در دوره پایه برخوردار بودند. به‌منظور درک درست و پیش‌نگری شرایط اقلیم آینده کره زمین،

به ترتیب ۱/۱۳، ۱/۷۳ و ۲/۵۳ درجه سانتی گراد در ایرانشهر، ۱/۴۲، ۲/۲۳ و ۳/۱۷ درجه سانتی گراد در زابل و ۱/۲۸، ۲/۴۴ و ۲/۸۳ درجه سانتی گراد در زاهدان و در سناریوی SSP5-8.5 به ترتیب ۱/۳۸، ۲/۷۵ و ۴/۵۳ درجه سانتی گراد در ایرانشهر، ۱/۷۶، ۳/۵۶ و ۵/۷۸ درجه سانتی گراد در زابل و ۱/۵۷، ۳/۱۵ و ۵/۱۲ درجه سانتی گراد در زاهدان افزایش خواهد یافت (شکل ۲).

میانگین سالانه دمای حداقل نیز در دوره آینده نزدیک، میانه و دور نسبت به دوره پایه در سناریوی SSP2-4.5 به ترتیب ۱/۴۰، ۲/۲۴ و ۲/۹۸ درجه سانتی گراد در ایرانشهر، ۱/۴۳، ۲/۱۹ و ۳/۱۲ درجه سانتی گراد در زابل و ۱/۸۷، ۳/۴۶ و ۴/۱۰ درجه سانتی گراد در زاهدان و در سناریوی SSP5-8.5 به ترتیب ۱/۷۲، ۳/۳۷ و ۵/۵۳ درجه سانتی گراد در ایرانشهر، ۱/۶۷، ۳/۵۷ و ۵/۸۷ درجه سانتی گراد در زابل و ۲/۲۲، ۴/۶۶ و ۷/۵۳ درجه سانتی گراد در زاهدان افزایش خواهد یافت (شکل ۳). افزایش قابل توجه دما در شرایط اقلیمی آینده ایران برای بخش های مختلف کشور در مطالعاتی مانند زرین و همکاران (Zarrin et al., 2021) و نیازکار و همکاران (Niazkar et al., 2023) نیز گزارش شده است. افزایش سالانه در میانگین دمای حداکثر و حداقل در این مطالعه عمدتاً ناشی از افزایش دمای هوا در ماه های ژانویه، فوریه، آگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر خواهد بود (شکل های ۲ و ۳).

استفاده از نتایج ریزمقیاس نمایی و تصحیح اریبی شده مدل های گردش عمومی جو در مناطق مختلف دنیا توصیه می گردد. با کم شدن عدم قطعیت مدل ها و همچنین پیشرفت فناوری و افزایش قدرت پردازش رایانه ها، روزه روز باید منتظر نتایج دقیق تر و پیش نگری های بهتر از این مدل ها بود (Rashidi Ghane et al., 2023).

باتوجه به نتایج حاصل از ارزیابی روش های مختلف تصحیح اریبی (جدول های ۵ و ۶) از روش نقشه برداری توزیع دما و بارش جهت تصحیح اریبی داده های اقلیمی در دوره های زمانی آینده استفاده شد. داده های تصحیح اریبی شده مدل های منتخب به صورت میانگین جهت ارزیابی میزان تغییرات در دوره های زمانی آینده مورد استفاده قرار گرفتند. چراکه باتوجه به تعدد مدل های اقلیمی و دسترسی آسان به داده های خروجی آن ها پیشنهاد می گردد جهت کاهش عدم قطعیت تا حد امکان از چندین مدل به جای یک مدل در مطالعات تغییر اقلیم استفاده شود (Yang et al., 2021).

تغییر در متغیرهای اقلیمی

در هر سه منطقه، میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه با افزایش مواجه خواهد شد که این افزایش در سناریوی SSP5-8.5 بیشتر از سناریوی SSP2-4.5 خواهد بود (شکل های ۲ و ۳). میانگین سالانه دمای حداکثر در دوره آینده نزدیک، میانه و دور نسبت به دوره پایه در سناریوی SSP2-4.5

جدول ۵- شاخص های کارایی آماری تصحیح اریبی داده های دمای حداکثر و حداقل با استفاده از روش نقشه برداری توزیع دما
Table 5- Indicators of statistical performance for bias-corrected maximum and minimum temperature data using the distribution mapping of temperature

ایستگاه Station	مدل Model	Tmax دمای حداکثر				Tmin دمای حداقل			
		R ²	RMSE (°C)	NSE	MAE (°C)	R ²	RMSE (°C)	NSE	MAE (°C)
ایرانشهر Iranshahr	ACCESS-CM2	0.84	3.84	0.83	2.93	0.79	3.81	0.72	2.98
	CMCC-ESM2	0.82	3.88	0.8	2.93	0.78	3.95	0.64	3.05
	EC-Earth3-CC	0.81	3.83	0.78	2.91	0.8	3.77	0.79	2.9
	EC-Earth3-Veg-LR	0.83	3.87	0.81	2.98	0.79	3.85	0.76	3.01
	INM-CM4-8	0.8	3.96	0.79	3.00	0.78	3.97	0.71	3.05
	INM-CM5-0	0.8	3.94	0.81	3.05	0.79	3.89	0.73	2.99
زابل Zabol	NorESM2-MM	0.75	4.37	0.75	3.34	0.73	4.36	0.75	3.42
	ACCESS-CM2	0.68	4.95	0.68	3.79	0.79	3.55	0.81	2.57
	CMCC-ESM2	0.82	4.92	0.68	3.8	0.78	4.6	0.76	3.61
	EC-Earth3-CC	0.7	4.33	0.95	3.69	0.79	4.49	0.78	3.53
	EC-Earth3-Veg-LR	0.77	4.85	0.69	3.74	0.8	4.45	0.81	3.49
	INM-CM4-8	0.8	5.02	0.67	3.83	0.78	4.66	0.77	3.62
زاهدان Zahedan	INM-CM5-0	0.82	4.95	0.68	3.83	0.78	4.61	0.61	3.62
	NorESM2-MM	0.73	5.28	0.63	4.06	0.74	5.01	0.63	3.95
	ACCESS-CM2	0.71	5.56	0.67	4.32	0.51	5.71	0.5	4.43
	CMCC-ESM2	0.71	5.53	0.7	4.31	0.49	5.79	0.43	4.49
	EC-Earth3-CC	0.73	5.38	0.72	4.00	0.53	5.59	0.52	4.43
	EC-Earth3-Veg-LR	0.72	5.43	0.69	4.24	0.51	5.73	0.48	4.42
	INM-CM4-8	0.69	5.68	0.70	4.41	0.48	5.89	0.44	4.53
	INM-CM5-0	0.68	5.77	0.67	4.49	0.51	5.72	0.39	4.38
	NorESM2-MM	0.65	6.10	0.63	4.04	0.43	6.11	0.71	4.78

R², RMSE, NSE, and MAE به ترتیب بیانگر ضریب تبیین، مجذور میانگین مربع خطا، کارایی نش-ساتکلِف و میانگین خطای مطلق می باشند.
R², RMSE, NSE, and MAE are correlation coefficient, root mean square error, Nash-Sutcliffe efficiency, and mean absolute error, respectively.

جدول ۶- شاخص‌های کارایی آماری تصحیح ارببی داده‌های بارندگی با استفاده از روش نقشه‌برداری توزیع بارش

Table 6- Indicators of statistical performance for bias-corrected precipitation data using the distribution mapping of precipitation

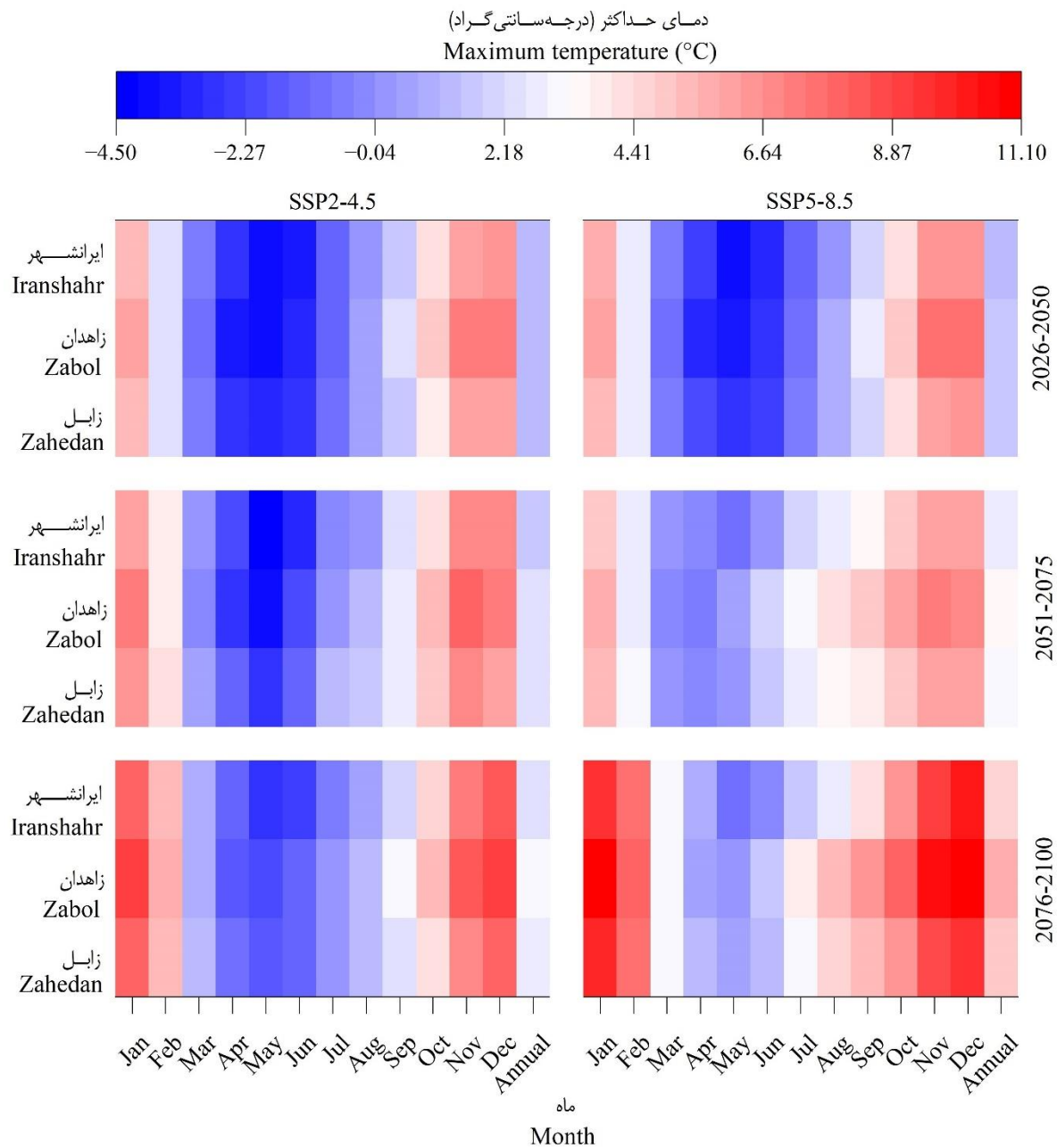
ایستگاه Station	مدل Model	R ²	RMSE (mm)	NSE	MAE (mm)
ایران‌شهر Iranshahr	ACCESS-CM2	0.58	1.04	0.62	0.26
	CMCC-ESM2	0.53	1.24	0.48	0.34
	EC-Earth3-CC	0.62	1.69	0.61	0.25
	EC-Earth3-Veg-LR	0.66	1.88	0.63	0.31
	INM-CM4-8	0.66	1.21	0.69	0.5
	INM-CM5-0	0.35	1.50	0.34	0.46
زابل Zabol	NorESM2-MM	0.52	1.46	0.50	0.39
	ACCESS-CM2	0.49	1.03	0.43	0.15
	CMCC-ESM2	0.44	1.21	0.29	0.27
	EC-Earth3-CC	0.44	1.02	0.21	0.16
	EC-Earth3-Veg-LR	0.69	1.23	0.55	0.18
	INM-CM4-8	0.46	1.3	0.42	0.21
زاهدان Zahedan	INM-CM5-0	0.47	1.11	0.4	0.35
	NorESM2-MM	0.76	1.31	0.37	0.19
	ACCESS-CM2	0.54	1.13	0.27	0.18
	CMCC-ESM2	0.51	1.2	0.23	0.29
	EC-Earth3-CC	0.46	1.21	0.34	0.24
	EC-Earth3-Veg-LR	0.63	1.14	0.6	0.21
	INM-CM4-8	0.43	1.11	0.38	0.43
	INM-CM5-0	0.54	1.03	0.31	0.51
	NorESM2-MM	0.43	1.24	0.42	0.22

R², RMSE, NSE, and MAE are correlation coefficient, root mean square error, Nash-Sutcliffe efficiency, and mean absolute error, respectively.

رخ خواهد داد. بالاین‌حال، حمیدیان‌پور و حجازی‌زاده (Hamidianpour & Hejazizadeh, 2012) افزایش بارندگی در فصل زمستان و کاهش بارندگی در فصل تابستان را در شهرهای زابل، زاهدان و چابهار برای دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ با استفاده از داده‌های مدل‌های CMIP3 گزارش نمودند. اختلاف نتایج این مطالعه با تحقیق حاضر ناشی از تفاوت در دوره‌های زمانی و داده‌های اقلیمی مورد مطالعه می‌باشد.

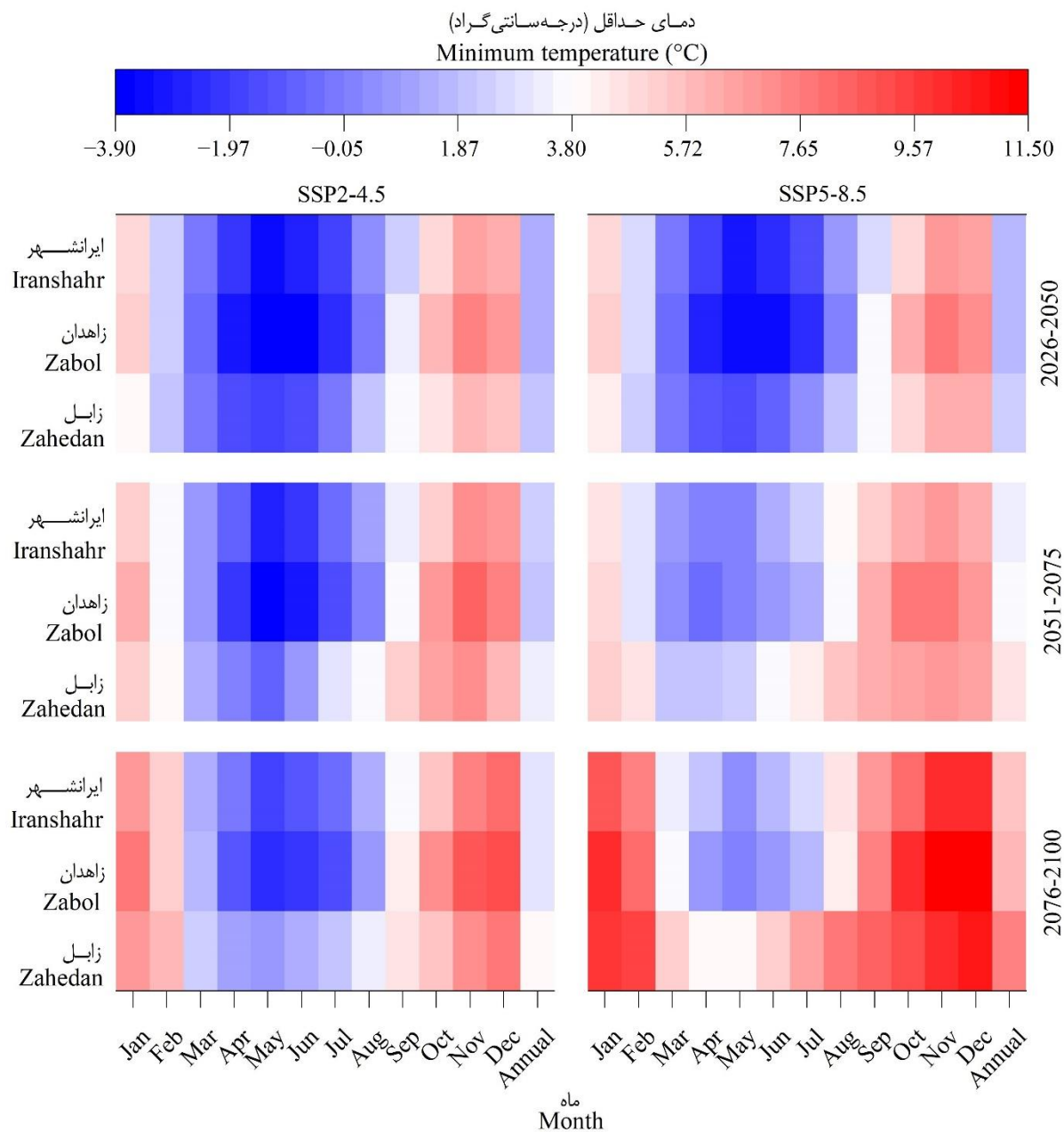
در بین مناطق مورد بررسی، زابل بیشترین میزان تغییر در دمای حداکثر و بارندگی سالانه و زاهدان بیشترین میزان تغییر در دمای حداقل را در آینده تجربه خواهند کرد (شکل‌های ۲-۴). این امر می‌تواند ناشی از عرض جغرافیایی بالاتر زابل و ارتفاع بیشتر زاهدان باشد (شکل ۱). در مطالعه‌ای یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) نشان دادند که مناطق با ارتفاع بیشتر و در عرض جغرافیایی بالاتر، تغییرات بیشتری را در دما و بارندگی در آینده تجربه خواهند کرد.

مجموع بارندگی سالانه در دوره آینده نزدیک، میانه و دور نسبت به دوره پایه در سناریوی SSP2-4.5 به ترتیب ۱۴/۶۵-، ۴/۸۴- و ۱۸/۲۸ درصد در ایران‌شهر، ۳۹/۵۶-، ۸/۸۹- و ۳۳/۷۸- درصد در زابل و ۲۴/۰۹-، ۳/۱۷ و ۱۴/۴۲- درصد در زاهدان و در سناریوی SSP5-8.5 به ترتیب ۱۵/۱۹-، ۲۱/۱۰- و ۴۹/۳۳ درصد در ایران‌شهر، ۵۸/۲۲-، ۲۵/۷۸- و ۲۰/۸۹- درصد در زابل و ۴۰/۱۰-، ۳۹/۶۲- و ۴/۱۲ درصد در زاهدان تغییر پیدا خواهد کرد (شکل ۴). کاهش سالانه بارندگی عمدتاً از کاهش بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارچ، نوامبر و دسامبر و افزایش سالانه بارندگی از افزایش قابل توجه بارندگی در ماه‌های می و اکتبر نسبت به دوره پایه ناشی خواهد شد (شکل ۴). به عبارت دیگر بارندگی در آینده نسبت به دوره پایه عمدتاً در فصول پاییز و زمستان کاهش و در فصول بهار و تابستان افزایش خواهد یافت. کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2022) نیز در مطالعه‌ای افزایش میزان بارندگی در ماه‌های خشک سال (جولای تا سپتامبر) را در اکثر مناطق کشور در دوره‌های آتی پیش‌بینی نمودند. زارعیان (Zareian, 2022) نیز در مطالعه‌ای بیان داشتند که بیشترین میزان کاهش بارندگی در شهرهای مختلف استان یزد در فصل پاییز



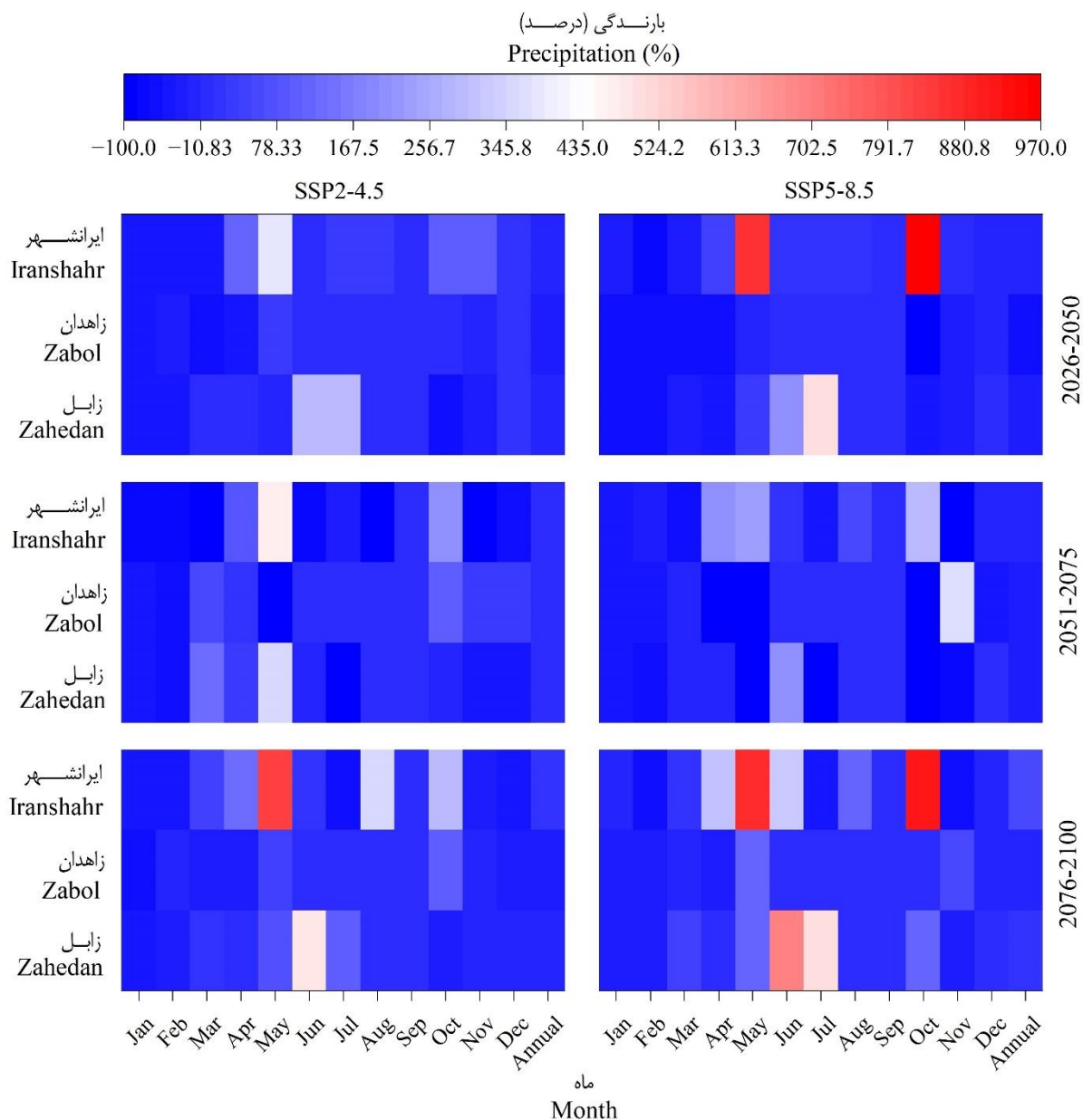
شکل ۲- تغییرات پیش‌بینی شده دمای حداکثر ماهانه و سالانه در سه دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 2- Projected changes of monthly and annual maximum temperature in the 2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100 relative to the baseline period (1990-2014) under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 emission scenarios



شکل ۳- تغییرات پیش‌بینی‌شده دمای حداقل ماهانه و سالانه در سه دوره ۲۰۲۶–۲۰۵۰، ۲۰۵۱–۲۰۷۵ و ۲۰۷۶–۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰–۲۰۱۴) برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 3- Projected changes of monthly and annual minimum temperature in the 2026–2050, 2051–2075, and 2076–2100 relative to the baseline period (1990–2014) under SSP2–4.5 and SSP5–8.5 emission scenarios



شکل ۴- تغییرات پیش‌بینی شده بارندگی ماهانه و سالانه در سه دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 4- Projected changes of monthly and annual maximum precipitation in the 2026–2050, 2051–2075, and 2076–2100 relative to the baseline period (1990–2014) under SSP2–4.5 and SSP5–8.5 emission scenarios

نتیجه‌گیری

مختلف موجود در CMhyd، روش نقشه‌برداری توزیع دما و بارش کارایی بهتری در تصحیح اریبی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی داشتند. همچنین نتایج نشان داد که تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، دمای حداکثر و حداقل در دوره‌های آینده نزدیک، میانه و دور نسبت به دوره پایه با افزایش مواجه خواهد شد که این افزایش در ماه‌های سرد سال (فصل‌های پاییز و زمستان) بیشتر از ماه‌های گرم سال خواهد بود. با این حال، تغییرات بارندگی در دوره‌های زمانی آینده به

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های CMIP6 کارایی خوبی در شبیه‌سازی دمای حداقل و حداکثر و کارایی ضعیفی در شبیه‌سازی بارندگی روزانه در سه منطقه زابل، زاهدان و ایران‌شهر دارند. با این حال، تصحیح اریبی داده‌های مدل‌های اقلیمی سبب بهبود کارایی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی گردید و در بین روش‌های

اهمیت بسیار دارد.

سیاسگذاری

این مقاله با حمایت‌های مالی پژوهشگاه زابل مستخرج از طرح پژوهشی با کد PR-RIOZ-1402-5504-1 اجرا گردیده است که بدین‌وسیله قدردانی می‌گردد.

یک شکل نبوده و در برخی دوره‌ها شاهد کاهش و برخی شاهد افزایش بارندگی نسبت به دوره پایه خواهیم بود. اما در حالت کلی میزان کاهش بارندگی بیشتر از افزایش آن خواهد بود. لذا از آنجایی که مناطق مورد مطالعه دارای اقلیم خشک بوده احتمالاً در آینده با مشکلات متعددی در زمینه تأمین منابع آب لازم برای بخش‌های مختلف مواجه خواهند شد. در نتیجه تدوین و اجرای برنامه‌های مدیریتی مناسب در راستای نیاز هر منطقه، به‌منظور مدیریت مناسب منابع آب و سازگاری با دماهای حدی و عواقب آن،

References

1. Abdolizadeh, F., Mohammad Khorshiddoust, A., & Jahanbakhsh, S. (2023). Projection of the future outlook of temperature and precipitation in Urmia Lake basin by the CMIP6 models. *Physical Geography Research*, 55(1), 95-112. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.352727.1007737>
2. Ashraf, B., Alizade, A., Mousavi Baygi, M., Bannayan Aval, M. (2013). Verification of temperature and precipitation simulated data by individual and ensemble performance of five AOGCM models for North East of Iran. *Journal of Water and Soil*, 28(2), 253-266. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.38011>.
3. Bağcı, S.Ç., Yücel, I., Düzenli, E., & Yılmaz, M.T. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, 256, 105576. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105576>
4. Bararkhanpour Ahmadi, S., Nadi, M., Mazloom Babanari, S., & Jedariforouhi, A. (2024). Analyzing the effect of climate change on the trend of extreme temperatures along the coast of Mazandaran province based on CMIP6 models. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(4), 1-27. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2023.21185.3635>
5. Faisal, A.A., Taha, D.S., Hassan, W.H., Lakhera, S.K., Ansar, S., & Pradhan, S. (2023). Subsurface flow constructed wetlands for treating of simulated cadmium ions-wastewater with presence of *Canna indica* and *Typha domingensis*. *Chemosphere*, 338, 139469. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139469>
6. GhorbaniMinaei, L., Mosaedi, A., Zakerinia, M., Kalbali, E., & Ghabaei Soogh, M. (2024). Study of future climate change on the temperature and precipitation trends in Qarasu basin based on the CMIP6 models. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(2), 245-268. (In Persian with English abstract)
7. Hamidianpour, M., & Hejazizadeh, Z. (2012). Investigating changes in temperature and precipitation using the atmospheric general circulation model, a case study of Sistan-va-Baluchestan province. National Congress on Border Cities and Security; Challenges and Strategies-CBCS, Sistan-va-Baluchestan University, Zahedan, Iran. (In Persian)
8. Hassan, W.H., Nile, B.K., Mahdi, K., Wesseling, J., & Ritsema, C. (2021). A feasibility assessment of potential artificial recharge for increasing agricultural areas in the Karbala desert in Iraq using numerical groundwater modeling. *Water*, 13(22), 3167. <https://doi.org/10.3390/w13223167>
9. IPCC. (2020). The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
10. Kamworapan, S., Thao, P.T.B., Gheewala, S. H., Pimonsree, S., & Prueksakorn, K. (2021). Evaluation of CMIP6 GCMs for simulations of temperature over Thailand and nearby areas in the early 21st century. *Heliyon*, 7(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08263>
11. Koocheki, A., Mahallati, M.N., Bannayan, M., & Yaghoubi, F. (2022). Simulating resilience of rainfed wheat-based cropping systems of Iran under future climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 27(4), 27. <https://doi.org/10.1007/s11027-022-09996-3>
12. Kouhi, M., Mousavi Baygi, M., Farid hosseini, A.R., Sanaei Nejad, S.H., & Jabbari Nooghabi, H. (2012). Statistical downscaling of extremes of precipitation and construction of their future scenarios in the Kashfroud Basin. *Journal of Climate Research*, 1391(12), 35-53. (In Persian with English abstract)
13. Mianabadi, A., Bateni, M.M., & Mohammadi, S. (2023). Projection of change in the distribution of precipitation and temperature using bias-corrected simulations of CMIP6 climate models (Case study: Kerman synoptic station). *Journal of Climate Change Research*, 4(13), 65-84. (In Persian with English abstract)
14. Mohsen, K.A., Nile, B.K., & Hassan, W.H. (2020). Experimental work on improving the efficiency of storm networks using a new galley design filter bucket. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 671, No. 1. IOP Publishing, 012094.

15. Monte Verde, C., De Sales, F., & Jones, C. (2022). Evaluation of the CMIP6 performance in simulating precipitation in the Amazon River basin. *Climate*, 10(8), 122. <https://doi.org/10.3390/cli10080122>
16. Muhaisen, N.K., Khayyun, T.S., Al Mukhtar, M., & Hassan, W.H. (2024). Forecasting changes in precipitation and temperatures of a regional watershed in Northern Iraq using LARS-WG model. *Open Engineering*, 14(1), 20220567.
17. Mukheef, R.A., Hassan, W.H., & Alquzweeni, S. (2024). Projections of temperature and precipitation trends using CMhyd under CMIP6 scenarios: A case study of Iraq's Middle and West. *Atmospheric Research*, 306, 107470. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107470>
18. Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
19. Niazkar, M., Goodarzi, M.R., Fatehifar, A., & Abedi, M.J. (2023). Machine learning-based downscaling: application of multi-gene genetic programming for downscaling daily temperature at Dogonbadan, Iran, under CMIP6 scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1), 153-168.
20. Rashid, H., Yang, K., Zeng, A., Ju, S., Rashid, A., Guo, F., & Lan, S. (2021). Predicting the hydrological impacts of future climate change in a humid-subtropical watershed. *Atmosphere*, 13(1), 12. <https://doi.org/10.3390/atmos13010012>
21. Rashidi Ghane, M., Motevalli, S., Janbaz Ghobadi, G.R., & Kouhi, M. (2023). Evaluation of the ability of three statistical methods to downscale the output of temperature and precipitation of CMIP6 models in the Kashfrud basin. *Journal of Climate Research*, 1402(53), 117-132. (In Persian with English abstract)
22. Taylor, K.E. (2005). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal Geophysics Research*, 106, 7183-7192. <http://www.pcmdi.llnl.gov/publications/ab55.html>
23. Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456, 12-29.
24. Van Wart, J., Grassini, P., Yang, H., Claessens, L., Jarvis, A., & Cassman, K.G. (2015). Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.020>
25. Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
26. Yang, X., Zhou, B., Xu, Y., & Han, Z. (2021). CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38, 817-830. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0351-4>
27. Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 250, 105369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369>
28. Zareian, M. (2022). Effects of climate change on temperature and precipitation in Yazd province based on combined output of CMIP6 models. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 26(2), 91-105. (In Persian with English abstract)
29. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Evaluation of CMIP6 models in estimating temperature in Iran with emphasis on equilibrium climate sensitivity (ECS) and transient climate response (TCR). *Iranian Journal of Geophysics*, 17(1), 39-56. (In Persian with English abstract)
30. Zarrin, A., Dadashi-Rodbari, A., & Salehabadi, N. (2021). Projected temperature anomalies and trends in different climate zones in Iran based on CMIP6. *Iranian Journal of Geophysics*, 15(1), 35-54. <https://doi.org/10.30499/ijg.2020.249997.1292>

Contents

Evaluation of Irrigation Management and Plastic Mulch Effects on Water Productivity and Quantitative and Qualitative Yield of Lemon Balm (<i>Melissa officinalis</i> L.)	667
N. Najafi Iman Abadi, M.A. Gholami Sefidkouhi, S. Shiukhy-Soqanloo	
A Comparative Analysis of Energy Efficiency of Two Sprinkler Irrigation Systems for Wheat Cultivation (Case Study: Dehgolan Plains, Kurdistan)	683
P. Tahmasbi, F. Dalvand, S.A. Hosseini, B. Karimi, H. Ghadrshnas	
Effects of Different Levels of Selenium in the Nutrient Solution on the Growth and Nitrate Accumulation of Red French Lettuce in Soilless Culture	699
N. Lotfi, Sh. Kiani, H.R. Motaghian	
The Effect of Different Tillage Methods and Application of Plant Residues on Yield, Protein and Nitrogen Percentage of Triticale Plant (<i>X Triticosecale</i> Wittmack) and Physical and Chemical Indicators of Soil	713
S. Hosseinzadeh, E. Fateh, A. Aynehband, M. Farzaneh, J. Habibi Asl	
Evaluation of Nutritional Status of Sugarcane Fields in North of Khuzestan Province Using the Compositional Nutrient Diagnosis Method	733
A. Neisi, M. Chorom, H. Ghafari, J. Alkasir	
Evaluation of Regression and Intelligent Models for Estimating Mean Weight Diameter of Wet Aggregates	749
Sh. Asghari, K. Heidari, M. Hasanpour Kashani, H. Shahab Arkhazloo	
Projections of Temperature and Precipitation Changes under CMIP6 Scenarios in Sistan-va-Baluchestan Province	765
S. Mirshekari, F. Yaghoubi, S.A. Hashemi	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 38 No. 6 Feb.-Mar. 2025

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

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

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

Editorial Board:

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



Ferdows University
of Mashhad

Vol. 38 No. 6

2025

Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

Evaluation of Irrigation Management and Plastic Mulch Effects on Water Productivity and Quantitative and Qualitative Yield of Lemon Balm (<i>Melissa officinalis</i> L.)	667
N. Najafi Iman Abadi, M.A. Gholami Sefidkouhi, S. Shiukhy-Soqanloo	
A Comparative Analysis of Energy Efficiency of Two Sprinkler Irrigation Systems for Wheat Cultivation (Case Study: Dehgolan Plains, Kurdistan)	683
P. Tahmasbi, F. Dalvand, S.A. Hosseini, B. Karimi, H. Ghadrshnas	
Effects of Different Levels of Selenium in the Nutrient Solution on the Growth and Nitrate Accumulation of Red French Lettuce in Soilless Culture	699
N. Lotfi, Sh. Kiani, H.R. Motaghian	
The Effect of Different Tillage Methods and Application of Plant Residues on Yield, Protein and Nitrogen Percentage of Triticale Plant (<i>X Triticosecale</i> Wittmack) and Physical and Chemical Indicators of Soil	713
S. Hosseinzadeh, E. Fateh, A. Ayneband, M. Farzaneh, J. Habibi Asl	
Evaluation of Nutritional Status of Sugarcane Fields in North of Khuzestan Province Using the Compositional Nutrient Diagnosis Method	733
A. Neisi, M. Chorom, H. Ghafari, J. Alkasir	
Evaluation of Regression and Intelligent Models for Estimating Mean Weight Diameter of Wet Aggregates	749
Sh. Asghari, K. Heidari, M. Hasanpour Kashani, H. Shahab Arkhazloo	
Projections of Temperature and Precipitation Changes under CMIP6 Scenarios in Sistan-va-Baluchestan Province	765
S. Mirshekari, F. Yaghoubi, S.A. Hashemi	