نشریه علمی

بوم شناسی کشاورزی (فصلنامه)

جلد ۱۸ شماره ۲

تابستان ۱۴۰۵

(شماره پیاپی ۶۸)

شاپا: ۲۰۰۸-۷۷۱۳

عنوان مقالات

حفظ عملکرد و بهبود کارآیی مصرف آب سویا (*Glycine max* L.) با استفاده از مالچ کلش گندم (*Triticum aestivum* L.): ارزیابی مبتنی بر آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی ۱۶۷

عفت پراور، افشین سلطانی، سید رضا امیری، ابراهیم زینلی و فرشید قادری فر

بهبود عملکرد کمّی و کیفی دانه کامل‌ینا (Camelina sativa L.) با کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی، زیستی و نانوکیتوزان در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی ۱۸۵

عبدالله جوانمرد، محمد حقانی‌نیا و حانیه شب‌خیز

پاسخ فیزیولوژیکی و عملکرد ارقام گندم (Triticum aestivum L.) نان به تنش دمایی در یک نظام کشت متوالی (تابستانه-زمستانه) در منطقه شاوور-خوزستان ۲۱۵

محمد علی مولایی، سیدکیوان مرعشی، عبدالعلی گیلانی، شهرام لک و مجتبی علوی فاضل

ارزیابی زراعی، بوم‌شناختی و اقتصادی کشت مخلوط جو (Hordeum vulgare L.) و ماشک (Vicia panonica) در تناوب با برنج (Oryza sativa L.) در شالیزار ۲۳۱

محمد ربیعی و سجاد شاکرکوهی

ارزیابی عملکرد و ثبات عملکرد جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویای گندم (Triticumaestivum L.) دیم در ایران ۲۴۹

مائده سلیمی ، علیرضا کوچکی، مهدی نصیری محلاتی، سید علیرضا بهشتی، استفانیا گراندو و سالواتوره چکرلی

تأثیر تاریخ کاشت بر رشد و عملکرد نخود (Cicer arietinum L.) در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی ۲۷۳

شهرام چوبتاشانی، حسن حیدری و محمداقبال قبادی

نشریه بوم شناسی کشاورزی (فصلنامه)
دانشگاه فردوسی مشهد

با شماره پروانه ۸۹/۲۲۵۱۵ مورخه ۸۹/۹/۲۸ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی
درجه علمی پژوهشی شماره ۸۹/۳/۱۱/۵۲۴۷۹ مورخه ۸۹/۹/۸ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

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

جلد۱۸ شماره۲ تابستان ۱۴۰۵

صاحب امتیاز و ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد
مدیر مسئول: دکتر بهنام کامکار، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
سردبیر: دکتر پرویز رضوانی مقدم، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
مدیر داخلی: دکتر سرور خرم‌دل، دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

اعضای هیئت تحریریه (به‌ترتیب حروف الفبا)

دکتر امیربهزاد بذرگر، دانشگاه گوئلف، کانادا
دکتر مرتضی برمکی، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی
دکتر محمد پسرکلی، استاد پژوهشی، دانشکده علوم گیاهی، دانشگاه آریزونا
دکتر همت اله پیردشتی، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی ومنابع طبیعی ساری
دکتر امیرحجارپور، پژوهشگر، دانشگاه جولیوس کوهن، آلمان
دکتر سرور خرم دل، دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر عادل دباغ محمدی نسب، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
دکتر مهدی راستگو، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر پرویز رضوانی مقدم، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر احمد زارع فیض آبادی، استاد، مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی
دکتر سعید زهتاب سلماسی، استاد، دانشگاه نیو مکزیکو، ایالات متحده آمریکا
دکتر حمید شاهنده، پژوهشگر علوم خاک، گروه علوم خاک و گیاهان زراعی، دانشگاه تگزاس A & M
دکتر امید عبدی، گروه علوم جنگل، دانشگاه هلسینکی، فنلاند
دکتر فرشید قادری فر، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
دکتر منصور قربانپور، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک
دکتر بهنام کامکار، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر محمدرضا مرادی تلاوت، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
دکتر احمد مصدق منشادی، دانشیار،گروه علوم زراعی، دانشگاه منابع طبیعی و علوم زیستی، وین
دکتر مهدی نصیری محلاتی، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، دبیرخانه نشریات علمی، دفتر نشریه بوم شناسی کشاورزی، صندوق پستی: ۱۱۶۳-۹۱۷۷۵
تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۴۶۵۴ **نمابر:** ۰۵۱-۳۸۷۸۷۴۳۰
پست الکترونیکی: agroecology@um.ac.ir **آدرس سایت:** https;//agry.um.ac.ir

این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:
DOAJ, CABI, Google Scholar, AGRIS, Internet Archive, Ebsco, Europub
پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC) ، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)

مقالات این شماره در سایت https://agry.um.ac.ir به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

حفظ عملکرد و بهبود کارآیی مصرف آب سویا (*Glycine max* L.) با استفاده از مالچ کلش گندم (*Triticum aestivum* L.): ارزیابی مبتنی بر آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی ۱۶۷

عفت پراور، افشین سلطانی، سید رضا امیری، ابراهیم زینلی و فرشید قادری فر

بهبود عملکرد کمّی و کیفی دانه کاملینا (Camelina sativa L.) با کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی، زیستی و نانوکیتوزان در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی ۱۸۵

عبدالله جوانمرد، محمد حقانی‌نیا و حانیه شب‌خیز

پاسخ فیزیولوژیکی و عملکرد ارقام گندم (Triticum aestivum L.) نان به تنش دمایی در یک نظام کشت متوالی (تابستانه- زمستانه) در منطقه شاوور-خوزستان ۲۱۵

محمد علی مولایی، سیدکیوان مرعشی، عبدالعلی گیلانی، شهرام لک و مجتبی علوی فاضل

ارزیابی زراعی، بوم‌شناختی و اقتصادی کشت مخلوط جو (Hordeum vulgare L.) و ماشک (Vicia panonica) در تناوب با برنج (Oryza sativa L.) در شالیزار ۲۳۱

محمد ربیعی و سجاد شاکرکوهی

ارزیابی عملکرد و ثبات عملکرد جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویای گندم (Triticumaestivum L.) دیم در ایران ۲۴۹

مائده سلیمی ، علیرضا کوچکی، مهدی نصیری محلاتی، سید علیرضا بهشتی، استفانیا گراندو و سالواتوره چکرلی

تأثیر تاریخ کاشت بر رشد و عملکرد نخود (Cicer arietinum L.) در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی ۲۷۳

شهرام چوبتاشانی، حسن حیدری و محمداقبال قبادی

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 18, No. 2, 2026, p. 165-182

Maintaining Yield and Improving Water Use Efficiency of Soybean (*Glycine max*) with Wheat (*Triticum* spp.) Straw Mulch: An Assessment Based on Field Experiment and Modeling

Effat Paravar[1], Afshin Soltani[1]*, Seyed Reza Amiri[2], Ebrahim Zeinali[1] and Farshid Ghaderi Far[1]

1- Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran
(*- Corresponding author's Email: Afshin.Soltani@gau.ac.ir, Afshin.Soltani@gmail.com)

Received: 13-11-2025
Revised: 23-05-2026
Accepted: 01-06-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:
Paravar, E., Soltani, A., Amiri, S. R., Zeinali, E., & Ghaderi Far, F. (2026). Maintaining yield and improving water use efficiency of soybean (*Glycine max*) with wheat (*Triticum* spp.) straw mulch: an assessment based on field experiment and modeling. *Journal of Agroecology*, *18*(2), 165-182. (In Persian)
https:// doi.org/10.22067/AGRY.2026.96489.1260

Introduction

Freshwater scarcity and the increasing demand from the agricultural sector, which consumes approximately 70% of global freshwater, have posed serious challenges to global food security. This pressure is particularly severe in arid and semi-arid regions like Iran, where high evaporation rates and irregular rainfall threaten crop production sustainability. Conservation agriculture, particularly the retention of crop residues (straw mulch) on the soil surface, is an effective strategy to manage soil and water resources. Mulch conserves soil moisture by physically reducing the solar radiation reaching the soil, thus directly decreasing soil evaporation, especially during the early stages of crop growth. In Golestan province, Iran's primary soybean (*Glycine max* L.) production hub, soybean is mostly cultivated in rotation with wheat (*Triticum aestivum* L.). However, farmers commonly burn or remove wheat residues to accelerate land preparation, exposing the soil to severe evaporation. Despite the importance of residue retention, there is a lack of quantitative knowledge regarding the effects of different mulch rates on soybean water-saving in this region. Therefore, this study aimed to quantitatively evaluate the impact of various rates of wheat straw mulch on soil evaporation, irrigation requirements, and the water use efficiency (WUE) of soybean using an integrated field experiment and simulation modeling approach.

Materials and Methods

This study utilized a two-step integrated approach comprising a field experiment and long-term simulation modeling. First, a field experiment was conducted at the research farm of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, to quantify the effect of mulch on soybean phenology. The experiment was laid out in a randomized complete block design with four replications. Treatments consisted of six levels of wheat straw mulch: 0 (control), 750, 1500, 2250, 3000, and 3750 kg ha^{-1}. Soybean (cv. DPX) was sown on July 1. Phenological stages, particularly days to emergence and flowering, were meticulously recorded to extract

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

https:// doi.org/10.22067/AGRY.2026.96489.1260

linear correction factors. In the second step, the SSM-iLegume model was employed for long-term simulations (2000-2020) across two distinct climates in Golestan province: Gorgan and Minodasht. The model's genetic coefficients for the DPX cultivar had been previously parameterized and evaluated for the region in previous studies. The primary novelty in the modeling phase was incorporating the mulch effect. Using the field data, correction factors were applied to simulate the delay in phenology caused by mulch. Furthermore, the physical effect of mulch on reducing potential soil evaporation (Ep) was dynamically simulated based on the soil cover fraction. The model simulated crop responses, water balance components, and WUE under the specified mulch treatments and automated irrigation scenarios. Output data were statistically analyzed using Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test (p<0.05) in SAS 9.4 software.

Results and Discussion

Field observations indicated that wheat straw mulch significantly delayed soybean phenology by shading the soil and reducing received thermal time. Specifically, for every one ton per hectare of applied mulch, emergence and flowering were delayed by 0.7 and 1.03 days, respectively. These correction factors were successfully integrated into the SSM-iLegume model. Long-term simulation results revealed that while straw mulch did not significantly alter the total above-ground dry matter and grain yield in either Gorgan or Minodasht, it profoundly impacted the soil water balance. Mulch cover significantly reduced cumulative evaporation (CE) from the soil surface, especially during the early growth stages before canopy closure. The application of 3.75 t ha^{-1} of mulch decreased CE by 51% (equivalent to 68 mm) in Gorgan and by 50% (equivalent to 92 mm) in Minodasht over the growing season. Consequently, the ratio of soil evaporation to total evapotranspiration (E/ET) decreased to its lowest levels (0.16 and 0.18 in Gorgan and Minodasht, respectively). The significant reduction in non-productive evaporation translated directly into decreased irrigation water requirements. Applying 3.75 t ha^{-1} of mulch reduced the required irrigation volume by 15% (from 329 mm to 280 mm) in Gorgan and by 21% (from 366 mm to 288 mm) in Minodasht, eliminating the need for approximately one irrigation event per season. Because grain yield was maintained while water consumption decreased, Water Use Efficiency (WUE) improved significantly, reaching maximum values of 14.9 and 16.8 kg ha^{-1} mm^{-1} in Gorgan and Minodasht, respectively, under the highest mulch rate. Furthermore, scaling these findings to the 57,462 hectares of soybean cultivated area in Golestan province demonstrated that implementing this residue management strategy could potentially save up to 34.41 million cubic meters of agricultural water annually.

Conclusion

In conclusion, the integrated field and modeling assessment demonstrated that utilizing wheat straw mulch is a highly efficient agronomic strategy for soybean production in semi-arid regions. Retaining up to 3.75 t ha^{-1} of crop residues significantly suppresses soil evaporation and improves water use efficiency without incurring any yield penalty. This practice not only ensures the sustainability of crop production but also plays a vital role in conserving scarce regional freshwater resources. Transitioning from the conventional practice of residue burning to conservation agriculture is strongly recommended to optimize water footprints and mitigate the impacts of climate change on agricultural ecosystems.

Keywords: Mulch, Soil evaporation, Water productivity, Water saving

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱۸۲-۱۶۵

حفظ عملکرد و بهبود کارآیی مصرف آب سویا (*Glycine max* L.) با استفاده از مالچ کلش گندم (*Triticum aestivum* L.): ارزیابی مبتنی بر آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی

عفت پراور[۱]، افشین سلطانی[۱*]، سید رضا امیری[۲]، ابراهیم زینلی[۱] و فرشید قادری فر[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

چکیده

محدودیت منابع آب شیرین و تقاضای بالای بخش کشاورزی، ضرورت به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی برای بهینه‌سازی مصرف آب را دوچندان کرده است. کشاورزی حفاظتی و حفظ بقایای گیاهی بر سطح خاک از جمله روش‌های مؤثری هستند که با کاهش تبخیر و حفظ رطوبت، به پایداری تولید کمک می‌کنند. این پژوهش با هدف ارزیابی کمّی تأثیر مقادیر مختلف مالچ کلش بر تبخیر از سطح خاک، نیاز آبی و کارآیی مصرف آب سویا (*Glycine max* L.) طراحی و اجرا گردید. مطالعه به‌صورت تلفیقی از آزمایش مزرعه‌ای و شبیه‌سازی در دو منطقه با اقلیم متفاوت، گرگان و مینودشت انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل شش سطح مالچ کلش گندم (*Triticum aestivum* L.) شامل شاهد (بدون مالچ)، ۷۵۰، ۱۵۰۰، ۲۲۵۰، ۳۰۰۰ و ۳۷۵۰ کیلوگرم در هکتار بودند. نتایج نشان داد که پوشش مالچ به‌طور معنی‌داری تبخیر از سطح خاک را به‌ویژه در مراحل اولیه رشد که پوشش گیاهی کامل نیست، کاهش داد. کاربرد ۳/۷۵ تن مالچ در هکتار، تبخیر تجمعی را در گرگان به‌میزان ۵۱ درصد (معادل ۶۸ میلی‌متر) و در مینودشت به‌میزان ۵۰ درصد (معادل ۹۲ میلی‌متر) در طول فصل رشد کاهش داد. این کاهش تبخیر منجر به کاهش نیاز به آب آبیاری به‌ترتیب به‌میزان ۱۵ درصد در گرگان و ۲۱ درصد در مینودشت شد؛ به‌طوری که حجم آب آبیاری در مینودشت از ۳۶۶ میلی‌متر در شاهد به ۲۸۸ میلی‌متر در تیمار ۳/۷۵ تن مالچ رسید. نتایج حاصل از تعمیم این یافته‌ها به کل اراضی زیرکشت سویا در استان گلستان نشان داد که با اجرای این روش مدیریتی، پتانسیل صرفه‌جویی سالانه حدود ۳۴/۴۱ میلیون مترمکعب آب وجود دارد. بنابراین، استفاده از مالچ کلش یک راهکار مدیریتی کارآمد برای افزایش پایداری تولید و حفظ منابع ارزشمند آب در منطقه است.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تبخیر از سطح خاک، صرفه‌جویی آب، مالچ

مقدمه

محدودیت منابع آب شیرین در کنار افزایش تقاضا ناشی از رشد جمعیت، امنیت غذایی جهانی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین، با مصرف حدود ۷۰ درصد از کل برداشت جهانی، در کانون این چالش قرار دارد (Musie & Gonfa, 2023). این فشار به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران که تبخیر بالا و بارش نامنظم پایداری تولید را تهدید می‌کند، دوچندان است. بنابراین، به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی، یک ضرورت انکارناپذیر است (Davis et al., 2024).

در این راستا، اصول کشاورزی حفاظتی و به‌طور خاص، حفظ بقایای گیاهی (مالچ کلش) بر سطح خاک، به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای مدیریت پایدار آب و خاک شناخته می‌شود. مالچ با ایجاد یک

۱- دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: afshin.soltani@gmail.com)

https:// doi.org/10.22067/AGRY.2026.96489.1260

لایه پوششی، از دو طریق اصلی به حفظ رطوبت خاک کمک می‌کند: اولاً، با کاهش رسیدن انرژی تابشی خورشید به سطح خاک، به‌طور مستقیم تبخیر را که عامل اصلی اتلاف آب در مراحل اولیه رشد است، کاهش می‌دهد. ثانیاً، با کاهش رَواناب سطحی، فرصت نفوذ آب باران و آبیاری به داخل خاک را افزایش می‌دهد (Grover et al., 2024; Baloch et al., 2025).

مطالعات متعدد در سراسر جهان، اثرات مثبت کاربرد مالچ کلش را بر بهبود شرایط فیزیکی خاک و رشد گیاه تأیید کرده‌اند. این اثرات شامل تعدیل دمای خاک (کاهش دمای حداکثری در تابستان)، افزایش مواد آلی و بهبود عملکرد محصولات مختلف مانند ذرت (*Zea mays* L.)و گندم (*Triticum aestivum* L.) است (Imran, 2024; Liang et al., 2025). به‌طور خاص، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مالچ می‌تواند به‌طور چشمگیری ذخیره رطوبتی خاک را افزایش داده و بهره‌وری آب را به‌ویژه در شرایط دیم و یا آبیاری محدود بهبود بخشد(Demo & Asefa Bogale, 2024; Zhang et al., 2024) .

سویا (*Glycine max* L.) یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در ایران است و استان گلستان با بیشترین سطح زیرکشت، قطب اصلی تولید این محصول در کشور محسوب می‌شود (FAO, 2022). در این منطقه، سویا عمدتاً در تناوب با گندم کشت می‌شود. بااین‌حال، یک چالش مدیریتی رایج، سوزاندن یا حذف کامل بقایای گندم پس از برداشت برای تسریع عملیات آماده‌سازی زمین است. این عمل، خاک را در برابر تبخیر شدید و فرسایش آسیب‌پذیر کرده و مزایای بالقوه حفظ بقایا را از بین می‌برد. با وجود اهمیت این موضوع، دانش کمی در مورد تأثیر کمّی مقادیر مختلف مالچ بر صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری سویا در این منطقه وجود دارد.

بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی کمّی اثر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر عملکرد و کارآیی مصرف آب سویا طراحی شد. برای دستیابی به این هدف، از یک رویکرد تلفیقی شامل آزمایش مزرعه‌ای (برای کالیبراسیون مدل) و شبیه‌سازی بلندمدت (۲۰ ساله) با مدل SSM-iLegume برای دو منطقه گرگان و مینودشت استفاده گردید. به‌طور مشخص، این تحقیق به‌دنبال پاسخ به این پرسش کلیدی بود که آیا و به چه میزان، کاربرد مالچ بقایا می‌تواند به کاهش نیاز آبی و افزایش بهره‌وری آب در تولید پایدار سویا منجر شود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از یک رویکرد تلفیقی شامل آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی شبیه‌سازی استفاده شد تا تأثیر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر عملکرد و کارآیی مصرف آب سویا ارزیابی شود.

۱- رویکرد تلفیقی آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی

این مطالعه بر یک راهبرد دو مرحله‌ای استوار بود:

مرحله اول (آزمایش مزرعه‌ای برای کالیبراسیون مدل): آزمایش مزرعه‌ای با یک هدف مشخص و محدود طراحی گردید: کمّی‌سازی اثر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر مراحل فنولوژیکی سویا (روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی). ازآنجایی‌که مدل SSM-iLegume فاقد تابعی برای شبیه‌سازی مستقیم اثر فیزیکی مالچ بر دمای خاک و تأخیر ناشی از آن در رشد اولیه گیاه است، داده‌های این آزمایش برای استخراج یک ضریب تصحیح جهت وارد کردن این پدیده به مدل، ضروری بود. لازم به ذکر است که در این آزمایش مزرعه‌ای، صفاتی نظیر عملکرد دانه، زیست‌توده، تبخیر و یا رطوبت خاک اندازه‌گیری نشد و تمرکز کامل بر ثبت دقیق داده‌های فنولوژیکی بود.

مرحله دوم (شبیه‌سازی بلندمدت برای ارزیابی سناریوها): پس از کالیبره کردن مدل برای اثر مالچ بر فنولوژی، از مدل به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی سناریوهای مدیریتی در مقیاس زمانی بلندمدت (۲۰ ساله) و در دو اقلیم متفاوت (گرگان و مینودشت) استفاده شد. این رویکرد اجازه داد تا اثرات تجمعی و بلندمدت مالچ بر تبخیر، نیاز آبی، عملکرد و کارآیی مصرف آب که اندازه‌گیری آن‌ها در یک آزمایش مزرعه‌ای کوتاه‌مدت دشوار و پرهزینه است، ارزیابی شود.

۲- آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش مزرعه‌ای در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۴ درجه و۳۰ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۲ متر از سطح دریا با میانگین دمای ۱۳ درجه و نوسانات دمایی ۱۰ درجه انجام شد. تیمارهای مورد مطالعه در آزمایش، شش مقدار مختلف مالچ کلش گندم شامل ۰ (بدون مالچ کلش) ۷۵۰، ۱۵۰۰، ۲۲۵۰، ۳۰۰۰ و ۳۷۵۰ کیلوگرم در هکتار بود که در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه اجرا گردید. کشت در تاریخ دهم تیر ماه انجام شد. رقم سویا مورد کشت در این آزمایش، رقم متداول

منطقه یعنی کتول (DPX) بود. فاصله بین بلوک‌ها دو متر و فاصله بین کرت‌ها داخل هر بلوک یک متر در نظر گرفته شد. هر کرت شامل هفت ردیف کاشت به‌طول پنج متر با فاصله بین ردیف ۰/۵ متر بود. در طول آزمایش، مراحل فنولوژی سویا براساس روش فهر و کاوینس به‌دقت ثبت گردید و کلیه مراقبت‌های زراعی نیز برحسب نیاز انجام گرفت. هدف از انجام این آزمایش مزرعه‌ای، بررسی کمّی اثر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر تأخیر در مراحل فنولوژی سویا (به‌ویژه روز تا سبز شدن و گل‌دهی) و استخراج توابع خطی (ضرایب تأخیر) جهت واسنجی زیرمدل فنولوژی در مدل SSM-iLegume بود.

لازم به ذکر است که این ارزیابی میدانی، یک آزمایش مقطعی با تمرکز انحصاری بر مراحل فنولوژیک اولیه گیاه بود و به‌دلیل محدودیت‌های اجرایی، اندازه‌گیری صفات زراعی انتهای فصل نظیر ماده خشک کل و عملکرد دانه در آن صورت نگرفت. لذا داده‌های حاصل از این بخش، منحصراً جهت واسنجی زیرمدل فنولوژی در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

۳- شبیه‌سازی

توضیح مدل SSM-iLegume

جهت شبیه‌سازی از مدل SSM-iLegume که توسط سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2012) برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی مختلف تهیه شده است، استفاده شد. این مدل دارای کد باز بوده و چون دارای ساختار ساده است برای اهداف آموزشی نیز قابل استفاده است. از آن جایی که مدل از صفحه گسترده اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌کند کار با آن ساده است. از این مدل می توان در موارد متعددی نظیر کاربردهای تحقیقاتی، مدیریت زراعی و آموزشی استفاده نمود. مدل iLegume-SSM مراحل فنولوژیک را به‌عنوان تابعی از دما و طول روز پیش‌بینی می‌کند. محاسبه مراحل فنولوژی در مدل براساس مفهوم روز بیولوژیک (حداقل تعداد روزلازم برای تکمیل مرحله نمو معین در دما، طول روز و رطوبت مطلوب) می‌باشد. گسترش و پیر شدن سطح برگ تابعی از دما، نیتروژن فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن می‌باشد. برای شبیه‌سازی گسترش سطح برگ، گام اول تعیین افزایش تعداد برگ در ساقه اصلی در هر روز با استفاده از مفهوم فیلوکرون (واحد دمایی بین ظهور برگ متوالی) است. شبیه‌سازی فنولوژی و تولید ماده خشک در مدل SSM به‌دلیل استفاده از روش‌ها والگوریتم‌های متفاوت و جدید در ساختار مدل برای بیان گسترش و پیر شدن برگ‌ها و همچنین توزیع ماده خشک، نسبت به سایر مدل‌ها ساده‌تر بوده و نیاز به پارامترهای ورودی کمتری دارد.

شبیه‌سازی رشد و عملکرد سویا

اعتبار و کالیبراسیون مدل برای شرایط آزمایش

اعتبار مدل SSM-iLegume برای پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط منطقه گرگان (بدون مالچ) قبلاً در مطالعه سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2020) به اثبات رسیده است. در این پژوهش، نوآوری اصلی، افزودن اثر مالچ بر فنولوژی به مدل بود. بدین منظور، با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش مزرعه‌ای، نمودار تغییرات روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی در برابر افزایش مقدار مالچ کلش گندم رسم شد و معادله خط رگرسیون به‌عنوان ضریب تصحیح استخراج گردید. این معادله‌ها برای اصلاح پویای روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به‌عنوان تابعی از مقدار مالچ کلش در تمامی شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

پارامتریابی و ارزیابی مدل iLegume-SSM برای پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط گرگان قبلاً توسط سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2020) انجام شده است. برای برآورد ضرایب و ارزیابی مدل از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای مختلف استفاده گردید. بعد از برآورد پارامترهای ژنتیکی، مدل با استفاده از داده‌های مستقل مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج حاکی از کارآیی قابل قبول آن برای جنبه‌های مهم گیاه زراعی در مقابل آزمایش‌های مشاهده شده شامل روز تا گل‌دهی (CV=11، RMSE=5.8)، روز تا رسیدگی (CV=6، RMSE=8.7) تعداد گره روی ساقه اصلی (CV=13، RMSE=1.7) و عملکرد دانه (CV=15، RMSE=48) بود. بنابراین، این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد سویا و محدودیت‌های آن در واکنش به شرایط زیست محیطی، ورودی‌های مدیریتی و عوامل ژنتیکی استفاده شود. بنابراین جهت شبیه‌سازی رشد و عملکرد سویا در این آزمایش از این مدل استفاده شد.

گام اول در بخش شبیه‌سازی وارد کردن اثر مالچ بر فنولوژی سویا در مدل SSM-iLegume بود. بدین منظور، با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش مزرعه‌ای، نمودار تغییرات روز تا سبز شدن و نیز روز تا گل‌دهی در برابر افزایش مقدار مالچ کلش گندم رسم شد.

سپس یک خط رگرسیونی از بین نقاط عبور داده‌شده و معادله خط به دست آمد. از این معادله‌ها برای تصحیح روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به‌عنوان تابعی از مقدار مالچ کلش در مدل استفاده شد. سپس با رسم نمودار، معادله خط رابطه مقدار مالچ کلش با روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به دست آمد.

در این تحقیق، آزمایش شبیه‌سازی به‌عنوان مکمل آزمایش مزرعه‌ای برای دو شهرستان گرگان و مینودشت برای دوره ۲۰ ساله ۲۰۰۰–۲۰۲۰ انجام شد. مدل SSM-iLegume برای شرایط آبی و تحت تیمارهای مختلف مالچ کلش شامل شاهد (بدون مالچ کلش)، ۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵، ۳ و ۳/۷۵ تن در هکتار اجرا گردید. تراکم بوته ۲۷ بوته در مترمربع منظور شد. همچنین تاریخ کاشت برای تمام سناریوها ۵ تیرماه در نظر گرفته شد و از پارامترهای رقم DPX، که رقم محلی خود منطقه می‌باشد، استفاده گردید. این رقم، یکی از ارقام تجاری، پرمحصول و کاملاً سازگار با اقلیم استان گلستان جهت کشت تابستانه است که در گروه رسیدگی متوسط تا دیررس طبقه‌بندی شده و دارای تیپ رشد نامحدود می‌باشد. ضرایب ژنتیکی مربوط به رقم DPX (از جمله ضرایب نیاز حرارتی مراحل فنولوژیک و پارامترهای رشد سطح برگ) براساس مقادیر واسنجی‌شده در مطالعات پیشین برای این منطقه (Soltani et al., 2020) استخراج و در مدل اعمال گردید. وقتی کسر آب قابل تعرق خاک به کمتر از ۰/۵کاهش می‌یافت، آبیاری انجام می‌شد. نوع خاک سیلتی رسی لوم با عمق ۱۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آلبیدو ۰/۱۱ فاکتور زهکشی ۰/۵و شماره منحنی خاک ۸۵ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که داده‌های مربوط به ایستگاه هم‌دیدی گرگان و مینودشت برای دوره آماری ۲۰۲۰–۲۰۰۰ از اداره کل هواشناسی استان گلستان تهیه گردید. برای اجرای مدل آب‌وهوایی محصول سویا به داده‌های هواشناسی دمای حداقل و حداکثر، بارش و تابش در مقیاس روزانه نیاز است. تابش خورشیدی یکی از مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی است که در مدل‌سازی گیاهان زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای هوا نیز بر سرعت بیش‌تر فرآیندهای فیزیولوژیکی مؤثر است، حداکثر و حداقل دما مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، بلکه از آن‌ها برای محاسبه دمای مؤثر استفاده می‌شود. بارش نیز در تأمین نیاز آبی مورد نیاز است. اطلاعات خاک و پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه‌سازی نیز از پژوهش سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2011) جمع‌آوری شد.

شبیه‌سازی اثر مالچ بر تبخیر و تراز آب خاک

علاوه‌بر تأثیر بر فنولوژی، سازوکار اصلی که مدل SSM-iLegume از طریق آن اثر مالچ را بر تراز آب شبیه‌سازی می‌کند، کاهش مستقیم تبخیر از سطح خاک (E) است. این فرآیند از طریق یک رویکرد مبتنی بر فیزیک و به‌صورت روزانه انجام می‌شود:

۱- محاسبه کسر پوشش خاک: در گام اول، مدل براساس مقدار مالچ ورودی (کیلوگرم در هکتار) و یک ضریب مربوط به نوع بقایا، کسری از سطح خاک را که توسط مالچ پوشانده شده است (Soil Cover Fraction by Residue)، محاسبه می‌کند.

۲- کاهش پتانسیل تبخیر: سپس، این کسر پوشش به‌طور مستقیم پتانسیل تبخیر از سطح خاک[1] را کاهش می‌دهد. این کاهش به این دلیل است که بقایای گیاهی مانع از رسیدن بخش قابل توجهی از تابش خورشیدی به سطح خاک می‌شوند و انرژی مورد نیاز برای فرآیند تبخیر را محدود می‌کنند. این رابطه را می‌توان به‌صورت مفهومی به شکل معادله ۱ نشان داد:

$$E_p (mulched) = E_p (bare) \times (1 - Cover_Fraction) \quad (۱)$$

۳- تأثیر بر تراز آب: این کاهش روزانه در E_p منجر به کاهش تبخیر واقعی و تجمعی (CE) در طول فصل رشد می‌شود. در نتیجه، رطوبت در لایه سطحی خاک برای مدت طولانی‌تری حفظ شده و نیاز گیاه به آب آبیاری (CIRGW) کاهش می‌یابد. این صرفه‌جویی در آب، درحالی‌که عملکرد دانه (WGRN) تغییر معنی‌داری نمی‌کند، به‌طور مستقیم منجر به افزایش کارآیی مصرف آب (WUE) می‌شود.

لازم به ذکر است که پارامترهای ذاتی و هیدرولیکی خاک (مانند شماره منحنی، ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی) در بین تیمارها ثابت فرض شدند و اثر مالچ صرفاً از طریق تأثیر پویا بر تراز انرژی سطح خاک و فنولوژی گیاه در مدل اعمال گردید.

تحلیل آماری

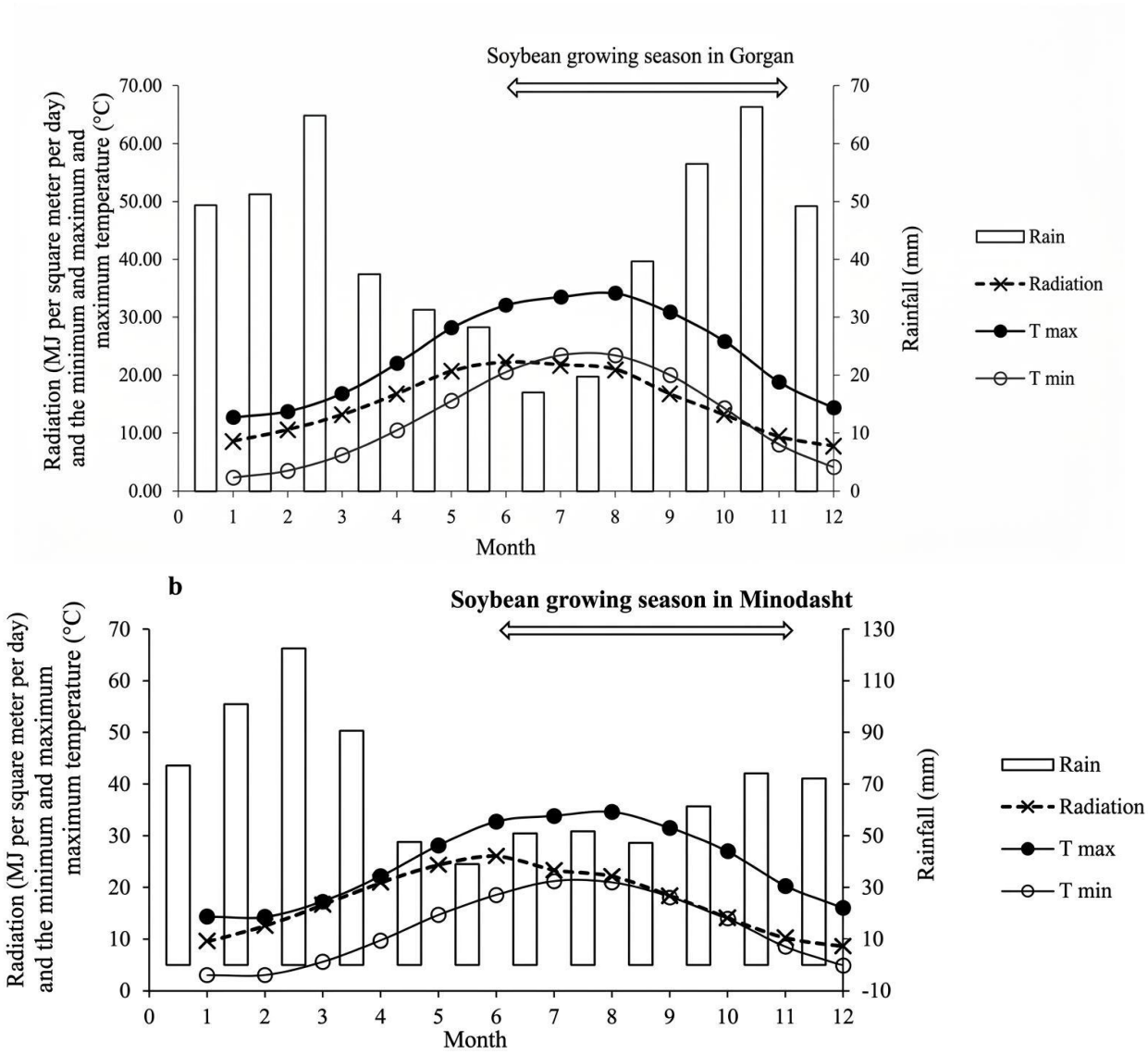
داده‌های خروجی حاصل از شبیه‌سازی بلندمدت (۲۰ ساله) برای هر تیمار، مورد تحلیل آماری قرار گرفت. برای مقایسه میانگین صفات مورد ارزیابی (شامل عملکرد دانه، کارآیی مصرف آب، تبخیر تجمعی و غیره) بین تیمارهای مختلف مالچ، از تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای

1- Potential Soil Evaporation, E_p

دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p<0.05$) انجام پـذیرفت. تمـامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام گردید.

منطقه مورد مطالعه

به‌منظور بررسی اثر مالچ گندم بر رشد، عملکـرد و مصـرف آب در مزارع سویا در اقلیم‌های متفاوتی از استان گلستان، گرگان (بـا عـرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی، طول جغرافیـایی ۵۴ درجـه و ۲۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳ متر از سطح دریا) و مینودشت (با عـرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی، طول جغرافیـایی ۵۵ درجـه و ۲۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۰ متر از سطح دریا) انتخاب شد. قابل ذکـر است که شهرستان گرگان و علی آبـاد در مجمـوع ۷۰ درصـد از کـل سویای استان گلستان را در بر می‌گیرند، امّا این دو شهرستان براساس نقشه تقسیم‌بندی اقلیمی کشور براساس GYGA-ED در یک اقلـیم قرار می‌گیرند. امّا شهرستان مینودشت اقلیم متفاوتی دارد (دمای کمتر و بارندگی بیشتر نسبت به گرگان و علی آباد کتول) (شکل۱).



شکل ۱- میانگین ماهانه داده‌های آب‌وهوایی شامل دمای بیشینه (T_{max})، دمای کمینه (T_{min})، بارندگی (Rain) و تابش برای گرگان (a) و مینودشت (b)

Fig. 1- The average monthly weather data of maximum air temperature (Max T), minimum air temperature (Min T), and rainfall (Prec.) and radiation for Gorgan(a) and Minodasht (b)

نتایج و بحث

آزمایش مزرعه‌ای

اثر مالچ کلش گندم بر فنولوژی

نتایج حاصل از آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که مالچ کلش گندم بر سبز شدن بذر سویا اثر می‌گذارد. به‌طوری که به‌ازای هر تن مالچ کلش گندم روز تا سبز شدن به‌میزان ۰/۷ روز افزایش یافت. همچنین گل‌دهی نیز با افزایش مقدار مالچ کلش به‌ازای هر تن مالچ به‌میزان ۱/۰۳ روز به تأخیر افتاد. همچنین سایر مراحل فنولوژی نیز با افزایش مالچ کلش به تأخیر افتاد، به‌طوری که با افزایش هر تن مالچ کلش گندم، روز تا رسیدگی برداشت سویا به‌میزان ۰/۸۴ روز افزایش یافت. می‌توان گفت که پوشش مالچ بر خاک باعث سایه‌اندازی و کاهش دمای خاک شده و بنابراین میزان GDD دریافتی روزانه توسط بذرها را کاهش داده و باعث تأخیر در سبز شدن آن‌ها شد. مطالعات زیادی نیز نشان داده‌اند که مالچ موجب کاهش دمای خاک و تأخیر در سبز شدن بذرها می‌شود. در آزمایشی در شمال آمریکا، اثر بقایای گیاهی بر رشد و نمو ذرت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در صورت عدم خاک‌ورزی و باقی گذاشتن بقایای گیاهی در سطح خاک در مقایسه با خاک ورزی مرسوم، درصد سبز شدن را کاهش داد و همچنین باعث تأخیر (تا پنج روز) در سبز شدن بذور ذرت شد (Mingotte et al., 2020). خاک‌ورزی حفاظتی و حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک، نوسانات دمای خاک را کاهش می‌دهد. وجود بقایا در سطح خاک باعث می‌شود که در سطح خاک حالت عایق‌شدگی به وجود آید و نوسانات دمای آن کمتر شود. یعنی خاک در زمستان مقداری گرم‌تر و در تابستان مقداری خنک‌تر شود. گزارش شده است که در تابستان، خاک‌های دارای بقایا تا پنج درجه سانتی‌گراد خنک‌تر هستند. در اقلیم‌های گرم به‌ویژه در جنوب کشور این مزیت می‌تواند علاوه‌بر کاهش دمای خاک، سرعت تجزیه مواد آلی را کاهش دهد و در نتیجه آب کمتری از دست برود که برای گیاه و خاک مفید است. امّا این حالت در اقلیم‌های سرد می‌تواند مضر باشد، یعنی خنک بودن خاک در اثر وجود بقایا و مالچ کلش باعث می‌شود که گیاه دیرتر جوانه بزند و در نتیجه رشد اولیه آن با تأخیر صورت گیرد (Mirzaei et al., 2021).

استخراج توابع خطی (ضرایب تأخیر) جهت واسنجی

با توجه به آنچه که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، نتایج آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که مالچ کلش فنولوژی را به تأخیر انداخت. به‌طوری که به‌ازای باقی گذاشتن هر تن مالچ کلش بر سطح خاک، روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به‌ترتیب به‌میزان ۰/۷ و ۱/۰۳ روز به تأخیر افتاد. بنابراین از این معادله‌ها برای تصحیح روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به‌عنوان تابعی از مقدار مالچ کلش در مدل استفاده شد (شکل ۳).

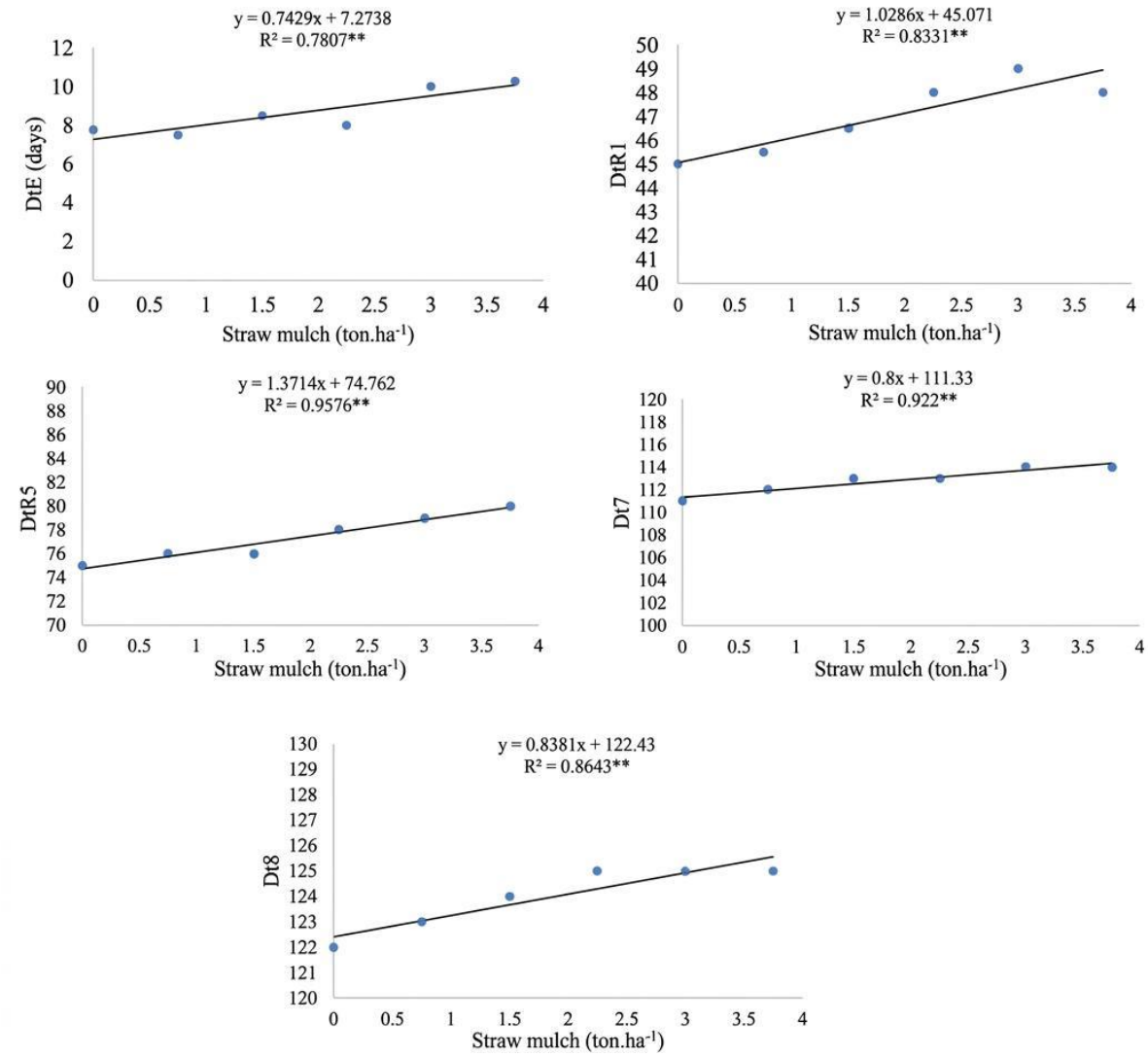
جدول ۱- مقایسه میانگین اثر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر صفات مورد ارزیابی در کشت سویا

Table 1- Mean comparison of the effect of different levels of wheat straw mulch on the evaluated traits in soybean

Irrigation number دفعات آبیاری (تعداد)	Irrig. water requirement (mm) نیاز آب آبیاری (میلی‌متر)	Water use efficiency (kg ha^{-1} mm^{-1}) کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر)	Soil evaporation (mm) تبخیر از خاک(میلی متر	Evapotranspiration (mm) تبخیر و تعرق (میلی متر)	Grain yield (g m^{-2}) عملکرد دانه (گرم در متر مربع)	Biomass (g m^{-2}) زیست‌توده هوایی (گرم در متر مربع)	Straw mulch (t ha^{-1}) مالش کلش(تن در هکتار)
IRGNO	CIRGW (mm)	WUE (kg ha^{-1} mm^{-1})	CE (mm)	ET (mm)	WGRN (g m^{-2})	WTOP (g m^{-2})	Straw mulch (t ha^{-1})
5:00AM	329a	11f	132a	481a	373a	890a*	0
5b	311b	12e	110b	458b	373a	888a	0.75
4bc	300bc	12d	89c	437c	372a	886a	1.5
4cd	287bc	13c	79d	426d	372a	888a	2.25
4d	280d	13b	70e	418e	373a	888a	3
4d	280d	13a	64f	412f	372a	886a	3.75

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن ندارند.

.Means followed by the same letter(s) in each column are not significantly different at the 5% probability level



شکل ۲- اثر سطوح مالچ کلش بر فنولوژی سویا (آزمایش مزرعه‌ای)

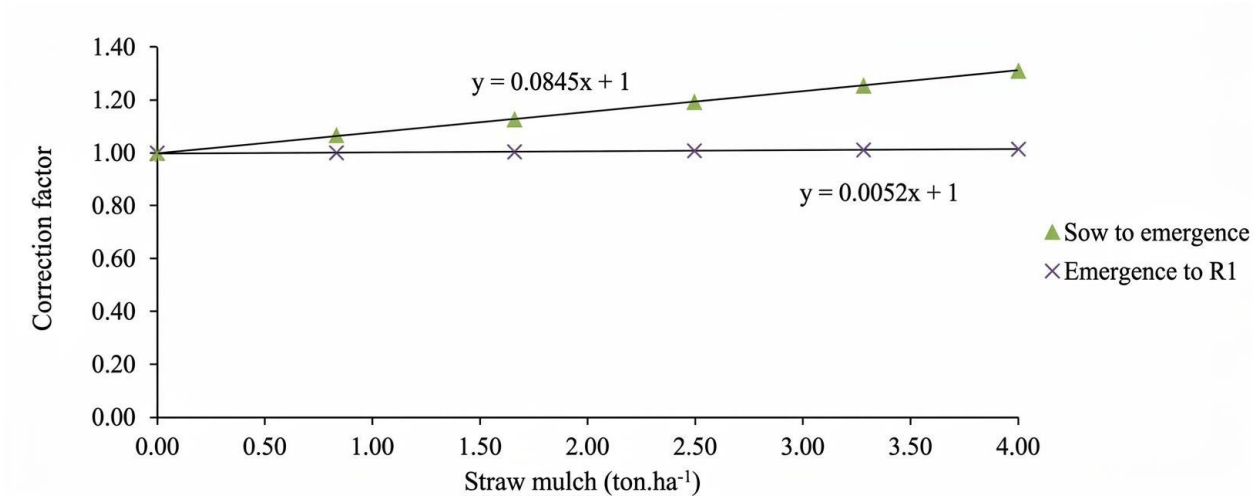
Fig. 2- Effect of straw mulch on soybean phenology (field experiment)

وجود مالچ کلش در سطح خاک از تابش خورشید به خاک ممانعت کرده و با سایه‌اندازی موجب کاهش دمای خاک می‌شود. بنابراین این مسئله باعث تأخیر در سبز شدن و نیز سایر مراحل فنولوژی خواهد شد. بیلالیس و همکاران (Bilalis et al., 2003) در آزمایش خود گزارش کردند که استفاده از مالچ گندم منجر به کاهش درجه حرارت خاک شد.

آزمایش مدل‌سازی

اثر مالچ کلش گندم بر ماده خشک اندام‌های هوایی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی اثر مالچ کلش گندم بر ماده خشک کل اندام هوایی نشان داد که مالچ کلش اثر معنی‌داری بر ماده خشک کل اندام‌های هوایی نداشت (جدول ۱). این امر می‌تواند به این علت باشد که بقایا هنوز پوسیده نشده و عناصر غذایی آن‌ها به خاک اضافه نشده تا مورد استفاده گیاه قرار گیرد. در واقع، به‌علت عدم پوسیدگی بقایا در طی زمان کوتاه، تنها اثر فیزیکی آن‌ها در سطح خاک، سایه‌اندازی، کاهش دما و تبخیر از سطح خاک مشهود است (Liebhard et al., 2022). بنابراین در کشت آبی که آبیاری به‌طور مرتب صورت می‌گیرد، وجود بقایا بر سطح خاک در کوتاه‌مدت اثر معنی‌داری بر عملکرد بیولوژیک ندارد و بیشترین نقش آن کاهش تبخیر و افزایش بهره‌وری آب می‌باشد.



شکل ۳- ضریب اصلاحی مالچ کلش

Fig. 3- Correction factor of straw mulch

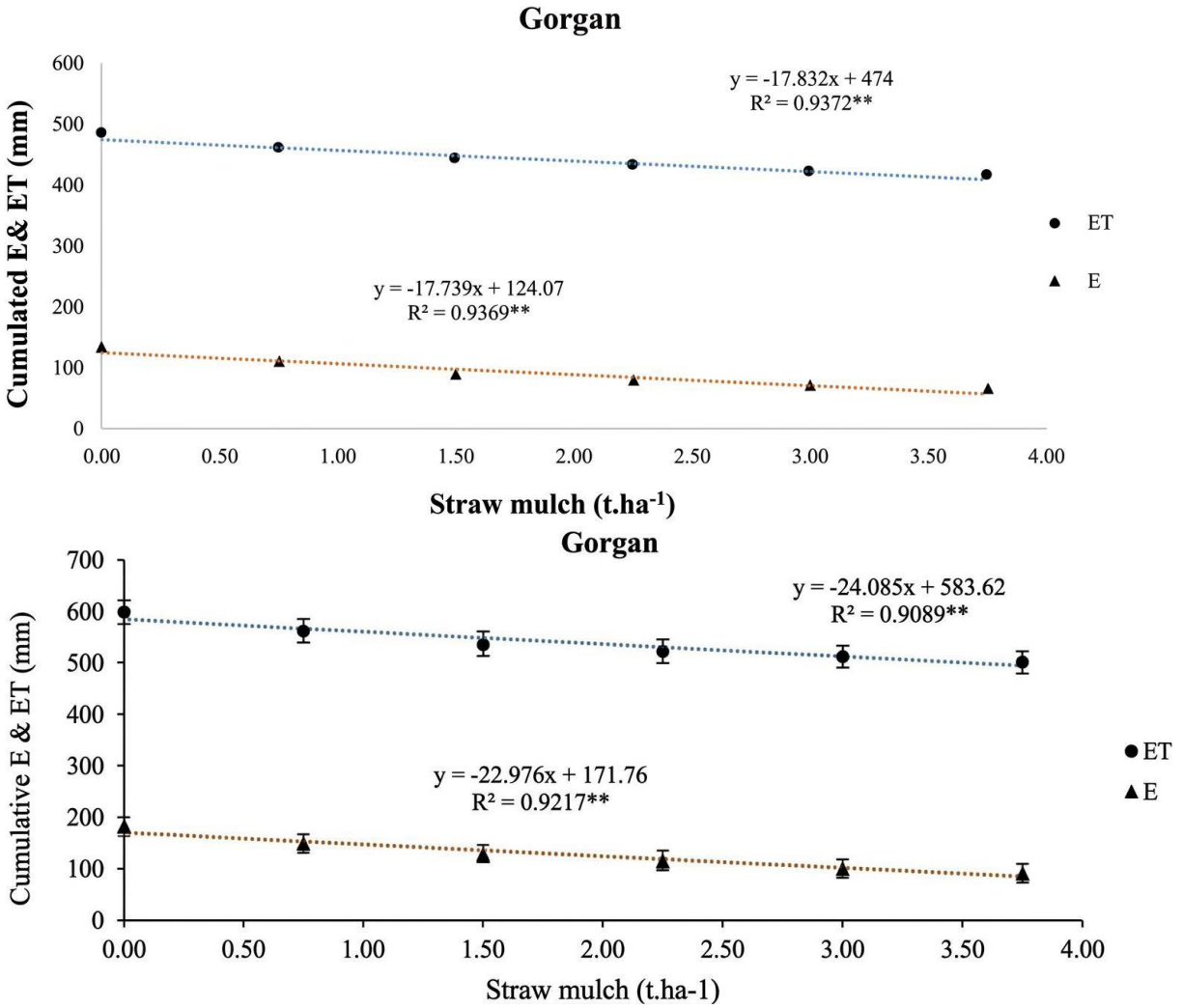
اثر مالچ کلش گندم بر عملکرد دانه

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که مالچ کلش گندم بر عملکرد دانه اثر معنی‌داری در هیچ‌کدام از شهرستان‌های گرگان و مینودشت نداشت. به عبارتی، هرچند وجود مالچ کلش، عملکرد دانه سویا را افزایش نداد، امّا باعث کاهش عملکرد نیز نشد که این خود می‌تواند این اطمینان را در کشاورز ایجاد کند که کاربرد مالچ عملکرد محصول را کاهش نخواهد داد. در آزمایشی در استرالیا، روش‌های مختلف مدیریت بقایای گیاهی گندم، در مقادیر مختلف بذر و در کشت گندم بعد از گندم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط کردن و نگهداری بقایای گیاهی گندم باعث کاهش عملکرد محصول نسبت به سوزاندن بقایای گیاهی شد (Singh et al., 2025). امّا اکثر گزارش‌ها حاکی از نقش مثبت بقایای گیاهی بر عملکرد به‌خصوص در گیاهان تابستانه می‌باشد. نتایج بررسی بازک و همکاران (Buczek et al., 2021) نشان داد که در تیمارهای خاک‌ورزی کاهش‌یافته و خاک‌ورزی مرسوم بیش‌ترین عملکرد دانه و ارتفاع بوته به دست آمد و مقدار پروتئین دانه، مواد آلی، پتاسیم و فسفر خاک پس از برداشت در تیمار حداقل خاک‌ورزی بیش از سایر تیمارها بود. در تیمار حفظ بقایا، عملکرد دانه، وزن ۱۰۰۰ دانه، پروتئین دانه و مواد آلی بیشتری حاصل شد (Klopp & Blanco-Canqui, 2022). اکثر گزارش‌ها مؤید این است که عملکرد گیاهان به‌خصوص در شرایط دیم به علت استفاده از مالچ در مقایسه با خاک بدون مالچ، افزایش یافته و غالب مواد مالچی در افزایش عملکرد مؤثر بوده‌اند (Gebeyhu & Markos, 2023). افزایش عملکرد در واحد سطح به‌خصوص در شرایط آبی عموماً زیاد نبوده است، ولی برخی از پژوهشگران آن را قابل توجه گزارش کرده‌اند. افزایش عملکرد در این مطالعات حداقل ۵۰ و حداکثر ۳۰۰ درصد بوده است (Thind et al., 2023). تایند و همکاران (Thind et al., 2023) مشاهده کردند که عملکرد گندم با کاربرد مالچ ۱۵ درصد افزایش یافت. همچنین مخلوط شدن بقایا با خاک در نظام‌های خاک‌ورزی حداقل و بدون خاک‌ورزی، سبب بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، حفظ حاصلخیزی و رطوبت خاک، کاهش فرسایش و تبخیر بیش از اندازه می‌شود.

اثرمالچ کلش بر تبخیر و تعرق (ET)

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مالچ کلش در هر دو شهرستان گرگان و مینودشت، مقدار تبخیر و تعرق را کاهش داد. همچنین بین مقادیر مختلف مالچ کلش از نظر میزان تبخیر و تعرق اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۱). به‌طوری که با افزایش مقدار مالچ کلش گندم از ۰ به ۳/۷۵ تن در هکتار، میزان تبخیر و تعرق در گرگان و مینودشت به‌ترتیب ۱۴ و ۱۶ درصد کاهش یافت. همچنین بین مقادیر مختلف مالچ کلش از نظر میزان تبخیر و تعرق اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۱). بیشترین میزان تبخیر و تعرق در

هر دو شهرستان گرگان و مینودشت در تیمار شاهد (عدم کاربرد مالچ کلش) به‌ترتیب ۴۸۲ و ۵۹۸ میلی‌متر بهدست آمد (شکل ۴). با افزایش مقدار مالچ کلش گندم، نسبت E/ET کاهش یافت به‌طوری که کمترین مقدار E/ET در هر دو شهرستان گرگان و مینودشت در تیمار ۳/۷۵ مالچ کلش و به‌ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۱۸ به دست آمد. طبق نتایج کالکارنی (Kulkarni, 2021)، بقایای گیاهی که روی سطح خاک پخش می‌شوند، باعث کاهش دمای خاک و کاهش بخار آب در اثر هدرروی آب می‌شود زیرا بقایای، گیاهی باعث بازتاب نور خورشید شده و تبخیر را کاهش می‌دهد. علاوه‌بر این، کاربرد بقایا موجب افزایش نگهداشت رطوبت و کاهش تبخیر از سطح خاک مزرعه می گردد (Liu & Lobb, 2021). استفاده از بقایای گیاهی در اراضی کشاورزی، ساختمان و ظرفیت نگهداری آب در خاک را بهبود بخشیده و همچنین میزان نفوذپذیری را افزایش می‌دهد (Klopp & Blanco-Canqui, 2022). کاسکی و همکاران (Koskei et al., 2021) گزارش کردند که رابطه معنی‌داری بین محتوای رطوبتی خاک و مقدار مالچ در شرایط دیم وجود داشت و کاربرد مالچ اثر مثبتی بر ظرفیت نگهداری آب خاک داشت.

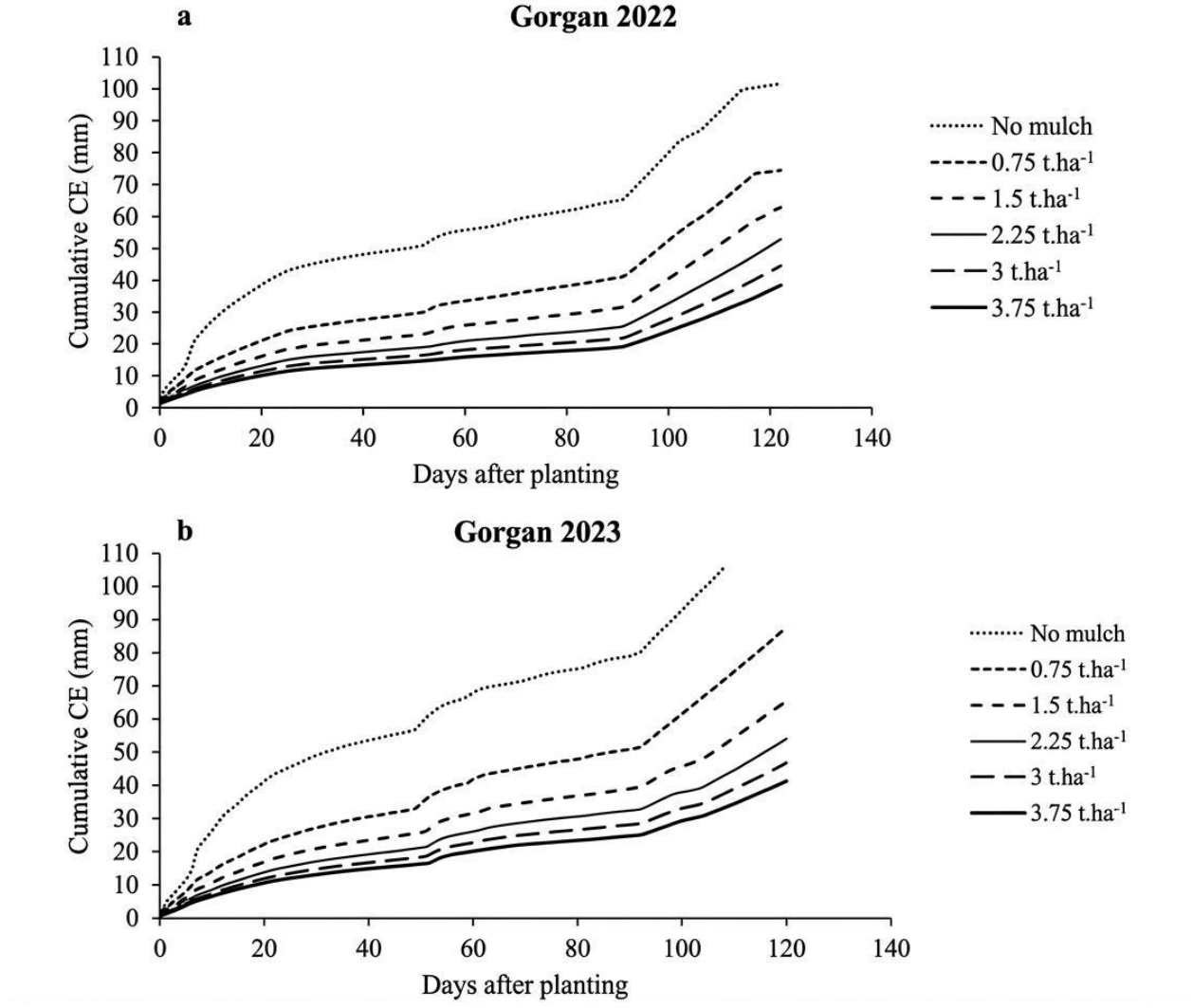


شکل ٤- تبخیر تجمعی شبیه‌سازی‌شده از سطح خاک (E، خط پیوسته) و تعرق و تبخیر (ET، خط‌چین) در شرایط استفاده از مالچ کلش برای گرگان و مینودشت

Fig. 4- Simulated cumulative soil evaporation (E, solid line) and evapotranspiration (ET, dashed line) plotted against straw mulch for Gorgan and Minodasht

اثر مقادیر مختلف مالچ کلش برتبخیر از سطح خاک (CE)

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مالچ کلش باعث کاهش میزان تبخیر از سطح خاک شد. به‌طوری که در شهرستان گرگان با افزایش مقدار مالچ از صفر به ۳/۷۵ تن در هکتار، تبخیر از سطح خاک به‌میزان ۵۱ درصد (۶۸ میلی‌متر) کاهش یافت (شکل ۶). همچنین در شهرستان مینودشت نیز به‌ازای باقی گذاشتن ۳/۷۵ تن مالچ در هکتار، مقدار تبخیر از سطح خاک به‌میزان۵۰ درصد (۹۲ میلی‌متر) کاهش یافت (شکل ۵). بنابراین می‌توان گفت که در مناطقی که خشک‌تر بوده و پتانسیل تبخیر در آن‌ها بالاتر است، کاربرد مالچ می‌تواند نقش مؤثرتری در کاهش تبخیر از سطح خاک و جلوگیری از تلفات آب داشته باشد. بیشترین کاهش در مقدار تبخیر از سطح خاک در روزهای اول پس از کاشت به دست آمد (نتایج نشان داده نشده‌اند). علت آن این است که در روزهای اول بعد از کاشت به‌علت کوچک بودن بوته‌ها و عدم بسته شدن تاج‌پوشش در مراحل ابتدایی رشد گیاه، قسمت بیشتری از سطح خاک در معرض تابش مستقیم آفتاب قرار دارد. بنابراین وجود مالچ بر سطح خاک با سایه‌اندازی و کاهش دما می‌تواند بطور مؤثری مقدار تبخیر از سطح خاک را کاهش دهد.



شکل ۵- اثر سطوح مالچ کلش بر تبخیر از سطح خاک در گرگان (a) و مینودشت (b) در سال ۲۰۱۳

Fig. 5- Effect of straw mulch rates on CE in Gorgan(a) and Minodasht (b):2013

سنگ (Senge, 2022) در بررسی اثر مالچ‌پاشی بر رطوبت و دمای خاک و نیز کارآیی مصرف آب سویا در شرایط دیم در ژاپن به این نتیجه رسیدند که مالچ دمای خاک را در لایه ۵-۰ سانتی‌متری، دو درجه سانتی‌گراد و در لایه ۲۵-۱۵ سانتی‌متری حدود پنج درجه کاهش داد. همچنین مالچ کلش و مالچ پلاستیکی، رطوبت قابل توجهی را در عمق ۱۵-۵ سانتی‌متری خاک ذخیره کرد و مقدار تبخیر آب از سطح خاک را کاهش داد. همچنین مالچ کلش باعث افزایش ذخیره رطوبت خاک و کاهش دمای خاک و افزایش عملکرد سویا شد. لی و همکاران (Li et al, 2021) در بررسی پاسخ سویا به مالچ کلش گندم در تاریخ کشت‌های مختلف در هند مشاهده کردند که دمای خاک بدون پوشش مالچ یک ماه پس از کاشت به‌طور میانگین ۳۰/۶- ۴۸/۶ درجه بود و وجود مالچ کلش دمای خاک را ۱/۴ تا ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. ریویر و همکاران (Rivier et al., 2022) نیز گزارش کردند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک حدود ۴۰ تا ۷۰ درصد از اتلاف آب از سطح خاک به‌وسیله تبخیر می‌باشد که می‌توان به‌وسیله موادپ وشاننده خاک از آن جلوگیری نمود و این آب را در اختیار گیاه قرار داد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) در تحقیق خود در چین به این نتیجه رسیدند که خاک‌های دارای بقایای سطحی در مقایسه با خاک‌های فاقد بقایا، در درجه حرارت بالای محیطی دیرتر گرم شده و از سویی دیگر، در شب حرارت خود را دیرتر از دست می‌دهند.

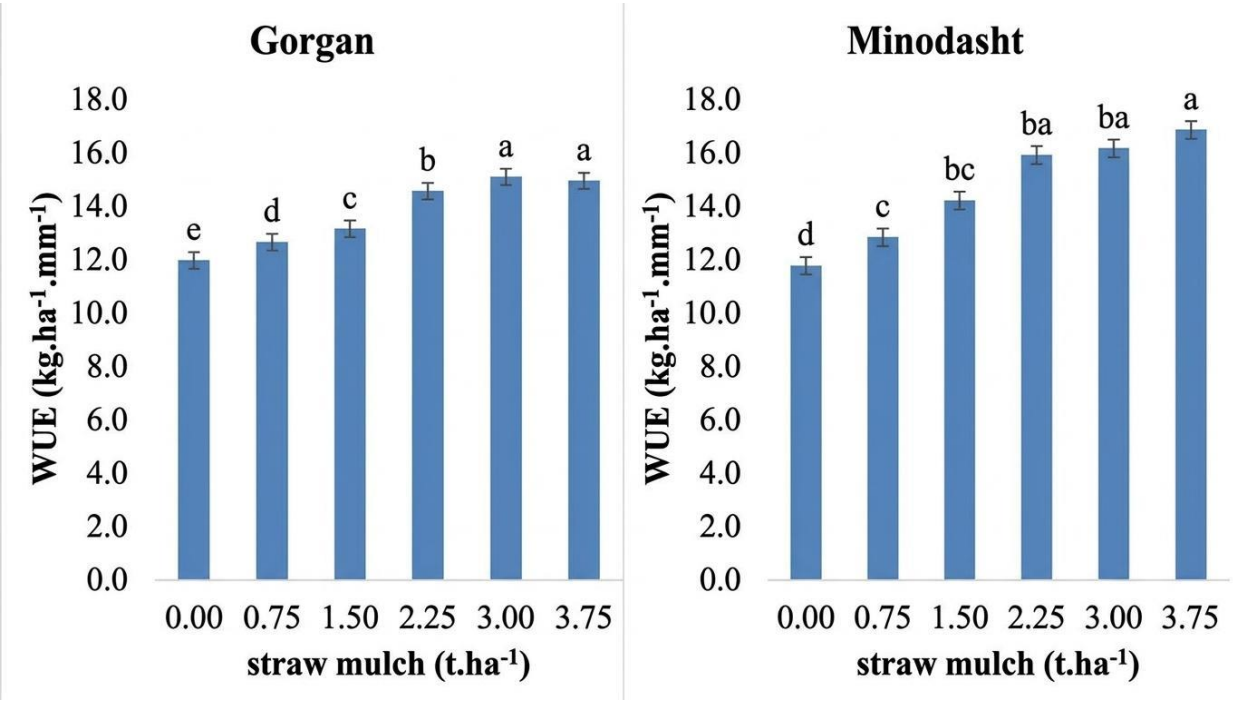
اثر مالچ کلش بر کارآیی مصرف آب

نتایج شبیه‌سازی درازمدت نشان داد که مالچ کلش می‌تواند اثر مثبتی بر افزایش کارآیی مصرف آب سویا داشته باشد. بیشترین کارآیی مصرف آب در شهرستان گرگان و مینودشت در تیمار ۳/۷۵ تن مالچ کلش در هکتار و به‌ترتیب ۱۴/۹ و ۱۶/۸ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر به دست آمد. با این‌حال در شهرستان گرگان بین تیمار۳/۷۵ و ۳ تن مالچ کلش از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۶ و جدول ۱). همچنین در شهرستان مینودشت بین تیمارهای ۳/۷۵، ۳، ۲/۲۵ و ۱/۵ تن در هکتار مالچ کلش گندم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و کمترین کارآیی مصرف آب (۱۱/۸ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر) در شاهد (عدم وجود مالچ کلش) مشاهده شد. پوشش زمین به‌وسیله بقایای گیاه و کاه وکلش، ماده آلی خاک و ذخیره آب را افزایش داده و با استفاده از کاه و کلش، تبخیر از خاک کاهش می‌یابد که مقدار آن بستگی به میزان بارش و شرایط اقلیمی دارد (Senge, 2022). همچنین مالچ کلش، عملکرد سویا را در تاریخ کشت‌های مختلف ۴/۴ تا ۶۸/۳ در صد افزایش داد. استفاده از مالچ و کاه، میزان تبخیر از سطح خاک را کاهش داده و باعث حفظ رطوبت خاک می‌شود (Zhao et al., 2023). محققان گزارش کردند که به‌طور میانگین کشت روی پشته به همراه کاربرد کلش، عملکرد و کارآیی مصرف آب ذرت تابستانه را به‌ترتیب ۱۶/۹ و ۱۹/۴ درصد افزایش داد (Li et al., 2021). لی و همکاران (Li et al., 2013) در بررسی اثر مالچ پاشی بر رطوبت و دمای خاک و نیز کارآیی مصرف آب سویا در شرایط دیم در چین به این نتیجه رسیدند که مالچ، دمای خاک را در لایه ۵-۰ سانتی‌متری، دو درجه سانتی‌گراد و در لایه ۲۵-۱۵ سانتی‌متری حدود پنج درجه کاهش داد. لیو و همکاران (Liao et al., 2025) در آزمایش خود، اثر سیستم بدون خاک‌ورزی و حفظ بقایا بر عملکرد سویا را بررسی کردند و گزارش کردند که سیستم بدون خاک‌ورزی و باقی گذاشتن بقایا در مقایسه با شخم رایج، عملکرد سویا را افزایش داد.

اثر مالچ بر تعداد و مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)

نتایج نشان داد که مالچ کلش، تعداد آبیاری را در هر دو شهرستان گرگان و مینودشت کاهش داد. به‌طوری که با افزایش مقدار مالچ از ۰ به ۳/۷۵ تن در هکتار، تعداد آبیاری از ۴/۹۵ به ۴/۱۰ بار کاهش یافت. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که وجود مالچ کلش توانست حدود یک آبیاری را در طول فصل رشد سویا کم کند. در شبیه‌سازی برای شهرستان مینودشت نیز نتایج مشابهی حاصل شد. به‌طوری که بیشترین تعداد آبیاری ۵/۶۵ و در شاهد (عدم وجود مالچ) و کمترین تعداد آبیاری ۴/۲۵ و در تیمار ۳/۷۵ تن در هکتار مالچ کلش به دست آمد. بااین‌وجود بین تیمارهای ۳، ۳/۲۵ و ۳/۷۵ تن در هکتار مالچ کلش اختلاف معنی‌داری از نظر آماری وجود نداشت (شکل ۷). همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مالچ کلش می‌تواند مقدار آب آبیاری را کاهش دهد. به‌طوری که در شهرستان گرگان بیشترین مقدار آب مصرفی (۳۲۹ میلی‌متر) در شاهد و کمترین مقدار آب آبیاری (۲۸۰ میلی‌متر) در تیمار ۳ و ۳/۷۵ تن مالچ کلش در هکتار به دست آمد. به عبارتی، با افزایش مقدار مالچ از ۰ به ۳/۷۵ تن در

هکتار، مقدار آب آبیاری حدود ۱۵ درصد کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که در شهرستان مینودشت نیز مقدار آب آبیاری از ۳۶۶ میلی‌متر در شاهد به ۲۸۸ میلی‌متر در تیمار ۳/۷۵ تن در هکتار مالچ کلش رسید (۲۱ درصد کاهش مقدار آب آبیاری). به عبارت دیگر، وجود مالچ در سطح خاک باعث کاهش میزان تبخیر از سطح خاک شده و از هدر رفتن آب جلوگیری می‌کند. بنابراین باعث حفظ رطوبت خاک شده و مقدار آب مورد نیاز جهت آبیاری را کاهش می‌دهد.



شکل ٦- اثر سطوح مالچ کلش بر کارآیی مصرف آب (WUE) در گرگان (a) و مینودشت (b)

Fig. 6- Effect of straw mulch levels on WUE in Gorgan (a) and Minodasht (b)

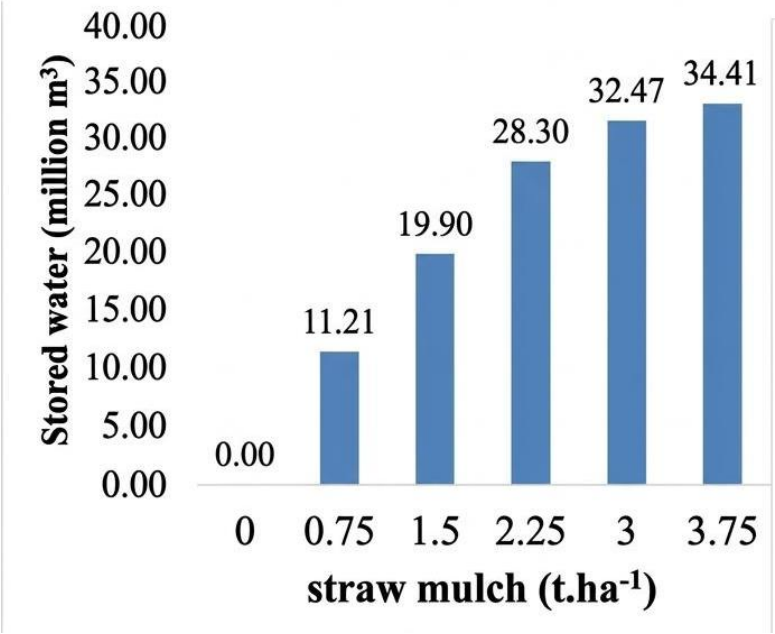
اهمیت مالچ در صرفه‌جویی منابع آب در استان

فرضیات و محدودیت‌های تعمیم نتایج

لازم به ذکر است که تعمیم نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای دو نقطه به کل استان، با فرضیات و محدودیت‌هایی همراه است. این برآورد بر این فرض استوار است که شرایط مدیریتی، تاریخ کاشت و نوع خاک در عمده اراضی زیرکشت سویای استان، شباهت قابل قبولی با شرایط شبیه‌سازی‌شده دارد. همچنین تنوع اقلیمی در سایر نقاط استان در این تحلیل لحاظ نشده است. سطح زیرکشت مورد استفاده در این محاسبات ۵۷۴۶۲ هکتار براساس آمارنامه سال ۲۰۲۲ سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2022) می‌باشد. بنابراین، اعداد ارائه‌شده نه به‌عنوان یک مقدار قطعی، بلکه به‌عنوان یک «برآورد از پتانسیل صرفه‌جویی» در صورت اتخاذ گسترده این روش مدیریتی، باید تفسیر شوند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، مقدار آب صرفه‌جویی شده در استان به‌ازای مقادیر مختلف مالچ کلش گندم محاسبه شد. در ابتدا اختلاف مقدار آب مصرفی (CIRGW) در تیمارهای مختلف مالچ کلش با شاهد در هر دو شهرستان گرگان و مینودشت محاسبه گردید. سپس بین دو شهرستان میانگین وزنی گرفته شد. اختلاف میزان آب مصرفی در تیمارهای ۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵، ۳ و ۳/۷۵ تن مالچ کلش در هکتار با شاهد به‌ترتیب ۱۹۵، ۳۴۶/۲۵، ۴۹۲/۵، ۵۶۵ و ۵۹۸/۷۵ مترمکعب در هکتار به دست آمد. با ضرب کردن این مقادیر در مساحت زیرکشت سویا در استان، مقدار کل آب مصرفی در استان به‌ازای کاربرد مقادیر مختلف مالچ کلش به دست آمد. مقدار آب صرفه‌جویی‌شده در استان گلستان به‌ازای مقادیر مختلف مالچ کلش گندم در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق گزارش وان وارت و همکاران (Van Wart et al., 2013)، چنانچه چند ایستگاه هواشناسی با شعاع ۱۰۰ کیلومتر وجود داشته باشند و این ایستگاه‌ها در مجموع حداقل ۴۰ درصد از مساحت زیرکشت را پوشش دهند، در

آن صورت می‌توان نتایج به‌دست‌آمده برای این ایستگاه را به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داد. با توجه به اینکه گرگان ۳۰ درصد و مینودشت ۱۸ درصد از اراضی زیرکشت سویای استان گلستان را به خود اختصاص می‌دهد، سهم این دو ایستگاه در مجموع ۴۸ درصد از استان می‌شود. بنابراین براساس نتایج به‌دست‌آمده برای این دو شهرستان، میزان آب صرفه‌جویی‌شده برای کل استان در ازای مقادیر مختلف مالچ کلش محاسبه شد. با توجه به اینکه سطح زیرکشت سویا در استان در سال آزمایش ۵۷۴۶۲ هکتار بود (FAO, 2022). مقدار آب صرفه‌جویی‌شده به‌ازای مقادیر مختلف مالچ کلش گندم نسبت به شاهد در کل استان گلستان مطابق شکل ۷ به دست آمد. به‌طوری که بیشترین مقدار آب صرفه‌جویی‌شده (۳۴/۴۱ میلیون مترمکعب) در تیمار ۳/۷۵ تن مالچ کلش به دست آمد. برداشت بیش از حد آب و کمبود آن و نیز خشک شدن تالاب‌ها و مراتع پایین‌دست باعث افزایش گرد وغبار می‌گردد. اگر برداشت آب از طریق چاه‌ها خیلی زیاد باشد، ممکن است که بعد از تخلیه آب از این سفره‌های آبی، نشست زمین روی دهد. در مراحل بعدی و با تداوم برداشت، علائم بیابانی شدن در دشت‌های پایین‌دست مشاهده خواهد شد. مسائل و مشکلات اضافه‌برداشت آب وقتی‌که در مراحل آخر خود تشدید می‌شوند، ممکن است که منازعات منطقه‌ای بر سر آب را به دنبال داشته باشند. همین اضافه‌برداشت آب و خشک شدن عمومی حوضه از طریق تأثیر بر خصوصیات تشعشعی زمین مثل آلبیدو و تأثیر بر بودجه انرژی می‌تواند موجب تغییر اقلیم در حوضه گردد (Rahman et al., 2022).



شکل ۷- میزان آب ذخیره‌شده در سطوح مختلف مالچ کلش

Fig. 7- Amount of stored water in different straw mulch amount

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش مبتنی بر رویکرد تلفیقی آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی، به‌وضوح نشان داد که استفاده از مالچ کلش گندم یک راهکار مدیریتی مؤثر برای بهبود تراز آب در زراعت سویا است. یافته اصلی این بود که پوشش مالچ با کاهش چشمگیر تبخیر از سطح خاک (تا ۵۱ درصد در گرگان و ۵۰ درصد در مینودشت) توانست نیاز به آب آبیاری را به‌ترتیب تا ۱۵ درصد و ۲۱ درصد کاهش دهد. این صرفه‌جویی در مصرف آب منجر به افزایش قابل توجه کارآیی مصرف آب گردید، درحالی‌که عملکرد دانه تحت تیمارهای مختلف مالچ، کاهش معنی‌داری را نشان نداد. این امر مؤید آن است که می‌توان با مدیریت صحیح بقایا، مصرف آب را بدون به خطر انداختن پتانسیل عملکرد، بهینه کرد.

این یافته‌ها دارای پیامدهای کاربردی مهمی برای کشاورزی پایدار در منطقه گلستان و مناطق مشابه با چالش کم‌آبی است. حفظ بقایای گندم در سطح خاک، به‌جای سوزاندن یا حذف آن، نه‌تنها به

حفظ سلامت و رطوبت خاک کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به‌طور مستقیم به صرفه‌جویی در منابع ارزشمند آب منجر شود. براساس نتایج این مطالعه، اجرای گسترده این روش مدیریتی با کاربرد ۳/۷۵ تن مالچ در هکتار، دارای پتانسیل صرفه‌جویی سالانه حدود ۳۴/۴۱ میلیون مترمکعب آب در سطح اراضی زیرکشت سویای استان گلستان است. این پتانسیل، اهمیت ترویج اصول کشاورزی حفاظتی و حمایت از کشاورزان برای اتخاذ این شیوه‌ها را دوچندان می‌سازد.

با وجود نتایج روشن، لازم به ذکر است که این تحقیق دارای محدودیت‌هایی نیز بود. هرچند مدل SSM-iLegume قبلاً برای شرایط منطقه اعتبارسنجی شده بود و آزمایش مزرعه‌ای حاضر امکان کالیبره کردن اثر مالچ بر فنولوژی را فراهم آورد، امّا اعتبارسنجی مستقیم نتایج شبیه‌سازی (مانند تبخیر و عملکرد) با داده‌های مشاهده‌ای تحت تیمارهای مالچ انجام نشد. بنابراین، قویاً پیشنهاد می شود که در تحقیقات آتی، آزمایش‌های مزرعه‌ای جامعی طراحی شوند که در آن‌ها پارامترهایی نظیر رطوبت خاک، عملکرد و زیست‌توده تحت سطوح مختلف مالچ اندازه‌گیری شوند. چنین داده‌هایی برای اعتبارسنجی کامل مدل در شرایط کشاورزی حفاظتی ضروری بوده و می‌توانند یافته‌های حاصل از این مطالعه شبیه‌سازی را تقویت و تکمیل نمایند.

References

1. Abdul Kader, M., Mojid, M.A., & Nakamura, K. (2017). Mulching type-induced soil moisture and temperature regimes and water use efficiency of soybean under rain-fed condition in central Japan. *International Soil and Water Conservation Research, 10*(4), 570-580. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.08.001
2. Baloch, S. B., Ali, S., Bernas, J., Konvalina, P., Naveed, M., Baloch, F. B., Jamali, Z. H., Lošák, T., Roubík, H., & Ghafoor, A. (2025). Crop residue management for soil health and environmental sustainability: A comprehensive review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 25*, 1–21. https://doi.org/10.1007/s42729-025-02633-3
3. Buczek, J., Migut, D., & Jańczak-Pieniążek, M. (2021). Effect of soil tillage practice on photosynthesis, grain yield and quality of hybrid winter wheat. *Agriculture*, *11*(6), 479. https://doi.org/10.3390/agriculture11060479
4. Davis, S. J., Alexander, K., Moreno-Cruz, J., Hong, C., Shaner, M., Caldeira, K., & McKay, I. (2024). Food without agriculture. *Nature Sustainability*, *7*(1), 90–95. https://doi.org/10.1038/s41893-023-01241-2
5. Demo, A. H., & Asefa Bogale, G. (2024). Enhancing crop yield and conserving soil moisture through mulching practices in dryland agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1361697. https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1361697
6. FAO. (2022). Production Yearbook. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
7. Gebeyhu, B., & Markos, G. (2023). Assessment of soil mulching field management, and deficit irrigation effect on productivity of watermelon varieties, and AquaCrop model validation. *Heliyon*, *9*(11), e21824. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21824
8. Grover, D., Mishra, A. K., Rani, P., Kalonia, N., Chaudhary, A., & Sharma, S. (2024). Soil management in sustainable agriculture: principles and techniques. In: Kumar, P., Aishwarya (eds.), *Technological Approaches for Climate Smart Agriculture* (pp. 41–77). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52708-1_4
9. Imran. (2024). Integration of organic, inorganic and bio fertilizer, improve maize-wheat system productivity and soil nutrients. *Journal of Plant Nutrition*, *47*(15), 2494–2510. https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2354190
10. Klopp, H. W., & Blanco-Canqui, H. (2022). Implications of crop residue removal on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal, 86*(4), 979–1001. https://doi.org/10.1002/saj2.20418
11. Koskei, K., Munyasya, A. N., Wang, Y. B., Zhao, Z. Y., Zhou, R., Indoshi, S. N., Wang, W., Cheruiyot, W. K., Mburu, D. M., & Nyende, A. B. (2021). Effects of increased plastic film residues on soil properties and crop productivity in agro-ecosystem. *Journal of Hazardous Materials, 414*, 125521. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125521
12. Kulkarni, S. (2021). Sustainable soil conservation and management: Principles, issues, and strategies. In: Tripathi, V.K., & Goyal, M.R. (Eds.), *Field Practices for Wastewater Use in Agriculture* (pp. 133–178). Apple Academic Press. https://doi.org/10.1201/9781003034506-11
13. Li, R., Hou, X., Jia, Z., Han, Q., Ren, X., & Yang, B. (2013). Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China. *Agricultural*

Water Management, *116*, 101–109. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.001

14. Li, Y., Chai, S., Chai, Y., Li, R., Lan, X., Ma, J., Cheng, H., & Chang, L. (2021). Effects of mulching on soil temperature and yield of winter wheat in the semiarid rainfed area. *Field Crops Research*, *271*, 108244. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108244
15. Liang, M., Chen, L., Chen, G., Zhao, Y., Liu, G., Sun, E., Yong, C., Huang, H., Li, F., & Qu, P. (2025). Protective effects of straw mulching on soil health and function: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, *37*(1), 2533900. https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2533900
16. Liao, C., Tang, M., Zhang, C., Deng, M., Li, Y., & Feng, S. (2025). Impacts of various straw mulching strategies on soil water, nutrients, thermal regimes, and yield in wheat–soybean rotation systems. *Plants*, *14*(14), 2233. https://doi.org/10.3390/plants14142233
17. Liebhard, G., Klik, A., Neugschwandtner, R. W., & Nolz, R. (2022). Effects of tillage systems on soil water distribution, crop development, and evaporation and transpiration rates of soybean. *Agricultural Water Management*, *269*, 107719. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107719
18. Liu, J., & Lobb, D. A. (2021). An overview of crop and crop residue management impacts on crop water use and runoff in the Canadian prairies. *Water*, *13*(20), 2929. https://doi.org/10.3390/w13202929
19. Mingotte, F., Jardim, C., Yada, M., Amaral, C., Chiamolera, T., Coelho, A., Lemos, L., & Fornasieri Filho, D. (2020). Impact of crop management and no-tillage system on grain and straw yield of maize crop. *Cereal Research Communications*, *48*, 399–407. https://doi.org/10.1007/s42976-020-00051-y
20. Mirzaei, M., Gorji Anari, M., Razavy-Toosi, E., Asadi, H., Moghiseh, E., Saronjic, N., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Preliminary effects of crop residue management on soil quality and crop production under different soil management regimes in corn-wheat rotation systems. *Agronomy*, *11*(2), 302. https://doi.org/10.3390/agronomy11020302
21. Musie, W., & Gonfa, G. (2023). Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon*, *9*(8), e18685. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685
22. Rahman, K. U., Hussain, A., Ejaz, N., Shahid, M., Duan, Z., Mohammadi, B., Hoai, P. N., Pham, Q. B., Khedher, K. M., & Anh, D. T. (2022). Evaluating the impact of the environment on depleting groundwater resources: A case study from a semi-arid and arid climatic region. *Hydrological Sciences Journal*, *67*(5), 791–805. https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2044483
23. Rivier, P. A., Jamniczky, D., Nemes, A., Makó, A., Barna, G., Uzinger, N., Rékási, M., & Farkas, C. (2022). Short-term effects of compost amendments to soil on soil structure, hydraulic properties, and water regime. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, *70*(1), 74-88. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0004
24. Singh, R. J., Ward, P., & Oliver, Y. (2025). Modelling the long-term effects of wheat monoculture vs wheat in diversified crop sequences managed with varied crop residue amounts on water-use and grain yields in a Mediterranean dryland. *Plant and Soil*, *524*, 17–36. https://doi.org/10.1007/s11104-025-07682-2
25. Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R. S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Meyari, A., & Sinclair, T. R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, *182*, 102855. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102855
26. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, *124*(2), 252–260. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021
27. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CABi. https://doi.org/10.1079/9781845939700.0000
28. Thind, H., Sharma, S., Sidhu, H., & Singh, V. (2023). Tillage, crop establishment and residue retention methods for optimising productivity and profitability under rice–wheat system. *Crop and Pasture Science*, *74*(9), 828-842. https://doi.org/10.1071/CP21595
29. Van Wart, J., Grassini, P., & Cassman, K. G. (2013). Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Global Change Biology*, *19*(12), 3822–3834. https://doi.org/10.1111/gcb.12302
30. Zhang, P., Zhang, Z., Xiao, M., Chao, J., Dai, Y., Liu, G., & Senge, M. (2023). Effects of organic mulching on moisture and temperature of soil in greenhouse production of tomato under unheated greenhouse cultivation in the cold zone of China. *Food Science & Nutrition*, *11*(8), 4829–4842. https://doi.org/10.1002/fsn3.3460

31. Zhang, Y., Zhu, K., Tang, Y., & Feng, S. (2024). Rice cultivation under film mulching can improve soil environment and be beneficial for rice production in China. *Rice Science*, *31*(5), 545–555. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2024.06.009
32. Zhao, X.-d., Qin, X.-r., Li, T.-L., Cao, H.-b., & Xie, Y.-h. (2023). Effects of planting patterns plastic film mulching on soil temperature, moisture, functional bacteria and yield of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Journal of Integrative Agriculture*, *22*(5), 1560-1573. https://doi. 10.1016/j.jia.2023.02.026

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 18, No. 2, 2026, p. 183-212

Improving Quantitative and Qualitative Seed Yield of Camelina (*Camelina sativa* L.) through the Integrated Application of Chemical Fertilizers, Biofertilizers, and Nano-Chitosan under Rainfed and Supplementary Irrigation Conditions

Abdollah Javanmard[1*], Mohammad Haghaninia[1], Haniyeh Shabkhiz[1]

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, East Azarbaijan, Iran
(*- Corresponding author's Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)

Received: 10-02-2026
Revised: 24-08-2026
Accepted: 06-09-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:
Javanmard, A., Haghaninia, M., & Shabkhiz, H. (2026). Improving quantitative and qualitative seed yield of camelina (*Camelina sativa* L.) through the integrated application of chemical fertilizers, biofertilizers, and nano-chitosan under rainfed and supplementary irrigation conditions. *Journal of Agroecology*, *18*(2), 183-212. (In Persian)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97784.1270

Introduction

One of the most critical environmental factors affecting the distribution, spread, growth, and successful production of plant products is the amount of water available to the plant. Reducing water availability causes drought stress and triggers numerous morphological, physiological, and biochemical changes in plants (Farooq et al., 2009). Water deficiency stress leads to reduced growth, dry weight, stomatal closure, decreased height, smaller leaf area, cell growth inhibition, lower photosynthesis rates, protein degradation, enzyme destruction, toxic substance production, hormonal imbalances such as increased abscisic acid and decreased growth promoters, damage to plastids, and restricted root growth (Anwaar et al., 2020). Supplementary irrigation is an effective method for compensating for soil moisture deficiency, increasing water-use efficiency, preventing yield fluctuations, and promoting sustainable production in arid and semi-arid regions (Mohtashami et al., 2020). Moreover, using biofertilizers as environmentally friendly inputs is valuable because they rely on renewable energy sources, are cost-effective, and reduce dependence on chemical fertilizers. Various studies have shown that using chitosan nanoparticles can reduce the harmful effects of biotic and abiotic stresses and significantly improve the quantity and quality of agricultural products by enhancing nutrient availability (Mehmood et al., 2020).

Materials and Methods

To investigate the effects of different fertilizer sources under dryland and supplementary irrigation conditions on the quantity and quality of camelina (*Camelina sativa* L.) oil, an experiment was conducted using split plots based on a randomized complete block design with 16 treatments and three replications in the field of the

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97784.1270

Faculty of Agriculture at the University of Maragheh during the crop years 2020 and 2021. The main factor was cultivation under rainfed conditions and with supplementary irrigation, while the sub-factor included various fertilizer sources: control (without fertilizer), 100% recommended chemical fertilizer (CF), biofertilizer (BF), chitosan nanoparticles (CS), a mixture of 50% chemical fertilizer and biofertilizer, 50% CF + CS nanoparticles, BF + CS nanoparticles, and a combination of 50% CF + BF + CS nanoparticles. Seeds used in this experiment were of the Soheil variety, with a germination rate of 98% and purity of 99%, obtained from Shafa Bisotun Company, Kermanshah. Bed preparation involved plowing, disking, and leveling, based on soil conditions and moisture reaching field capacity. Subsequently, plots measuring 6 square meters with 8 rows of cultivation were prepared. The distances between crop lines and within crop lines were set at 10 cm and 5 cm, respectively. After confirming the normality of the data, the combined variance analysis was performed in the form of two-way split plots using statistical software (SAS version 9.1, Cary, NC, USA), and the graphs were generated using Excel software. Additionally, data means were compared using Duncan's test at a significance level of 5%.

Results and Discussion

The results showed that the combined application of 50% CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles increased seed yield by 32.22, 24.79, and 0.75%, respectively, under supplementary irrigation conditions, and by 26.11, 15.26, and 12.56%, respectively, under rainfed conditions, compared to the separate application of CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles. The maximum oil yield (239.89 kg ha^{-1}) was achieved under supplementary irrigation conditions using 50% chemical fertilizer combined with growth-promoting bacteria and chitosan nanoparticles. Under rainfed conditions, the combined treatment of growth-promoting bacteria and chitosan nanoparticles increased the oil yield by 109.30% compared to the control. Additionally, the combined application of 50% fertilizer, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles under supplementary irrigation increased camelina oil yield by 73.9% compared to the control. The main components of camelina oil included saturated fatty acids such as palmitic (6.85-3.73%) and stearic acids (4.34-2.33%), and unsaturated fatty acids including oleic (16.43-14.46%), linoleic (25.14-19.19%), linolenic (36.79-31.92%), and eicosanoic acid (11.44-7.81%). The highest levels of palmitic and stearic acids were observed with supplementary irrigation combined with CF. Moreover, the results demonstrated that supplementary irrigation increased the relative water content by 33% compared to rainfed conditions. The combined application of 50% CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles under both rainfed and supplementary irrigation conditions raised the relative water content by 58.3 and 81.2%, respectively, compared to the control. Notably, the combined treatment of 50% CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles increased chlorophyll a, b, and carotenoid contents by 114.53, 137.88, and 121.51%, respectively, compared to no fertilizer use. Drought stress causes a decrease in grain yield by reducing leaf water, closing stomata, and lowering photosynthesis, as well as affecting enzyme activities and related processes. The use of chitosan nanoparticles enhances drought tolerance by reducing transpiration and maintaining relative water content. Additionally, the increase in oil yield with the application of plant growth- promoting bacteria plus CS nanoparticles is attributed to improved nutrient availability and higher grain and oil content. The use of 50% CF, growth- promoting bacteria, and CS nanoparticles significantly increased chlorophyll content compared to untreated plants. It appears that this combined application increases protein content and Rubisco actives enzyme activity, enhancing Calvin cycle reactions, which boosts Rubisco carboxylation activity and improves photosynthesis. Furthermore, growth- promoting bacteria increase chlorophyll and carotenoid levels by improving nutrient availability, including potassium.

Conclusion

In general, the results showed that the integrated application of 50% recommended chemical fertilizer combined with biofertilizer and chitosan nanoparticles under supplemental irrigation is recommended as a sustainable, profitable, and farmer-advisable nutrient package to enhance the quantitative and qualitative yield of camelina in rainfed and water-limited regions. The use of these inputs improves the absorption of nutrients and increases the efficiency of fertilizer use, thereby improving the physiological indicators of the plant, increasing yield, and improving the quality and composition of Camelina oil. Also, this strategy can have positive effects on plant adaptation and production sustainability in rainfed conditions where environmental stresses, especially moisture limitation, exist.

Keywords: Chlorophyll content, Nanotechnology, Oil compounds, Water stress

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۱۲-۱۸۳

بهبود عملکرد کمّی و کیفی دانه کاملینا (*Camelina sativa* L.) با کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی، زیستی و نانوکیتوزان در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

عبدالله جوانمرد[1*]، محمد حقانی‌نیا[1]، حانیه شب‌خیز[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده

به‌منظور ارزیابی اثرات کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی، زیستی و نانوذرات کیتوزان بر صفات فیزیولوژیک، عملکرد دانه، کمیت و کیفیت روغن گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.)، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۶ تیمار و سه تکرار در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه طی دو سال زراعی اجرا گردید. عامل اصلی شامل شرایط آبیاری (دیم و آبیاری تکمیلی) و عامل فرعی شامل تیمارهای مختلف کودی (بدون کاربرد کود به‌عنوان شاهد، ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه‌شده (CF)، کود زیستی (BF)، نانوذرات کیتوزان (CS)، ۵۰ درصد کود شیمیایی + کود زیستی، ۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، کود زیستی + نانوذرات کیتوزان، ۵۰ درصد کود شیمیایی + کود زیستی + نانوذرات کیتوزان) بود. نتایج نشان داد که شرایط دیم با کاهش معنی‌دار محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای نسبی آب برگ و پایداری غشای سلولی موجب افزایش مالون‌دی‌آلدئید و در نهایت کاهش عملکرد دانه و روغن شد. این تغییرات فیزیولوژیک با افت کیفیت روغن، به‌ویژه کاهش نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع همراه بود. در مقابل، آبیاری تکمیلی همراه با کاربرد تلفیقی کود زیستی و نانوذرات کیتوزان، به‌ویژه در ترکیب با ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه‌شده، با بهبود وضعیت آبی گیاه، افزایش کلروفیل a، b، کاروتنوئیدها و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، شرایط فیزیولوژیک مطلوب‌تری برای پُر شدن دانه فراهم کرد. به‌طوری که کاربرد تلفیقی تیمارهای کودی، محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئید را نسبت به عدم مصرف به ترتیب ۱۱۴/۵۳، ۱۳۷/۸۸ و ۱۲۱/۵۱ درصد افزایش داد. همچنین این بهبود فیزیولوژیک منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و روغن و همچنین ارتقای کیفیت روغن از طریق افزایش اسیدهای چرب غیراشباع گردید. افزون‌بر این، ترکیبات اصلی روغن کاملینا شامل اسیدهای چرب اشباع شده پالمتیک (۶/۸۵-۳/۷۳ درصد)، اسیدهای استئاریک (۴/۳۴-۲/۳۳ درصد) و همچنین اسیدهای چرب غیراشباع اولئیک (۱۶/۴۳-۱۴/۴۶ درصد)، لینولئیک (۲۵/۱۴-۱۹/۱۹ درصد)، لینوئک (۳۶/۷۹-۳۱/۹۲ درصد) و ایکوزنوئیک اسید (۱۱/۴۴-۷/۸۱ درصد) بود. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که بهبود عملکرد و کیفیت روغن کاملینا تحت مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی، به‌طور مستقیم با تقویت فرآیندهای فیزیولوژیک، حفظ کارآیی فتوسنتزی و کاهش تنش اکسیداتیو مرتبط است. کاربرد تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه‌شده همراه با کود زیستی و نانوذرات کیتوزان در شرایط آبیاری تکمیلی، به‌عنوان یک بسته تغذیه‌ای پایدار، سودمند و قابل توصیه به کشاورزان برای افزایش کمّی و کیفی عملکرد کاملینا در مناطق دیم و دارای محدودیت آب پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ترکیبات روغن، تنش کم‌آبی، محتوای کلروفیل، نانو فناوری

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97784.1270

مقدمه

دانه‌های روغنی در بین گیاهان زراعی اهمیت خاصی داشته و بعد از غلات دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می‌دهند. اراضی وسیعی در سرتاسر جهان به کشت این گیاهان باارزش اختصاص پیدا کرده است. این گیاهان حاوی ۲۰ الی ۵۰ درصد روغن هستند که در اغلب موارد حاوی ترکیبات متوازنی از اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع می‌باشند (Zafar et al., 2019). کاملینا *Camelina sativa* (L.) به‌عنوان یکی از این گیاهان به خانواده شب‌بوها تعلق داشته که به‌صورت علفی، دارای ساقه راست و کمی خشن، به ارتفاع ۳۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. منشأ اولیه آن نواحی استپی آسیا بوده و از آنجا به مناطق دیگر راه یافته است (Waraich et al., 2013). تولید جهانی این گیاه به‌ویژه در کشورهای کانادا و برخی کشورهای اروپایی به‌دلیل محتوای اسیدهای چرب امگا-۳ و مقاومت به تنش‌های محیطی رو به افزایش است. براساس آمارهای موجود، عملکرد دانه کاملینا در سطح جهانی به‌ترتیب در محدوده ۱۳۰۰ تا ۳۳۰۰ کیلوگرم در هکتار متغیر است (Zanetti et al., 2021). عملکرد و سطح زیرکشت کاملینا برخلاف گیاهان راهبردی (گندم و ....)، در آمار رسمی FAO به‌صورت مستقل و جهانی ثبت نمی‌شود و آمارها عمدتاً به‌صورت گزارش‌های موردی یا بررسی‌های پژوهشی هستند. برای مثال، سطح زیرکشت کشور روسیه در سال ۲۰۱۹ حدود ۷۵۶۰۰ هکتار، کشور کانادا در سال ۲۰۲۰ حدود ۴۰۵۰ هکتار و کل اروپا حدود ۱۰ هزار هکتار برآورد شده است. در ایران هم با توجه به سیاست‌های وزارت جهاد کشاورزی مبنی بر توسعه کشت دانه‌های روغنی و کاهش وابستگی به واردات، کشت کاملینا در مناطق سردسیر و معتدل گسترش یافته است. بااین‌حال، گزارش‌های موجود نشان می دهد که میانگین عملکرد دانه در مزارع ایران (۵۰۰ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با پتانسیل ژنتیکی این گیاه، به‌دلیل محدودیت‌های مدیریتی و تغذیه‌ای، پایین‌تر از میانگین جهانی (۱۴۱۰ کیلوگرم در هکتار) برآورد می‌شود. متأسفانه آمار رسمی سطح زیرکشت که تمام استان‌ها را برای سال ۱۴۰۳ یا ۱۴۰۴ در یک گزارش رسمی تجمیع کرده باشد، در دسترس نیست. داده‌ها به‌صورت استانی و موردی است. به‌عنوان مثال، در استان خراسان شمالی، سطح زیرکشت در سال ۱۴۰۴حدود ۳۶۵۰ هکتار گزارش شده است. همچنین سطح زیرکشت در سال ۱۴۰۲ حدود ۱۳ هزار هکتار تخمین زده شده است (Arshad et al., 2022;Neupane et al., 2022). کاملینا می‌تواند به‌خوبی در آب‌وهوای معتدل با خاک سبک و متوسط به‌خصوص در خاک‌های لومی و شنی با کمترین حاصلخیزی و بدون استفاده از آفت‌کش‌ها رشد نماید. این گیاه تحمل بالایی به گرما و خشکی داشته و در تناوب با گندم و دیگر غلات جهت افزایش کیفیت خاک استفاده می‌گردد. پژوهش‌ها نشان داده که کارآیی کاملینا در شرایط غرقابی، بسیار پایین است. شرایط شدید غرقابی در اوایل فصل رشد منجر به تلف شدن ۲۷ تا ۳۲ درصد گیاهان در زمان برداشت می‌شود (Gugel & Falk, 2006). روغن کاملینا در بازارهای جهانی به‌عنوان یک روغن باارزش و باکیفیت بالا شناخته‌شده که علاوه‌بر مصارف غذایی در صنایع آرایشی، بهداشتی و صنعتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sentís-Moré et al., 2023).

از جمله مهم‌ترین عوامل محیطی که پراکنش، رشد و تولید موفق گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، میزان آب در دسترس گیاه است. کاهش میزان آب در دسترس گیاه موجب بروز تنش خشکی و ایجاد تغییرات موفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی متعددی در گیاهان می‌شود (Farooq et al., 2009). با توجه به اینکه تنش خشکی نسبت به سایر تنش‌های محیطی کمیت و کیفیت گیاهان را بیشتر محدود می‌کند، در ایران نیز تنش خشکی یکی از اصلی‌ترین عوامل کاهش عملکرد گیاهان زراعی و باغی محسوب می‌شود (Ebrahimian et al., 2019). تنش ناشی از کمبود آب موجب کاهش رشد، وزن خشک، بسته شدن روزنه‌ها و افت سطح برگ، تخریب رشد سلولی، کاهش فتوسنتز، تخریب و کاهش پروتئین‌ها، تخریب آنزیم‌ها، تولید مواد سمی، اختلالات هورمونی نظیر افزایش اسید آبسیزیک و کاهش تشدیدکننده‌های رشد، آسیب به پلاستیدها و رنگیزه‌ها، کاهش کلروفیل و کاهش رشد ریشه می‌شود (Anwaar et al., 2020). در تحقیقی که روی کاملینا تحت رژیم‌های آبیاری مختلف انجام شد، پژوهشگران نتیجه گرفتند که هر دو رژیم آبیاری محدود، بر ویژگی‌های فیزیولوژیک (محتوای آب نسبی، مقاومت روزنه‌ها، دمای تاج‌پوشش و محتوای کلروفیل کل) و زراعی (تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، وزن هزار دانه و عملکرد دانه) تأثیر منفی می‌گذارند و راندمان مصرف آب و همچنین محتوای روغن را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند (4Rad et al., 202). در پژوهش دیگری، ارزیابی عملکرد و ترکیبات روغن کاملینا

(*Camelina sativa* L.) نشان داد که در شرایط آبیاری نرمال، محتوای روغن دانه به‌میزان ۳۱/۰۲ درصد به دست آمد که در مقایسه با سایر رژیم‌های آبیاری (تنش کم‌آبی) بیشتر بود. تنش کم‌آبی اگرچه منجر به افزایش اسیدهای چرب اشباع (پالمتیک، استئاریک و آراشیدیک) شد، امّا ترکیب اسیدهای چرب غیراشباع شامل اولئیک، لینولئیک و لینولنیک را به‌صورت معنی‌دار کاهش داد (Shiranirad et al., 2023).

آبیاری تکمیلی یکی از روش‌های مؤثر در جبران کمبود رطوبت خاک و بالا بردن کارآیی مصرف آب و جلوگیری از نوسان عملکرد و دستیابی به تولید پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Mohtashami et al., 2020). آبیاری تکمیلی به مفهوم کاربرد مقدار محدودی آب در گیاه زراعی در زمان نبود بارندگی می‌باشد تا آب کافی برای رشد گیاه به‌منظور افزایش و یا ثبات عملکرد را تأمین نماید. به‌طورکلی اثر مهم آبیاری تکمیلی شامل بهبود عملکرد، ثبات تولید در سال‌های مختلف و بهبود شرایط جهت استفاده از ارقام اصلاح‌شده، کودهای شیمیایی و علف‌کش‌ها بدون توجه به پراکنش بارندگی‌های فصلی می‌باشد (Reddy & Reddy, 2016). اعمال آبیاری تکمیلی در مرحله بحرانی نیاز آبی گیاه، یکی از روش‌های مؤثر در جلوگیری از نوسان عملکرد و دستیابی به تولید پایدار محصولات کشت دیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این روش، اثرات خشکی بر گیاه کاهش و رطوبت نسبتاً مناسبی برای گیاه به‌ویژه در مراحل حساس رشد فراهم می‌شود و به‌دنبال آن عملکرد بهبود می‌یابد (Alkatb & Geosciences, 2022). در تحقیقی که روی کلزا (*Brassica napus* L.) انجام شد، استفاده از آبیاری تکمیلی باعث افزایش عملکرد، اجزای عملکرد، درصد روغن، شاخص برداشت و بهره‌وری آب گردید. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که آبیاری تکمیلی در دو مرحله گل‌دهی و پُر شدن دانه می‌تواند باعث افزایش قابل توجهی در کمیت و کیفیت روغن گیاه نسبت به شرایط دیم گردد (Mohtashami et al., 2020).

در بوم‌نظام‌های کشاورزی، آب و کود دو عامل کلیدی و تعیین کننده هستند که رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. کاهش حاصلخیزی خاک در بسیاری از کشورهای در حال توسعه و استفاده دائم گیاهان از ذخایر غذایی خاک بدون جایگزین مناسب و کافی باعث کاهش توان تولیدی مواد غذایی توسط خاک شده است. در این مورد، استفاده از کودهای شیمیایی به‌عنوان سریع‌ترین راه برای جبران کمبود مواد غذایی و حاصلخیزی خاک، لازم به نظر می‌رسد. ولی هزینه‌های زیاد کودهای شیمیایی در مقادیر پیشنهادی و آلودگی خاک و آب ناشی از مواد شیمیایی ساخت بشر، تقاضای بیشتر را برای مصرف کودهای ارگانیک طلب می‌کند (Bano et al., 2024). به‌طورکلی، محصولاتی که شامل سلول‌های زنده از گونه‌های مختلف ریزجانداران هستند که توانایی تبدیل عناصر غذایی از شکل غیرقابل جذب به فرم جذب برای استفاده گیاهان را داشته و یا می‌توانند ترکیبات محرک رشد گیاه را تولید کنند و باعث جوانه‌زنی بهتر بذر و توسعه بهتر ریشه در خاک می‌شود، به‌عنوان کودهای زیستی محسوب می‌گردد (Mącik et al., 2020). از جمله مهم‌ترین ریزجاندارهایی که به‌عنوان کودهای زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توان به *Rhizobia*، *Azotobacter*، *Azospirillum* باکتری‌های حل‌کننده فسفات، میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد گیاه[1] اشاره کرد. این ریزجانداران توسط سازوکارهایی همچون افزایش جذب آب و مواد غذایی، تثبیت نیتروژن، تبدیل فسفات معدنی به آلی، تولید سیدروفور، آزاد کردن متابولیت‌ها و تولید هورمون‌های گیاهی از قبیل اکسین و جیبرلین موجب تحریک رشد گیاه می‌گردند (Giri et al., 2019). نصرالله‌زاده و همکاران (Nasrollahzadeh et al., 2023) نتیجه گرفتند که کاربرد کودهای شیمیایی بر کیفیت روغن کلزا (*Brassica napus* L.) تأثیر منفی گذاشت. در مقابل، کاربرد باکتری‌های محرک رشد به‌ویژه در ترکیب با کودهای شیمیایی، عملکرد دانه، محتوای روغن و کیفیت و همچنین تولید بیودیزل را با بهبود جذب مواد مغذی افزایش داد. همچنین این پژوهشگران مشاهده کردند که استفاده از باکتری‌های محرک رشد نه‌تنها عملکرد و کیفیت روغن کلزا را افزایش داد، بلکه استفاده از کودهای شیمیایی را به حداقل رساند. در پژوهشی دیگری که با هدف بررسی اثرات کودهای زیستی و شیمیایی بر صفات کمّی و کیفی سیاهدانه (*Nigella sativa*) انجام شد، مشاهده گردید که بیشترین اسید اولئیک (۲۷/۸۵ درصد) و اسید لینولئیک (۵۶/۶ درصد) روغن سیاهدانه در تیمارهای تلفیقی به دست آمد. همچنین بالاترین محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم و در نهایت عملکرد دانه و روغن در تیمار تلفیقی حاصل شد (Moradzadeh et al., 2021).

اخیراً نانوفناوری در بخش کشاورزی کاربردهای بسیار زیادی داشته و در آینده نزدیک میزان این کاربردها افزایش خواهد یافت

1- Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR)

(Pramanik et al., 2020). با استفاده از نانو فناوری می‌توان کمیت و کیفیت گیاهان را افزایش داد (Sathiyabama & Manikandan, 2021). نانومواد به‌عنوان موادی با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر تعریف می‌شوند که به‌راحتی وارد گیاه و جذب آن می‌شوند. بر همین اساس، نانوذرات، موادی بوده که می‌توانند یک یا چند عنصر غذایی را در اختیار گیاه قرار دهند و کارآیی بیشتری نسبت به کودهای شیمیایی داشته باشند. استفاده از نانوذره‌هایی که ویژگی‌هایی همچون غلظت مؤثر، قابلیت حل‌پذیری مناسب، ثبات و تأثیرگذاری بالا و رهایش کنترل‌شده را دارند سبب افزایش کارآیی عناصر غذایی می‌شوند، به‌طوری که علاوه‌بر رهاسازی تدریجی عناصر غذایی، جذب و انتقال آن‌ها از طریق برگ نیز به‌سهولت انجام می‌گیرد (Ekim et al., 2024). نانوذرات به‌راحتی وارد گیاه می‌شوند و باعث ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های موفولوژیک و فیزیولوژیک گیاهان می‌شوند. به‌عنوان مثال، در بعضی از پژوهش‌ها گزارش شده که نانوذرات باعث افزایش بنیه بذر، هم‌زمانی جوانه‌زنی بذور، افزایش درصد جوانه‌زنی، افزایش طول ریشه و ساقه، بهبود وزن تر و خشک، ارتفاع گیاه، تعداد گره و محتوای کلروفیل شده و در نهایت منجر به بهبود رشد گیاه در بسیاری از محصولات می‌شوند (Afshari et al., 2021). امروزه کاربرد مواد فعال زیستی و سازگار با محیط‌زیست برای افزایش رشد گیاه و حفظ نباتات به‌عنوان یک بخش مهم نظام کشاورزی مدرن محسوب می‌گردد. کیتوزان یک ماده غیرسمی، زیست‌تخریب‌پذیر، آب‌دوست، ضدباکتری بوده که با محیط زیست سازگار است (Narasimhamurthy et al., 2022). پژوهش‌های مختلف نشان دادند که کاربرد کیتوزان موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کلیدی متابولیسم نیتروژن (نیترات رودکتاز و گلوتامین سنتتاز) و همچنین بهبود نقل و انتقال نیتروژن در شرایط تنش می‌گردد که این موضوع موجب بهبود رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Balusamy et al., 2022). کاربرد کیتوزان می‌تواند اثرات زیان‌بار تنش‌های زیستی و غیرزیستی را کاهش داده و از طرفی به‌دلیل فراهمی برخی از عناصر غذایی در بهبود کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی به‌طور چشمگیری مؤثر واقع می‌شود (Mehmood et al., 2020). در مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی اثرات نانوذرات کیتوزان بر عملکرد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و مشخصات اسیدهای چرب لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) تحت تنش خشکی، مشاهده شد که کاربرد نانوذرات کیتوزان، اثرات تنش خشکی را تعدیل و باعث بهبود محتوای نسبی آب، شاخص کلروفیل، عملکرد دانه و بیولوژیک در مقایسه با شاهد شده است. همچنین این پژوهشگران مشاهده کردند که استفاده از نانوذرات کیتوزان، کیفیت اسیدهای چرب را از طریق کاهش اسیدهای چرب اشباع و افزایش اسیدهای چرب غیراشباع بهبود بخشید (Dolatkhah Dashtmian *et al*., 2023). بنابراین، هدف از این پژوهش، ارزیابی پتانسیل کاربرد تلفیقی منابع کودی (شیمیایی، زیستی و نانوکیتوزان) به‌عنوان یک راهبرد جایگزین و پایدار برای کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و مقابله با محدودیت‌های آبی است. این مطالعه با تمرکز بر بررسی هم‌افزایی این منابع، به‌دنبال تحلیل دقیق اثرات آن‌ها بر بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک، افزایش عملکرد دانه و همچنین بهبود پروفایل اسیدهای چرب روغن کاملینا تحت دو رژیم رطوبتی دیم و آبیاری تکمیلی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۴۸۵ متر از سطح دریا اجرا شد. پیش از شروع آزمایش، سه نمونه خاک به‌صورت تصادفی از نواحی مختلف کرت‌های آزمایشی انتخاب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. داده‌های تکمیلی در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه‌بر این، مشخصات اقلیمی منطقه مورد آزمایش (میانگین دما و بارش ماهیانه) در جدول ۲ ارائه شده است. آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۶ تیمار و سه تکرار اجرا گردید. عامل اصلی در دو سطح شامل کشت دیم و آبیاری تکمیلی و عامل فرعی شامل منابع مختلف کودی (شاهد، کود شیمیایی توصیه شده (نیتروژن، فسفر، پتاسیم و گوگرد)، باکتری‌های محرک رشد (ازتوبارور۱ + سولفات بارور۱ + فسفات بارور۲ + پتابارور۲)، نانوذرات کیتوزان، ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰ درصد کودشیمیایی + نانوذرات کیتوزان، باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، ۵۰ درصد کود شیمیایی+ باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان) بود. بذرهای مورد استفاده در این آزمایش رقم سهیل با درصد جوانه‌زنی ۹۸ درصد و خلوص ۹۹ درصد بود که از شرکت شفا بیستون کرمانشاه تهیه شدند.

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil where the experiment was conducted

بافت Texture	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	ظرفیت زراعی Field capacity (%)	نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point (%)	نیتروژن کل Total nitrogen ($g.kg^{-1}$)	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus ($mg.kg^{-1}$)	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium ($mg.kg^{-1}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity ($Cmolc.kg^{-1}$)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	ماده آلی Organic matter ($g.kg^{-1}$)
شنی رسی لومی Sandy clay loam	57	16	27	26.9	13.7	0.91	8.8	558.36	26.5	7.95	1.14	1.8

جدول ۱- میانگین دمای ماهانه و کل بارندگی ماهانه در فصول رشد ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ و میانگین بلندمدت

Table 2- Average monthly temperature and total monthly precipitation during the 2020 and 2021 growing seasons and the long-term average

سال Year	اسفند March	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July
میانگین دمای ماهانه Average monthly temperature (˚C)					
2020	7.8	11.8	19.01	24.2	28
2021	8.74	16.29	21.26	27.21	28.26
میانگین دو ساله Two-years average	8.27	14.05	20.18	25.71	28.13
میانگین ۱۰ ساله Ten-years average	8.32	11.5	18.35	24.9	27.85
مجموع بارندگی ماهانه Total monthly rainfall (mm)					
2020	49.94	63.3	12	2.6	0.1
2021	32.92	12.01	13.33	0.01	3.1
میانگین دو ساله Two-years average	41.43	37.66	12.67	1.31	1.60
میانگین ۱۰ ساله Ten-years average	36.33	48.05	29.2	2.95	0.25

عملیات تهیه بستر شامل شخم، دیسک و تسطیح با توجه به شرایط زمین و رسیدن رطوبت زمین به حد ظرفیت زراعی انجام گردید. در ادامه، کرت‌هایی با ابعاد شش مترمربع و شامل هشت ردیف کشت ایجاد شد. لازم به ذکر است که فواصل بین خطوط کشت و روی خطوط کشت به‌ترتیب ۱۰ و ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بذرها در اواخر اسفند ماه به‌میزان هفت کیلوگرم در هکتار و با تراکم ۸۰ بوته در مترمربع و در عمق یک سانتی‌متری خاک کشت شدند. به‌منظور جلوگیری از تداخل تیمارها، فاصله هر کرت با کرت مجاور ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بلوک‌ها دو متر در نظر گرفته شد. در طول این پژوهش، از هیچ‌گونه مواد شیمیایی از قبیل علف‌کش، آفت‌کش و ... استفاده نشده و جهت مبارزه با علف‌های هرز نیز در دو نوبت وجین دستی صورت پذیرفت.

تیمارهای کودی

کودهای شیمیایی براساس نتایج آزمایش خاک شامل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره (یک سوم از کود نیتروژن در هنگام تهیه بستر به زمین داده شد و دو سوم باقی‌مانده کود نیتروژن بعد از کاشت به‌صورت سرک در دو مرحله تا قبل از گل‌دهی توزیع شد)، ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل به‌صورت پیش‌کاشت، پتاسیم سولفات ۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت پیش‌کاشت و ۵۰ کیلوگرم گوگرد بنتونیتی در هکتار بود. همچنین باکتری‌های محرک رشد مورد استفاده در این پژوهش شامل: ۱- کود زیستی ازتوبارور۱[1] حاوی 10^7 تا 10^8 CFU g^{-1} باکتری تثبیت‌کننده نیتروژن *Pantoea agglomerans* سویه O_4، ۲- کود زیستی فسفاته بارور۲[2]، حاوی 10^7 تا 10^8 CFU g^{-1} باکتری‌های *Pseudomonas putida strain* P_5 و P_{13}، ۳- کود زیستی *Pantoea agglomerans strain* پتابارور۲[3] حاوی 10^7 تا 10^8 CFU g^{-1} باکتری‌های *Pseudomonas koreensis strain* S_{14} و *Pseudomonas vancouverensis* strain S_{19} و کود زیستی سولفوبارور۱ حاوی 10^7 تا 10^8 CFU g^{-1} باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد *Thiobacillus strain* T_{40}, T_{95}بودند. کودهای زیستی مورد استفاده از شرکت زیست فناور سبز تهیه شدند. کودهای زیستی به‌روش بذرمال و با نسبت ۱۰۰ گرم برای یک هکتار مورد استفاده قرار گرفتند. کودهای زیستی قبل از کاشت و دور از تابش مستقیم خورشید با بذر آغشته شدند. برای این کار، بذرها را در سایه روی نایلون و سطح تمیزی ریخته و به‌ازای هر هکتار زراعت، یک بسته از کود زیستی را در حجم مناسبی از آب فاقد کلر حل و پس از صاف کردن محلول کودی توسط پارچه‌ای نازک، آن را به‌وسیله آب‌پاش روی بذرها پاشیده و به‌خوبی مخلوط نموده تا تمامی

1- Azeto BARVAR. 1
2- Phosphate BARVAR. 2
3- Pota BARVAR. 2

آن‌ها به‌طور یکنواخت به کود آغشته شوند.

تهیه نانو کیتوزان

کیتوزان با وزن مولکولی پایین (۱۰۰ کیلو دالتون) و درجه استیل زدایی (DD[1]) ۸۵ درصد از شرکت سبزگستر آذین ترکان- مراغه و تری‌پلی‌فسفات (TPP[2]) با درجه تحلیلی از شرکت مرک آلمان تهیه شد. محلول نانو کیتوزان به‌روش احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2018) آماده گردید. محلول همگن کیتوزان (۰/۱ درصد وزنی) با افزودن یک گرم کیتوزان به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر از محلول اسید استیک ۰/۱ درصد وزنی آماده شد. پس از انحلال کامل، محلول کیتوزان با افزودن تدریجی محلول TPP (۰/۴ گرم در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر) همراه با هم‌زدن شدید، تهیه شد. یک محلول ابری همگن نشان-دهنده تشکیل نانوذرات کیتوزان از طریق روش ژل‌سازی به دست آمد. علاوه‌بر این، pH نانو کیتوزان با افزودن ۰/۱ KOH مولار در حدود ۶/۵ تنظیم شد. لازم به ذکر است که دُز مؤثر نانو کیتوزان براساس آزمایش اولیه با طیف وسیعی از غلظت‌ها (۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۱ $w.v^{-1}$) برای مؤثرترین دُز روی گیاهان کاملینا انتخاب شد. در نهایت، قبل از گل‌دهی به‌منظور افزایش راندمان نفوذ محلول در گیاه، محلول‌پاشی کیتوزان در زمان عدم وجود باد و باران و قبل از طلوع آفتاب که منافذ گیاه باز بود به‌گونه‌ای که گیاه کاملاً خیس شود، صورت پذیرفت.

سنتز و خصوصیات نانو کیتوزان

طیف FTIR کیتوزان و نانوذرات کیتوزان خشک‌شده برای بررسی خصوصیات ساختاری ثبت شد (شکل ۱a). ارتعاش کششی گروه عاملی-OH در هر دو نانوذرات کیتوزان و کیتوزان توسط نوار ظاهر شده در حدود ۳۵۰۰ سانتی‌متر در شکل ۱ تأیید شده است. همچنین، در طیف FTIR کیتوزان، پیکی در ناحیه ۱۰۷۴ سانتی‌متر مشاهده می‌شود که مربوط به ارتعاش حلقه پیرانوز در زنجیره اصلی (ستون فقرات) کیتوزان است. قله‌های ۱۶۳۹ و ۱۵۶۰ سانتی متر به‌ترتیب از کشش C=O به‌دلیل خمش میانی I و N-H به‌دلیل وجود گروه آمین اولیه روی کیتوزان به وجود می‌آیند. پس از فرآیند اتصال عرضی برای رسیدن به نانوذرات کیتوزان، یک پیک جدید به‌دلیل کشش ضدمتقارن P-O-P جزء TPP ظاهر می‌شود. در طیف نانوذرات، پیک‌های مشخصه کیتوزان تغییر نسبی به فرکانس‌های پایین‌تر را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده برهم‌کنش کیتوزان –TPP است. پیک مشخصه کیتوزان در الگوی XRD در حدود θ_2=۲۰ ظاهر می‌شود که ساختار کریستالی کیتوزان را نشان می‌دهد (شکل ۱b). تغییر در ساختار کریستالی کیتوزان پس از اتصال عرضی یونی با ناپدید شدن پیک مشخصه آن در دمای θ_2=۲۰ تأیید می‌شود. یک پیک وسیع در θ_2=۲۲/۱ در الگوی XRD نانوذرات کیتوزان، پیک رایج پلی ساکاریدهای آمورف است. ریخت‌شناسی سطح نانوذرات کیتوزان با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت که نشان‌دهنده تشکیل نانوذرات کروی است (شکل ۱c). میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM، شکل ۱d)، نانوذرات کیتوزان کروی تولیدشده را با اندازه قطر حدود ۲۰۰ نانومتر تأیید کرد.

آبیاری تکمیلی

آبیاری تکمیلی در دو دوره رشد حساس کاملینا شامل مرحله گل‌دهی[3] و مرحله غلاف‌دهی[4] با سیستم آبیاری قطره‌ای انجام شد. برای تأمین آب مورد نیاز گیاه در آبیاری تکمیلی، مقدار رطوبت در خاک در حالت ظرفیت مزرعه در قطعه‌های مورد نظر قبلاً تعیین گردید. از روش وزن‌سنجی برای تعیین مقادیر آبیاری با استفاده از اندازه‌گیری رطوبت خاک از عمق رشد ریشه در مرکز هر کرت استفاده شد. بدین منظور در هر بار آبیاری تکمیلی، دو روز قبل از اعمال آبیاری، نمونه‌های خاک از کرت‌های آزمایشی اخذ گردید و پس از اندازه‌گیری وزن تر، به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین گردید. سپس میزان آب آبیاری با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Katerji et al., 2008).

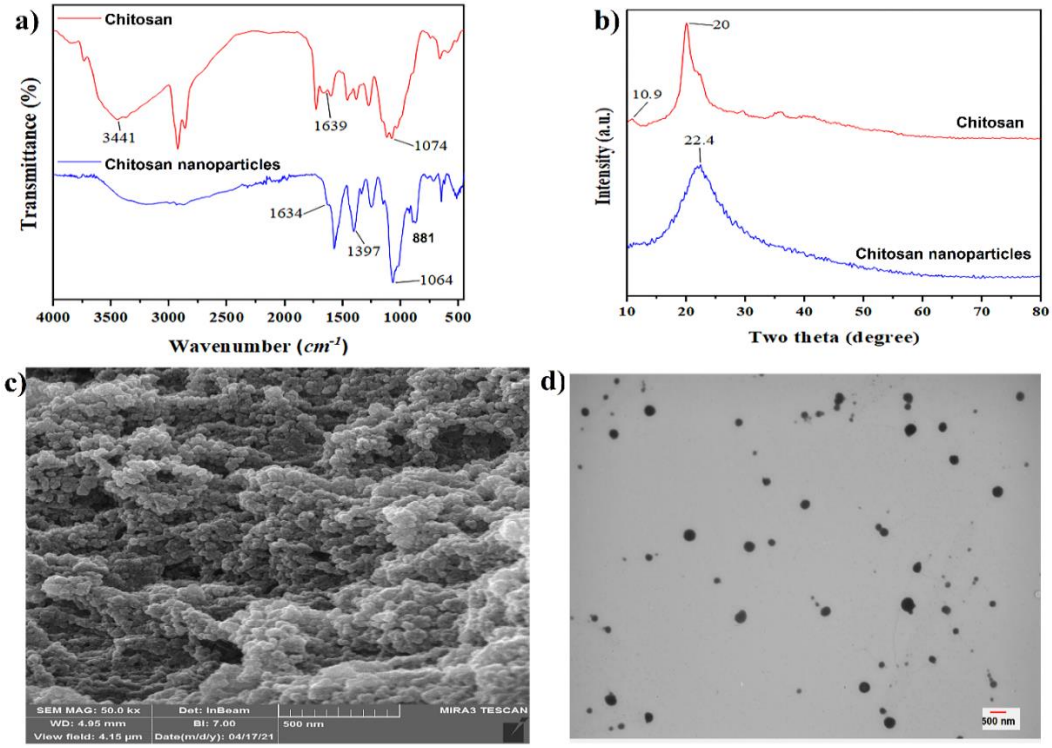
$$Ig=[(\theta fc-\theta)\times\rho\times D\times A\times 100)]/IE \quad (۱)$$

که در آن، Ig: نیاز آبیاری (متر مکعب)، θfc: میزان رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه، θ: رطوبت خاک در طول نمونه‌برداری، ρ: وزن مخصوص ظاهری خاک (کیلوگرم بر متر مکعب)، D: عمق رشد ریشه، A: مساحت کرت (متر مربع) و IE: راندمان آبیاری در نظر گرفته شده است. در مرحله گل‌دهی و مرحله تشکیل غلاف، کمبود

1- Degree of Deacetylation
2- Tripolyphosphate

3- BBCH stage 64: Full flowering (approximately 50% of flowers open)
4- BBCH stage 71: Beginning of pod development (first pods have reached their final size)

آب مورد نیاز برای رساندن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی محاسبه و به کرت‌های آزمایشی اضافه شد (Amiri-Darban et al., 2020). برای این منظور، در سال اول در تاریخ‌های ۴ خرداد و ۲۵ خردادماه و در سال دوم در تاریخ‌های ۲۶ اردیبهشت و ۲۷ خردادماه آبیاری تکمیلی انجام شد. علاوه‌بر این، برای اندازه‌گیری دبی از یک بشر با حجم مشخص استفاده گردید. مدت زمان لازم برای پُر شدن بشر به‌وسیله کورنومتر اندازه‌گیری و دبی از طریق معادله ۲ محاسبه گردید.



شکل ۱- تجزیه و تحلیل کیتوسان و نانوذرات کیتوزان؛ FT-IR (a), XRD (b) SEM (c), and TEM (d)

Fig. 1- Characterization of chitosan and chitosan nanoparticles: FT-IR (a), XRD (b), SEM (c), and TEM (d) spectra/images.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (۲)$$

که در آن، Q، V و t: به‌ترتیب دبی آب برحسب مترمکعب در ثانیه، حجم ظرف برحسب مترمکعب و مدت زمان لازم برای پُر شدن ظرف برحسب ثانیه می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد قطره چکان موجود در هر کرت و همچنین دبی آب ورودی به سطح هر کرت مشخص می‌باشد، زمان مورد نیاز برای رسیدن به حجم آبیاری مورد نظر برای هر کرت از طریق معادله ۳ محاسبه گردید.

$$\text{زمان مورد نیاز} = \frac{\text{حجم آب مورد نیاز}}{\text{دبی آب ورودی} \times \text{تعداد قطره چکان در هر کرت}} \quad (۳)$$

اندازه‌گیری شاخص کلروفیل

به‌منظور اندازه‌گیری شاخص کلروفیل قبل از برداشت و هنگامی‌که برگ‌ها کاملاً سبز بودند از دستگاه کلروفیل‌سنج (Instruments SPAD-502, Osaka, Japan) استفاده شد. در هر واحد آزمایشی، برگ‌های تازه بالغ‌شده انتخاب و ۱۰ نقطه روی برگ اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها برای هر واحد محاسبه گردید.

اندازه‌گیری کلروفیل و کاروتنوئید

کلروفیل و کاروتنوئید موجود در برگ‌های کاملینا به‌روش لیشتنتالر (Lichtenthaler, 1987) مشخص گردید. بدین منظور، ۱۰۰ میلی‌گرم وزن‌تر برگ در داخل هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد خوب ساییده گردید. سپس لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. حجم محلول فوقانی توسط استون ۸۰ درصد به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد و مقدار کلروفیل و

کاروتنوئید توسط دستگاه اسپکتروفتومتر با میزان جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۶۳/۲ و ۶۴۶/۸ تعیین و غلظت کلروفیل و کاروتنوئید مشخص گردید.

محتوای نسبی آب

جهت تعیین محتوای رطوبت نسبی برگ‌های کاملینا، قطعات برگی پس از تعیین وزن تر بین دو کاغذ صافی درون ظروف پتری محتوای آب مقطر قرار گرفتند. پتری‌ها به مدت ۲۰ ساعت در دمای چهار درجه سانتی‌گراد و در تاریکی قرار داده شدند. سپس وزن برگ‌ها که در حالت تورژسانس کامل بودند، اندازه‌گیری شدند. نمونه‌های تر برگ در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و پس از آن وزن خشک اندازه‌گیری گردید و در نهایت محتوای نسبی آب برگ‌ها با استفاده از معادله ۴ محاسبه گردید (Levitt, 1980):

$$RWC\ (\%) = \frac{FW-DW}{TW-DW} \times 100 \qquad (۴)$$

که در آن، FW، DW و TW: به‌ترتیب وزن‌تر، وزن خشک و وزن برگ متورم شده می‌باشد.

سنجش محتوای مالون‌دی‌آلدهید

جهت تعیین غلظت مالون‌دی‌آلدهید، ۰/۲ گرم از بافت تازه برگی کاملینا به همراه چهار میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار مخلوط و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد و دور ۱۲۰۰۰ سانتریفیوژ شدند. ۰/۴ میلی‌لیتر عصاره استخراج‌شده با ۱/۲ میلی‌لیتر از محلول واکنش (شامل اسید تری کلرواستیک ۰/۱ درصد و تیوباربیوتیک اسید ۰/۲ درصد) مخلوط و در دمای ۹۵ درجه در حمام آب گرم به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده و به‌منظور توقف واکنش به مدت ۳۰ دقیقه در حمام یخ قرار داده شدند. مخلوط سردشده به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۱۰۰۰۰ سانتریفیوژ گردید و سپس شدت جذب در طول موج ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری و غلظت مالون‌دی‌آلدهید برحسب نانومول بر گرم وزن تر گیاه گزارش شد (Heath & Packer, 1968).

عملکرد دانه

برداشت در سال اول در شانزدهم تیرماه و در سال دوم در بیستم تیرماه در مرحله رسیدگی کامل و زمانی که دانه‌ها به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز بودند، انجام شد. بدین‌منظور، ابتدا دو ردیف کناری و انتهایی کرت به‌عنوان اثر حاشیه‌ای حذف و سپس بوته‌های موجود از سطح یک مترمربع برداشت و پس از خرمن‌کوبی و بوجاری، دانه‌ها از کاه و کلش جدا و پس از آن عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

استخراج روغن

به‌منظور استخراج روغن موجود در بذور کاملینا، ۵۰ گرم از نمونه بذری هر تیمار به‌وسیله آسیاب به‌صورت کامل پودر شده و به آن ۲۵۰ میلی‌لیتر پترولیوم اتر به‌عنوان حلال اضافه گردید. پس از آن، نمونه‌ها به شیکر منتقل و با سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه به مدت هشت ساعت شیک شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ گردید. در ادامه، لایه رویی به‌وسیله کاغذ صافی فیلتر شده و جداسازی انجام گردید. لازم به ذکر است که به‌منظور استخراج کامل روغن مراحل ذکرشده دو الی سه بار تکرار گردید (Amani Machiani et al., 2021).

درصد و عملکرد روغن

جهت تعیین درصد روغن پس از اتمام آزمایش نمونه‌ها، از تفاضل وزن اولیه نمونه و وزن ثانویه بر وزن اولیه نمونه، درصد روغن محاسبه شد. علاوه‌بر این، جهت تعیین عملکرد روغن، عملکرد دانه در درصد روغن ضرب گردید (Mohtashami et al., 2020).

شناسایی اسیدهای چرب روغن

شناسایی اسیدهای چرب موجود در روغن کاملینا براساس آماده‌سازی نمونه‌ها به‌صورت مشتق متیل استر (Fame) صورت گرفت. برای آماده‌سازی فیم، ۰/۱ گرم از روغن کاملینا با ۰/۲ میلی‌لیتر محلول متانولیک KOH دو نرمال (۱۱/۲ گرم پتاسیم هیدروکسید در ۱۰۰ میلی‌لیتر متانول) و ۱/۵ میلی‌لیتر هگزان مخلوط شده و سپس با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه سانتیرفیوژ شدند. لایه بالایی (سطحی) هر نمونه جداسازی و جهت آنالیز ترکیبات اسید چرب مورد استفاده قرار گرفت (Rezig et al., 2012).

برای شناسایی ترکیبات اسیدهای چرب موجود در روغن کاملینا، دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 5977A ساخت کشور آمریکا متصل‌شده به طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) و ستون HP-5MS پنج درصد فنیل متیل پلی سیلوکسان، به‌طول ۳۰ متر، قطر

داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۲۵ میکرومتر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای جداسازی ترکیبات از دستگاه نام-برده‌شده با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای FID و ستون VF-5MS به‌طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۵۰ میکرومتر استفاده شد. در برنامه‌ریزی دمایی آون، ابتدا دما به مدت یک دقیقه در ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شد، سپس به-تدریج دما با سرعت چهار درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش یافت تا به دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد رسید و به مدت دو دقیقه در این دما نگه‌داری شد. هلیوم به‌عنوان گاز حامل با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده گردید. دمای محفظه تزریق و خط انتقال به‌ترتیب روی ۲۶۰ و ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. محفظه تزریق در حالت تقسیم (نسبت تقسیم ۱:۳۰) تنظیم شده بود (Amani Machiani et al., 202). در نهایت، نرم‌افزار Chemstation و مخلوط FAME Supelco 37 Component FAME Mix Bellefonte, PA, USA به‌عنوان رفرنس جهت شناسایی ترکیبات مورد استفاده قرار گرفت. کمّی کردن ترکیبات روغن با استفاده از انتگرال‌گیری و محاسبه مساحت سطح زیر پیک انجام گردید (Rezig et al., 2012).

آنالیز آماری

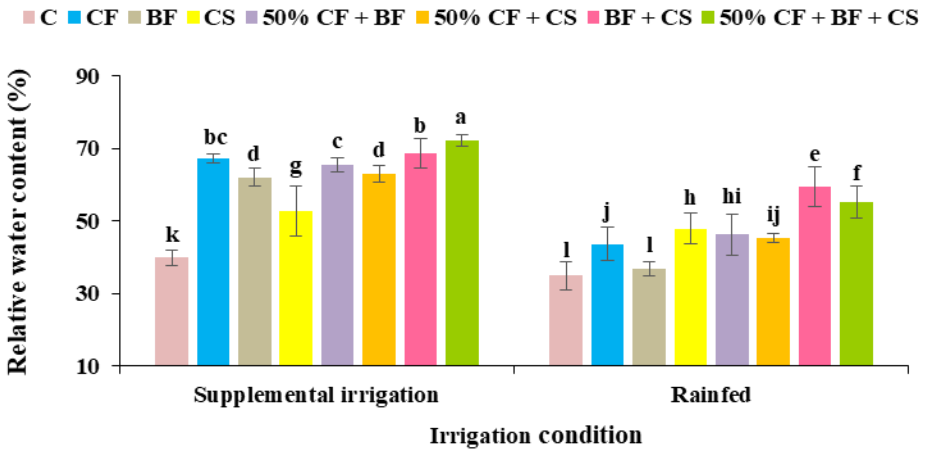
بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس مرکب داده-ها به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده با استفاده از نرم‌افزار آماری SASنسخه ۹/۳ انجام شد و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب

اثر شرایط کشت، منابع کودی و اثر متقابل شرایط آبیاری و منابع کودی بر محتوای نسبی آب معنی‌دار بود. حداکثر محتوای نسبی آب برگ (۷۲/۲۶ درصد) در آبیاری تکمیلی با کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان و کم‌ترین (۳۴/۹۴ درصد) محتوای نسبی آب در شرایط دیم بدون کاربرد کود مشاهده شد. آبیاری تکمیلی، محتوای نسبی آب را ۳۳ درصد نسبت به شرایط دیم افزایش داد. همچنین کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، محتوای نسبی آب را ۵۸/۳ و ۸۱/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. علاوه‌بر این، در شرایط آبیاری تکمیلی، تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، محتوای نسبی آب را به‌ترتیب ۷/۳، ۱۶/۴ و ۳۶/۸ درصد در مقایسه با کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان افزایش داد، درحالی‌که در شرایط دیم استفاده از همین تیمار تلفیقی، محتوای نسبی آب را به‌ترتیب ۳۶/۴، ۶۲/۲ و ۲۴/۲ درصد نسبت به کاربرد انفرادی کودها افزایش داد (شکل ۲). محتوای نسبی آب، به وضعیت میزان آب در سلول‌های گیاهی به‌ویژه در شرایط تنش اشاره دارد. محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان شاخص مهمی از وضعیت آب گیاه در نظر گرفته می‌شود که بیانگر تعادل بین آب جذب‌شده توسط گیاه و میزان تعرق آن است (Wasaya et al., 2021). کاهش محتوای نسبی آب برگ کاملینا در شرایط دیم به کاهش جذب آب توسط ریشه و همچنین افزایش تعرق نسبت داده می‌شود (Shemi et al., 2021). بر اثر خشکی، پتانسیل آب خاک کاهش می‌یابد که با کاهش پتانسیل آب خاک، گیاهان برای حفظ قدرت جذب آب و ایجاد جریان آب از خاک به ریشه‌ها باید پتانسیل آب درونی را با سازوکار تنظیم اسمزی کاهش دهند. سازوکار تنظیم اسمزی به حفظ رطوبت نسبی کمک کرده و از این طریق به بهبود رشد گیاه منجر خواهد شد (Al-Yasi et al., 2020). در طی این پدیده، غلظت برخی یون‌ها نظیر پتاسیم، سدیم و ... در واکوئل و نیز برخی متابولیت‌ها نظیر اسیدهای آمینه مثل پرولین، کربوهیدرات‌ها در سیتوسول افزایش می‌یابد و بدین ترتیب با تعادل پتانسیل اسمزی، فشار آماس سلول در سطح بالا حفظ و ادامه فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاه امکان‌پذیر خواهد شد (Liao et al., 2022). در تأیید نتایج این پژوهش، اصلانی و همکاران (Aslani et al., 2023) گزارش کردند که محتوای نسبی آب تحت شرایط تنش خشکی به‌دلیل عدم تعادل اسمزی ایجادشده در ناحیه ریشه کاهش یافت. کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، محتوای نسبی آب را در هر دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی بهبود بخشید. به نظر می‌رسد که استفاده از تیمار ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، با تجمع املاح اسمزی، پرولین، کربوهیدرات‌های غیرساختاری و تجمع یونی (پتاسیم، کلسیم و منیزیم)، تعادل اسمزی را حفظ و از این طریق به بهبود ظرفیت نگهداری آب توسط سلول‌ها،

حفظ فعالیت‌های متابولیکی طبیعی سلول‌ها، تسهیل جذب آب کمک کرده و در نتیجه باعث بهبود مقاومت گیاه به شرایط خشکی می‌شود (Khalilpour et al., 2021).



شکل ۲- محتوای نسبی آب برگ کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 2- Camelina RWC influenced by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی،BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰٪ CF + CS: ۵۰ درصد کودشیمیایی + نانوذرات کیتوزان، CS + BF: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، و ۵۰٪ CF + BF + CS: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

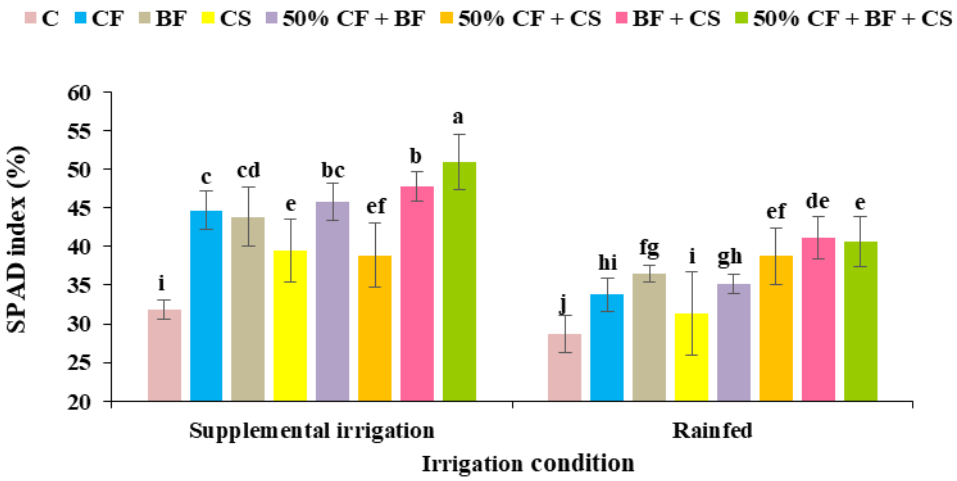
علاوه‌بر این، کودهای زیستی با تولید هورمون‌هایی مانند اسید استیک ایندول (IAA[1]) به گیاه کمک می‌کنند که آب بیشتری جذب کرده و با کاهش تعرق، میزان محتوای نسبی آب بهبود پیدا می‌کند (Azmat et al., 2022). همچنین کودهای زیستی می‌توانند از طریق تولید اگزوپلی ساکاریدها (EPS[2]) با ذرات خاک جمع شوند و ساختار خاک و همچنین جذب آب را بهبود بخشند و در نتیجه نقش مهمی در بهبود محتوای نسبی آب ایفا کنند (Mishra et al., 2020) که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد. علاوه‌بر این، نانوذرات کیتوزان می‌توانند با تنظیم هدایت روزنه‌ای و تجمع پرولین، بر روابط آبی و محتوای نسبی آب برگ اثرگذاری مثبت داشته باشد (Dolatkhah Dashtmian et al., 2023).

شاخص کلروفیل (SPAD)

شاخص اسپد تحت تأثیر شرایط کشت، منابع کودی و اثر متقابل دو عامل قرار گرفت. بیشترین شاخص کلروفیل (۵۰/۹۳) در آبیاری تکمیلی با کاربرد تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان حاصل شد و کمترین آن (۲۸/۷) به شرایط دیم بدون استفاده از کود تعلق داشت. آبیاری تکمیلی در مقایسه با کشت دیم، شاخص کلروفیل را ۲۰ درصد افزایش داد. علاوه‌بر این، کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان باعث افزایش ۵۹/۶ درصدی صفت مذکور در آبیاری تکمیلی و ۴۱/۵ درصدی در شرایط دیم نسبت به شاهد شد. لازم به ذکر است که تحت آبیاری تکمیلی، تیمار تلفیقی ذکرشده، شاخص کلروفیل برگ کاملینا را به‌ترتیب ۱۴، ۱۶/۲ و ۳۱/۱ درصد نسبت به کاربرد جداگانه تیمارهای کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان افزایش داد. درحالی‌که در شرایط دیم، میزان افزایش شاخص کلروفیل با کاربرد تیمار ترکیبی ذکرشده به‌ترتیب ۲۱/۶، ۱۲/۷ و ۳۰ درصد نسبت به کاربرد جداگانه تیمارها بود (شکل ۳). در شرایط دیم ممکن است که شاخص کلروفیل از طریق نشت الکترولیت‌ها از غشای تیلاکوئید و پراکسیداسیون لیپیدی،

1- Indole-3-acetic acid
2- Exopolysaccharides

کم‌آبی پروتوپلاسم و سطح کمتر جذب نور کاهش پیدا کند (Wei et al., 2023). گیاهانی که در معرض خشکی قرار می‌گیرند، انواع گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌کنند که باعث آسیب به بیومولکول‌هایی همچون کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، لیپیدها، اسیدهای نوکلئیک و ساختار کلوپلاست شده و در نتیجه منجر به کاهش فتوسنتز، تنفس و رشد گیاه می‌شوند (Jamshidi Zinab et al., 2023). کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان به‌طور قابل توجهی شاخص کلروفیل را در مقایسه با گیاهان تیمار نشده افزایش داد. به نظر می‌رسد که کاربرد تلفیقی این کودها با افزایش میزان پروتئین و فعالیت آنزیم روبیسکو اکتیواز، سرعت واکنش‌های چرخه کالوین را افزایش و منجر به افزایش فعالیت کربوکسیلاسیونی روبیسکو و بهبود فتوسنتز می‌شوند (Sharma et al., 2021). از طرفی، به نظر می‌رسد که استفاده از نانوذرات کیتوزان با افزایش سطوح درون‌زا سیتوکینین‌ها که سنتز و رشد کلروفیل یا در دسترس بودن ترکیبات آمینه آزادشده از کیتوزان را تحریک می‌کنند، شاخص کلروفیل را در شرایط نامساعد بهبود می‌بخشند (Silva-Santos et al., 2023). علاوه‌بر این، دسترسی کافی به مواد ضروری می‌تواند محتوای کلروفیل را به‌میزان قابل توجهی افزایش دهد (Anwar et al., 2024). بنابراین، بهبود محتوای کلروفیل کاملینا با کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان را می‌توان با افزایش در دسترس بودن عناصر غذایی که باعث افزایش فعالیت روبیسکو، سرعت فتوسنتز و شاخص‌های رشد گیاه می‌شود، توضیح داد (Hidangmayum et al., 2023).



شکل ۳- شاخص کلروفیل کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی Error! No text of specified style in document.

Fig. 3- Camelina SPAD index influenced by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰٪ CF + CS: ۵۰ درصد کودشیمیایی + نانوذرات کیتوزان، CS + BF: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، و ۵۰٪ CF + CS + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparti cles.

رنگیزه‌های فتوسنتزی

محتوای کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و کارتنوئید کاملینا فقط تحت تأثیر اثرات جداگانه شرایط کشت و منابع کودی قرار گرفتند. بالاترین محتوای کلروفیل *a* (۵/۱۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) با کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان به دست آمد، درحالی‌که کمترین میزان کلروفیل *a* (۲/۴۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به تیمار عدم مصرف کود تعلق داشت. تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، محتوای کلروفیل *a* را در مقایسه با عدم مصرف کود، ۱۱۴/۵۳ درصد افزایش داد. همچنین استفاده از تیمار تلفیقی مذکور، محتوای کلروفیل *a* را به‌ترتیب ۶۰/۱، ۴۹/۴۲ و ۷۷/۱ درصد نسبت به کاربرد جداگانه هر یک از کودها افزایش داد (جدول

۵). علاوه‌بر این، محتوای کلروفیل *a* در شرایط دیم نسبت به آبیاری تکمیلی کاهش یافت، به‌طوری‌که در شرایط دیم، کلروفیل *a* در مقایسه با آبیاری تکمیلی ۶/۷ کمتر بود (شکل ۴).

همچنین بیشترین (۳/۸۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کم‌ترین (۱/۶۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) محتوای کلروفیل *b* به‌ترتیب با کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان و عدم مصرف کود حاصل شد. کاربرد تلفیقی تیمارهای آزمایش در مقایسه با شاهد، محتوای کلروفیل *b* را ۱۳۷/۸۸ درصد افزایش داد. همچنین، کاربرد تلفیقی تیمارهای آزمایش، محتوای کلروفیل *b* را نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد گیاه و نانوذرات کیتوزان به‌ترتیب ۵۸/۲۶، ۸۳/۲۴ و ۷۰/۲۵ درصد افزایش داد (جدول ۵). علاوه‌بر این، محتوای کلروفیل *b* در شرایط دیم ۷/۳۲ درصد در مقایسه با آبیاری تکمیلی کاهش یافت (شکل ۵).

بیشترین محتوای کاروتنوئید (۱/۷۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) با کاربرد تلفیقی تیمارها به دست آمد و کمترین (۰/۷۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) آن نیز به تیمار عدم مصرف کود تعلق داشت. استفاده تلفیقی از تیمارها، محتوای کاروتنوئید را ۱۲۱/۵۱ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش داد. از طرف دیگر، کاربرد تلفیقی تیمارهای آزمایش، محتوای کاروتنوئید را نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان به‌ترتیب ۴۹/۵۷، ۳۳/۵۹ و ۲۶/۸۱ درصد افزایش داد (جدول ۳). شرایط دیم نیز محتوای کاروتنوئید کاملینا را کاهش داد؛ به‌طوری که در شرایط دیم، محتوای کاروتنوئید در مقایسه با آبیاری تکمیلی ۸/۴۶ درصد کاهش پیدا کرد (شکل ۶).

کلروفیل، جزء مهمی از رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌باشد. محتوای کلروفیل در تاج‌پوشش گیاهان ارتباط نزدیکی با فتوسنتز، میزان عناصر غذایی و بهره‌وری محصول دارد (Tashakorizadeh et al., 2022). کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط نامساعد محیطی ممکن است به‌دلیل تأثیر افزایش پراکسیداسیون لیپیدی روی غشاها در نتیجه تجمع ROS باشد که منجر به تجزیه کلروپلاست، کاهش فعالیت کلروفیل و تخریب پیش‌سازهای کلروفیل می‌شود (Bukhari et al., 2021). در این راستا، پژوهشگران اظهار داشتند که در خشکی به‌دلیل آسیب به ساختار کلروپلاست، تخریب پیش‌ساز کلروفیل و اکسیداسیون کلروفیل بر اثر افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و در نتیجه مهار بیوسنتز کلروفیل، رنگیزه‌های فتوسنتزی کاهش می‌یابند (Yang et al., 2023). بااین‌حال، محتوای کلروفیل و کاروتنوئید در کاملینا با کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان بهبود یافت. با توجه به اینکه مولکول کلروفیل از دو بخش (یک سر پورفیرین و یک هیدروکربن طویل با دنباله فیتول) تشکیل شده است. پورفیرین از چهار حلقه پیرول حاوی نیتروژن که به‌صورت حلقوی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. کامل‌کننده مولکول کلروفیل، یک یون منیزیم است که با چهار اتم نیتروژن در مرکز حلقه، تشکیل کلات می‌دهد (Mao et al., 2020). هر مولکول کلروفیل دارای چهار اتم نیتروژن می‌باشد و با توجه به همبستگی مثبت محتوای کلروفیل با میزان نیتروژن در دسترس گیاه (Ostadi et al., 2022) می‌توان بیان کرد که با کاربرد تلفیقی تیمارها و بهبود افزایش جذب مواد غذایی از جمله نیتروژن، میزان کلروفیل کاملینا افزایش پیدا کرده است. از سوی دیگر، عنصر پتاسیم، بسیاری از آنزیم‌های دخیل در فرآیند تنفس و فتوسنتز را فعال کرده و یکی از مهم‌ترین نقش‌های پتاسیم، نقش کلیدی آن در فتوسنتز می‌باشد (Munsif et al., 2022). ازاین‌رو، با افزایش مقدار پتاسیم در گیاه، احتمال تولید ATP افزایش یافته که سبب تسریع در انتقال مواد حاصل از فتوسنتز می‌گردد و به همین دلیل می‌تواند در بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی محصول مؤثر واقع شود (Nawaz et al., 2023). بنابراین، باکتری‌های محرک رشد، میزان کلروفیل و کاروتنوئید را از طریق بهبود دسترسی به مواد مغذی از جمله پتاسیم افزایش داده‌اند (Abd-Elkader et al., 2022). علاوه‌بر این، مطابق با نتایج این پژوهش، اثرات مفید نانوذرات کیتوزان در بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در تحقیقات پیشین نشان داده شده که در این راستا عطاران دووم و همکاران (Attaran Dowom et al., 2022) گزارش کردند که استفاده از نانوذرات کیتوزان، فعالیت آسکوربات پراکسیداز را افزایش داد که در نتیجه ROS را در تیلاکوئیدها از بین برد و متعاقب آن تجزیه رنگدانه‌های فتوسنتزی را کاهش و به‌تبع بهبود شاخص کلروفیل اتفاق افتاد.

مالون‌دی‌آلدهید

نتایج حاکی از آن است که اثر شرایط کشت، منابع کودی و اثر متقابل شرایط آبیاری در منابع کودی بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید

کاملینا معنی‌دار گردید. بیشترین غلظت مالون‌دی‌آلدهید (۶/۴۲ میکرو مول بر گرم وزن تر) در شرایط دیم و بدون کود به دست آمد، درحالی‌که کم‌ترین (۳/۶۳ میکرو مول بر گرم وزن تر) محتوای مالون‌دی‌آلدهید تحت آبیاری تکمیلی با تیمار ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان مشاهده شد. محتوای مالون‌دی‌آلدهید در شرایط دیم ۱۸/۹۴ درصد بیشتر از آبیاری تکمیلی بود. علاوه‌بر این، در آبیاری تکمیلی استفاده از ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، غلظت مالون‌دی‌آلدهید را ۲۸ درصد در مقایسه با بدون کود کاهش داد. همچنین در شرایط دیم، کاربرد تلفیقی باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، مالون‌دی‌آلدهید را ۳۰ درصد نسبت به شاهد کاهش داد.

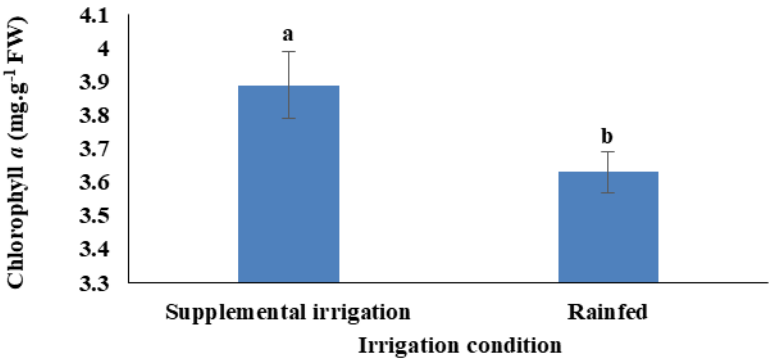
جدول ۳- اثر منابع مختلف کودی بر محتوای کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و کاروتنوئید کاملینا

Table 3- Effect of fertilizer sources on chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and carotenoid content of camelina

منابع کودی Fertilizer sources	کلروفیل *a* Chlorophyll *a* (mg g^{-1} FW)	کلروفیل *b* Chlorophyll *b* (mg g^{-1} FW)	کاروتنوئید Carotenoid (mg g^{-1} FW)
شاهد C	2.41g	1.61g	0.79f
کود شیمیایی CF	3.53de	2.42de	1.17e
باکتری‌های محرک رشد BF	3.46e	2.09f	1.31de
نانوذرات کیتوزان CS	2.92f	2.25ef	1.38cd
۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد 50% CF + BF	3.78d	3b	1.49bc
۵۰ درصد کودشیمیایی + نانوذرات کیتوزان 50% CF + CS	4.12c	2.78c	1.44bc
باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان BF + CS	4.17b	2.54d	1.57b
۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان 50% CF + BF + CS	5.17a	3.83a	1.75a

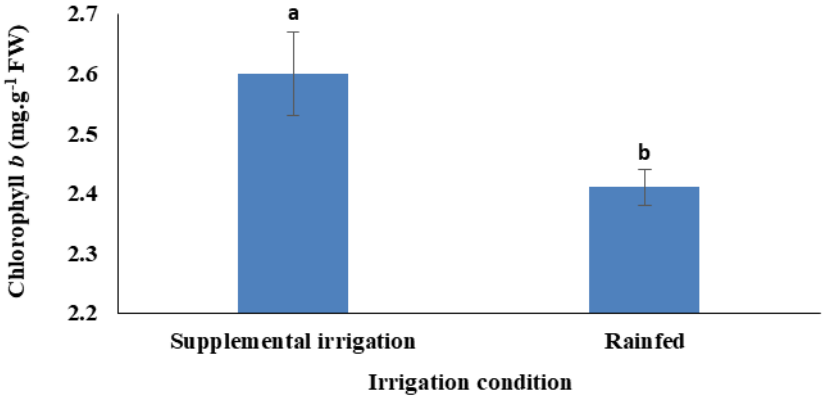
C: شاهد، CF: کود شیمیایی،BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوسان، ۵۰٪ CF + BF: ۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰٪ CF + CS: ۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، BF + CS: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان و ۵۰٪ CF + BF + CS: ۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparti cles.



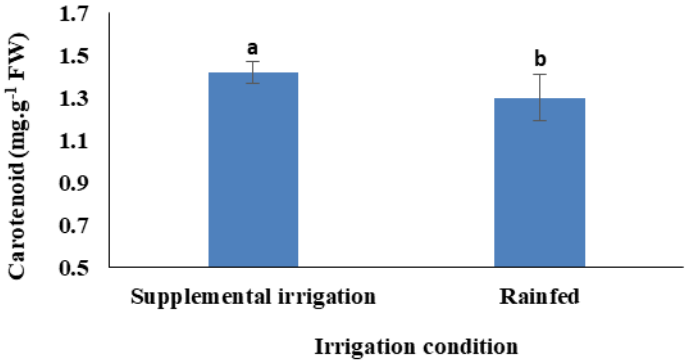
شکل ٤- محتوای کلروفیل *a* کاملینا تحت تأثیر شرایط مختلف آبیاری

Fig. 4- Chlorophyll *a* content of camelina under different irrigation conditions.



شکل ۵- محتوای کلروفیل *b* کاملینا تحت تأثیر شرایط مختلف آبیاری

Fig. 5- Chlorophyll *b* content of camelina under different irrigation conditions.



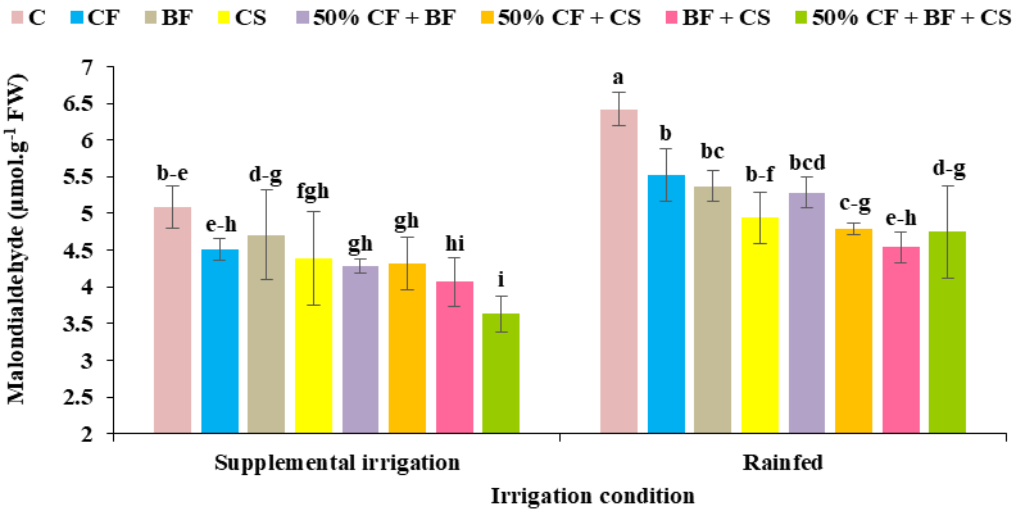
شکل ٦- محتوای کاروتنوئید کاملینا تحت تأثیر شرایط مختلف آبیاری

Fig. 6- Carotenoid content of camelina under different irrigation conditions.

لازم به ذکر است که در شرایط آبیاری تکمیلی، استفاده تلفیقی از تیمارهای کودی نسبت به کاربرد جداگانه هر یک از تیمارهای کودی (کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان)، محتوای مالون‌دی‌آلدهید را به‌ترتیب ۲۱، ۱۳ و ۱۷ درصد کاهش داد.

همچنین استفاده تلفیقی از تیمارهای کودی در شرایط دیم، مقدار مالون‌دی‌آلدهید را به‌ترتیب ۱۸، ۱۵ و ۸ درصد نسبت به کاربرد جداگانه کودها کاهش داد (شکل ۷). باوجودی‌که ROS در مراحل مختلف رشد نقش بسزایی در سازگاری با تنش‌ها و تنظیم رشد دارد، امّا به‌علت واکنش‌پذیری بالا در غلظت‌های بیش از حد مجاز، یک مولکول‌های زیان‌بار به‌حساب می‌آید. بنابراین، در این شرایط می‌تواند به‌سرعت مولکول‌های دیگر را اکسید و منجر به پراکسیداسیون لیپیدها شود (Jothimani & Arulbalachandaran, 2020). از طرفی، پراکسیداسیون لیپیدی به‌صورت آنزیمی و غیرآنزیمی (در نتیجه ROS) باعث تشکیل مالون‌دی‌آلدهید و سایر محصولات پراکسیداسیون لیپیدی در گیاهان می‌شود که یک جزء اساسی برای تحمل به تنش محسوب می‌شوند (Naveen et al., 2021). در مطالعه حاضر، بیشترین میزان مالون‌دی‌آلدهید در شرایط دیم مشاهده شد. پژوهشگران بیان کردند که میزان تجمع مالون‌دی‌آلدهید، شاخصی از میزان خسارت تنش اکسیداتیو بوده و بیانگر آسیب به غشاء پلاسمایی سلول‌های گیاهی در شرایط تنش‌های محیطی است (Qayyum et al., 2021). ازاین‌رو، افزایش مالون‌دی‌آلدهید را می‌توان به افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدی غشاها نسبت داد (Sima et al., 2023). همسو با نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، رضائیان و همکاران (Rezayian et al., 2020) با ارزیابی اثرات خشکی بر سویا (*Glycine max* (L.) Merr) اظهار داشتند که افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدهید نشان‌دهنده تنش اکسیداتیو ناشی از خشکسالی در سویا بود. در مقابل، کاربرد تلفیقی تیمارها، محتوای مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد. نانوذرات کیتوزان

می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده و نقش مهمی در پاک‌سازی ROS و کاهش میزان آسیب غشای پلاسمایی داشته باشد (Dolatkhah Dashtmian et al., 2023). مولفورک و همکاران (Moolphuerk et al., 2022) گزارش کردند که استفاده از کیتوزان با حذف آسیب ROS و بهبود وضعیت دفاعی گیاه در شرایط خشکسالی باعث کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید در برنج (*Oryza sativa* L.) شد. علاوه‌بر این، کاربرد باکتری‌های محرک رشد نیز می‌توانند پایداری غشای سلولی را افزایش و محتوای مالون‌دی‌آلدهید را در تنش خشکی با افزایش سازوکار محافظتی در سلول‌های گیاهی کاهش دهند (Azmat et al., 2022). در این راستا، بیگم و همکاران (Begum et al., 2022)، کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید با استفاده از باکتری‌های محرک رشد را با کاهش اثرات مضر تنش خشکی به‌وسیله بهبود جذب آب و مواد غذایی توسط این باکتری‌ها توضیح دادند.



شکل ۷- محتوای مالون‌دی‌آلدهید کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 7- Camelina malondialdehyde influenced by irrigation conditions and fertilizer sources.

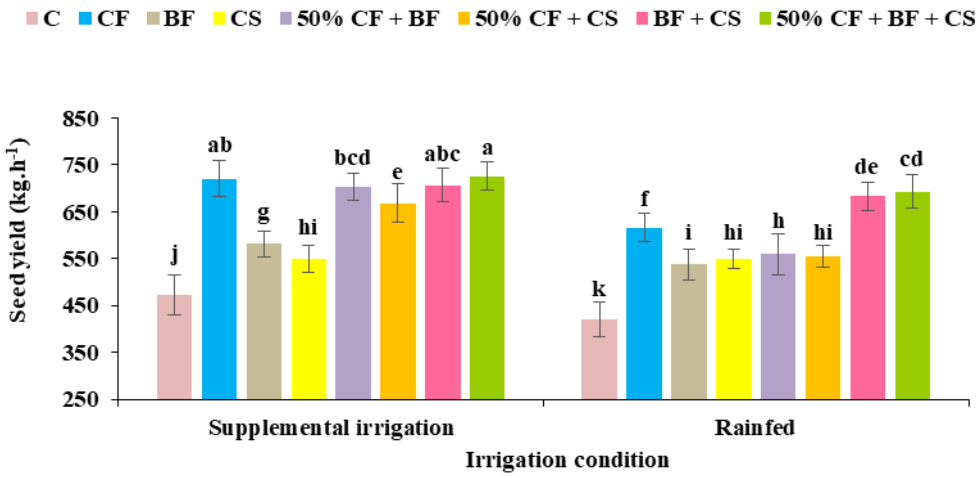
C: شاهد، CF: کود شیمیایی،BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰٪ CF + CS: ۵۰ درصد کودشیمیایی + نانوذرات کیتوزان، CS + BF: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، و ۵۰٪ CF + CS + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

عملکرد دانه

عملکرد دانه کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع کودی و اثر متقابل دو عامل قرار گرفت. بیشترین عملکرد دانه (۷۲۵/۵۴ کیلوگرم در هکتار) به تیمار آبیاری تکمیلی و با کاربرد ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان تعلق داشت. از سوی دیگر، کمترین عملکرد دانه (۳۸۷/۵ کیلوگرم در هکتار) در شرایط دیم بدون کاربرد کود مشاهده شد. عملکرد دانه کاملینا در تیمار آبیاری تکمیلی ۱۱/۹ درصد بیشتر از شرایط دیم بود. تیمار ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی، عملکرد دانه را نسبت به شاهد به‌میزان ۵۳/۷۶ و ۷۸/۹۵ درصد افزایش داد. علاوه‌بر این، تیمار تلفیقی مذکور توانست عملکرد دانه را در شرایط آبیاری تکمیلی به‌میزان ۳۲/۲۲، ۲۴/۷۹ و ۰/۷۵ درصد و در کشت دیم به‌میزان ۲۶/۱۱، ۱۵/۲۶ و ۱۲/۵۶ درصد نسبت به کاربرد انفرادی کودشیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان افزایش دهد. جالب اینکه استفاده از کود شیمیایی در شرایط آبیاری تکمیلی توانست عملکرد دانه کاملینا را ۲۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد، درحالی‌که در شرایط دیم عملکرد دانه ۱۵ درصد با کاربرد کود شیمیایی افزایش یافت. در کشت دیم، کاربرد تیمار باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان شرایط بهتری را در مقایسه با کود شیمیایی کامل برای رشد و بهبود عملکرد کاملینا

فراهم کرد و توانست عملکرد دانه کاملینا را به‌میزان ۳۵ درصد نسبت به شاهد و ۱۵ درصد نسبت به تیمار کود شیمیایی بهبود بخشد (شکل ۸). به‌طورکلی، عملکرد دانه کاملینا در شرایط دیم نسبت به آبیاری تکمیلی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. تنش خشکی در گیاه با کاهش آب برگ، بسته شدن روزنه‌ها و اُفت فتوسنتز از یک طرف و متأثر کردن فعالیت‌های آنزیمی و فرآیندهای مربوطه از سوی دیگر، موجب افت عملکرد دانه شده است (Secchi et al., 2023). همچنین تخریب رنگدانه‌های کلروفیل و کاهش سنتز آن‌ها، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش ورود CO_2 و اختلال در سرعت فتوسنتز از جمله دلایل احتمالی کاهش عملکرد دانه کاملینا (*Camelina sativa* L.) در شرایط دیم می‌باشد (Mulugeta et al., 2023). مواجه شدن گیاه با تنش رطوبتی در طول دوره گل‌دهی و یا حتی قبل از گل‌دهی به‌دلیل عرضه کمتر مواد فتوسنتزی منجر به ریزش گل و خورجین‌های در حال رشد می‌گردد که بر کاهش تعداد دانه‌ها در غلاف و در نتیجه کاهش عملکرد دانه مؤثر است (Shah et al., 2023). از طرف دیگر، با تداوم تنش خشکی، چرخه زندگی گیاه کوتاه‌تر شده و گیاه فرصت کافی برای پُر شدن غلاف‌ها و تولید کافی مواد پرورده نخواهد داشت که ضمن تأثیر بر وزن دانه‌ها می‌تواند باعث کاهش عملکرد دانه گردد (Amiri-Darban et al., 2020). علاوه‌بر این، در شرایط کاهش آب در دسترس، حفظ و تعادل عناصر غذایی حیاتی است، زیرا این عناصر در کاهش تلفات آب از گیاهان ضروری هستند (Ostadi et al., 2022). در این راستا، دسترسی کافی گیاه به عناصر غذایی از جمله پتاسیم باعث افزایش تحمل گیاه در شرایط نامطلوب محیطی می‌شود (Imtiaz et al., 2023). کودهای زیستی در این شرایط می‌توانند رشد گیاه را با حل کردن پتاسیم و فسفر، تولید سیدروفورها (برای جذب آهن) و تثبیت بیولوژیک نیتروژن بهبود بخشند (Khalilpour et al., 2021). علاوه‌بر این، کودهای زیستی می‌توانند با تنظیم جریان آب از طریق تغییر معماری ریشه، به رشد گیاهان در شرایط نامساعد دیم کمک کنند (Chieb & Gachomo, 2023). لازم به ذکر است که تولید گونه‌های اکسیژن فعال طی تنش‌های محیطی افزایش می‌یابد، امّا باکتری‌های محرک رشد می‌توانند تولید چنین گونه‌هایی را با فعال‌سازی مسیرهای سیگنالینگ مختلف از جمله تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی که گونه‌های اکسیژن فعال تولیدشده را از بین می‌برد، کاهش دهند (Bouremani et al., 2023). از طرفی، افزایش عملکرد با تیمار کودهای شیمیایی به‌دلیل اثرگذاری بر فعل و انفعالات بیوشیمیایی، فتوسنتز، افزایش طول دوره رویش و تجمع ماده خشک اندام‌های هوایی (بیولوژیک) و عملکرد دانه بدیهی است (Shah et al., 2023).



شکل ۸- عملکرد دانه کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 8- Camelina seed yield affected by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی،BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰٪ CF + CS: ۵۰ درصد کودشیمیایی + نانوذرات کیتوزان، CS + BF: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، و ۵۰٪ CF + BF + CS: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

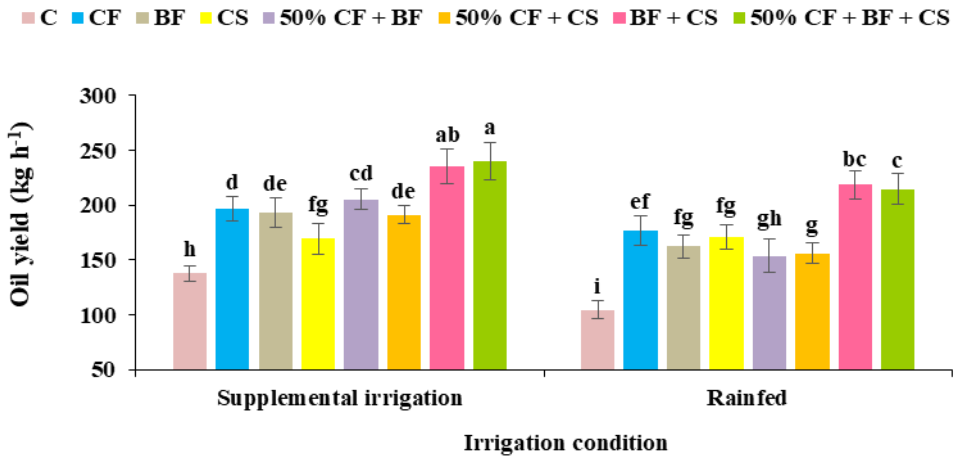
C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparti cles.

علاوه‌بر این، ممکن است که نانوذرات کیتوزان با کاهش تعرق و حفظ محتوای نسبی آب، تحمل به کم‌آبی را در گیاه افزایش دهد (Shehzad et al., 2020). به نظر می‌رسد که نانوذرات کیتوزان عملکرد را با افزایش جذب آب و عناصر ضروری و همچنین کاهش تجمع رادیکال‌های اکسیژن را با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی بهبود می‌بخشد (Ali et al., 2021). همسو با نتایج این تحقیق، پژوهشگران دریافتند که استفاده از کیتوزان، عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus* L.) را به‌طور قابل توجهی افزایش داد (Monfared et al., 2020).

عملکرد روغن

عملکرد روغن کاملینا تحت تأثیر شرایط کشت، منابع کودی و اثر متقابل شرایط کشت با منابع کودی قرار گرفت. حداکثر عملکرد روغن (۲۳۹/۸۹ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری تکمیلی با کاربرد ۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان حاصل شد. کمترین (۹۶/۲۱ کیلوگرم در هکتار) عملکرد روغن کاملینا نیز مربوط به تیمار بدون کود در شرایط دیم بود. همچنین عملکرد روغن کاملینا تحت آبیاری تکمیلی ۱۶/۲ درصد بیشتر از شرایط دیم بود. علاوه‌بر این، تیمار باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان در شرایط دیم، عملکرد روغن را در مقایسه با تیمار بدون کود ۱۰۹/۳ درصد افزایش داد. همین تیمار تلفیقی مذکور، عملکرد روغن را به‌میزان ۲۳/۷، ۳۴/۴ و ۲۷/۶ درصد نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان در کشت دیم افزایش داد. همچنین در شرایط آبیاری تکمیلی، تیمار ۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، عملکرد روغن کاملینا را ۷۳/۹ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. این تیمار، عملکرد روغن را به‌ترتیب ۲۲، ۲۴/۳ و ۴۱/۶ درصد نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات کیتوزان بهبود بخشید. (شکل ۹). به‌طورکلی عملکرد روغن کاملینا در شرایط دیم در مقایسه با آبیاری تکمیلی کاهش یافت. کاهش روغن تولیدی در شرایط نامساعد محیطی ممکن است به‌دلیل اکسیداسیون برخی از اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه و کاهش تبدیل کربوهیدرات‌ها به روغن در شرایط تنش به‌دلیل کاهش فعالیت آنزیم‌های بیوسنتز اسیدهای چرب مانند قبیل استیل کوآ کربوکسیلاز، ۳-کتوسیل ردوکتاز و ... باشد (Ebrahimian et al., 2019). همچنین به‌نظر می‌رسد که تنش خشکی به‌ویژه در هنگام رسیدگی دانه به‌دلیل تسریع در مرحله رسیدگی، درصد روغن را کاهش می‌دهد. زیرا هر اندازه که طول دوره پُر شدن دانه کوتاه‌تر باشد، فرصت کافی برای سنتز روغن از پروتئین‌های ذخیره‌شده وجود ندارد و همین عامل می‌تواند درصد روغن را کاهش دهد (Amani Machiani et al., 2021). همچنین ممکن است که در شرایط کشت دیم، بهره‌وری روغن به‌دلیل تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش جذب عناصر غذایی کاهش یابد (Secchi et al., 2023). اقدسی و همکاران (Aghdasi et al., 2021) دریافتند که محتوای روغن کاملینا به‌ترتیب ۸ و ۱۲ درصد در پاسخ به کمبود آب طی مراحل گل‌دهی و تشکیل غلاف کاهش یافت. در مقابل، استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه + نانوذرات کیتوزان باعث افزایش درصد و عملکرد روغن کاملینا شد. عملکرد روغن به‌طور مستقیم به عملکرد دانه و روغن تولیدشده توسط گیاه بستگی دارد. بنابراین، هر عاملی که تأثیر مثبتی بر عوامل ذکرشده داشته باشد باعث افزایش عملکرد روغن نیز می‌شود (Farahani et al., 2022). ازاین‌رو، افزایش عملکرد روغن با کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه + نانوذرات کیتوزان به دسترسی بهتر به مواد مغذی و افزایش عملکرد دانه و محتوای روغن نسبت داده می‌شود (Nasrollahzadeh et al., 2023). همچنین نتایج نشان داد که کاربرد جداگانه کود شیمیایی بر میزان روغن کاملینا تأثیر منفی داشته است. کاهش محتوای روغن با استفاده از کود شیمیایی را می‌توان با این واقعیت توضیح داد که گیاه برای رسیدن به حداکثر درصد روغن و در شرایط محیطی مختلف به یک حد مطلوب از نیتروژن نیاز دارد و هرگاه مقدار نیتروژن خارج از این محدوده باشد، درصد روغن با کاهش مواجه خواهد شد (Jankowski et al., 2019). بنابراین، ممکن است با کابرد کود شیمیایی کامل، تولید بالقوه مواد هیدروکربنه کاهش یافته و نسبت بیشتری از مواد فتوسنتزی به تشکیل پروتئین اختصاص پیدا کرده و منجر به کاهش درصد روغن کاملینا شده باشد. علاوه‌بر این، تولید روغن در گیاهان دانه روغنی مانند کاملینا تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار دارد (Zhang et al., 2021) ازاین‌رو، گیاه باید دسترسی کافی به عناصر را داشته باشد تا بتواند سطح قابل قبولی از روغن تولید کند. در این رابطه، امیری‌دربان و همکاران (Amiri-Darban et al., 2020) و فراهانی و همکاران

(Farahani et al., 2022) مشاهده کردند که وقتی از پتاسیم و گوگرد در طول فصل رشد استفاده شد، محتوای روغن و عملکرد گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.) و کلزا (*Brassica napus* L.) افزایش یافت. بنابراین، به نظر می‌رسد که استفاده از کودهای زیستی حاوی باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد و باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم و فسفر می‌تواند با تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، نقش مهمی در بهبود محتوای روغن و عملکرد روغن داشته باشد (Farhat et al., 2023). علاوه‌بر این، استفاده از نانوذرات کیتوزان با کنترل مسیرهای هدررفت آب و افزایش سطح ریشه، به افزایش فعالیت بیولوژیک سلول کمک کرده و در نتیجه در بهبود درصد و عملکرد روغن مؤثر بوده است (Shehzad et al., 2020).



شکل ۹- عملکرد روغن کاملینا تحت تأثیر شرایط آبیاری و منابع مختلف کودی

Fig. 9- Camelina oil yield affected by irrigation conditions and fertilizer sources.

C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰٪ CF + CS: ۵۰ درصد کودشیمیایی + نانوذرات کیتوزان، BF + CS: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، و ۵۰٪ CF + BF + CS: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

ترکیبات روغن

ترکیبات اصلی روغن کاملینا شامل اسیدهای چرب اشباع شده پالمتیک (۶/۸۵–۳/۷۳ درصد)، اسید استئاریک (۴/۳۴–۲/۳۳ درصد)، و همچنین اسیدهای چرب غیراشباع اولئیک (۱۶/۴۳–۱۴/۴۶ درصد)، لینولئیک (۲۵/۱۴–۱۹/۱۹ درصد)، لینوئک (۳۶/۷۹–۳۱/۹۲ درصد) و ایکوزنوئیک اسید (۱۱/۴۴–۷/۸۱ درصد) بود. بیشترین میزان اسیدهای پالمیتیک و استئاریک در آبیاری تکمیلی با مصرف کود شیمیایی به دست آمد. امّا بیشترین محتوای اسیدهای اولئیک، لینولئیک و اروسیک اسید با کاربرد تیمار تلفیقی باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان تحت آبیاری تکمیلی مشاهده شد. علاوه‌بر این، حداکثر محتوای اسیدهای لینولنیک و ایکوزنوئیک با کاربرد تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کودهای شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان در آبیاری تکمیلی حاصل شد (جدول ۴). کیفیت روغن دانه‌های روغنی به‌میزان اسیدهای چرب تولیدشده و همچنین نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع بستگی دارد. افزایش محتوای اسیدهای چرب غیراشباع در مقایسه با اسیدهای چرب اشباع، کیفیت روغن استخراج‌شده در گیاهان دانه روغنی را بهبود می‌بخشد (Ghaffari et al., 2023). به‌طورکلی محتوای اسیدهای چرب غیراشباع در شرایط دیم از یک‌سو به‌دلیل کاهش غلظت روغن دانه و کاهش اندازه بذرها و از سوی دیگر به‌دلیل کاهش مقدار کربوهیدرات‌های قابل دسترس برای ارسال به اندام‌های ذخیره‌کننده کاهش پیدا کرد (Li *et al.*, 2022). امانی و همکاران (Amani Machiani et al., 2021) اظهار داشتند که کیفیت روغن تولیدی سویا (*Glycine max* (L.) Merr) در شرایط تنش خشکی به‌دلیل

کاهش فعالیت تعدادی از آنزیم‌های سنتزکننده چربی نظیر لیپاز با کاهش مواجه شد. علاوه‌بر این، فعالیت آنزیم اولئویل Δ-12 دساتوراز، یکی از آنزیم‌های اصلی در بیوسنتز اسیدهای چرب، در شرایط تنش آب کاهش می‌یابد که منجر به کاهش محتوای اسیدهای چرب، به‌ویژه اسیدهای چرب غیراشباع می‌شود (Li et al., 2022). مطابق یافته‌های حاصل از این پژوهش، امیری‌دربان و همکاران (Amiri-Darban et al., 2020) بیان کردند که کمبود آب باعث کاهش اولئیک، لینولئیک و لینولنیک در کامالینا (*Camelina sativa* L.) گردید. در پژوهش دیگری، محققان با ارزیابی اثرات خشکی بر کیفیت روغن کلزا (*Brassica napus* L.) نتیجه گرفتند که تنش خشکی، اسیدهای چرب غیراشباع لینولئیک و لینولنیک را کاهش، امّا باعث افزایش اسیدهای چرب اشباع گردید که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد (Mabudi Bilasvar et al., 2022). در مقابل، نتایج نشان داد که آبیاری تکمیلی باعث افزایش اسیدهای چرب غیراشباع همچون اسید لینولئیک، اسید لینولنیک و اسید اولئیک شد و در نتیجه باعث بهبود کیفیت روغن استخراج‌شده گردید. در تصدیق نتایج حاصل‌شده، پاولیستا و همکاران (Pavlista et al., 2016) نشان دادند که محتوای اسیدهای چرب کاملینا با آبیاری در طول فصل تغییر پیدا کرد، محتوای اسید لینولنیک با افزایش مقادیر آبیاری از ۲۳ به ۳۵ درصد افزایش یافت. علاوه‌بر این، کاربرد تلفیقی باکتری‌های محرک رشد گیاه + نانوذرات کیتوزان، کیفیت روغن کاملینا را با افزایش اسیدهای چرب غیراشباع بهبود بخشید. در شرایط در دسترس بودن مواد مغذی، رشد گیاه و سرعت فتوسنتز افزایش یافته که منجر به تولید منابع کربوهیدرات، ترکیبات پیش‌ساز اسیدهای چرب (لیپیدها) و ترکیبات رابط (از طریق تولید بیشتر ATP و NADPH) برای تبدیل لیپیدها به اسیدهای چرب می‌شود (Nasrollahzadeh et al., 2023). امانی و همکاران (Amani Machiani et al., 2021)، بهبود ترکیبات روغن سویا (*Glycine max* (L.) Merr) با استفاده از کودهای زیستی را گزارش کردند و اظهار داشتند که در دسترس قرار دادن عناصر غذایی ماکرو و میکرو با فعال کردن کوفاکتورهای مورد نیاز منجر به افزایش آنزیم‌های دخیل در فرآیند سنتز اسیدهای چرب شده و از این طریق باعث بهبود کیفیت روغن تولیدی می‌گردد. در مطالعه دیگری، نصرالله زاده و همکاران (Nasrollahzadeh et al., 2023) به این نتیجه رسیدند که کاربرد کودهای زیستی در مقایسه با کودهای شیمیایی می‌تواند اثرات منفی تنش خشکی را کاهش و با افزایش میزان اسیدهای چرب غیراشباع، کیفیت اسیدهای چرب را بهبود دهد. همچنین رضایی چیانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh et al., 2020) گزارش کردند که حداکثر مقدار آلفا لینولنیک اسید (C18:3)با کاربرد باکتری‌های محرک رشد به دست آمد، درحالی‌که محتوای اروسیک اسید با استفاده از باکتری‌های محرک رشد به‌طور قابل توجهی کاهش یافت.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش کم‌آبی در شرایط دیم، با کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ موجب تشدید تنش اکسیداتیو و افزایش تجمع مالون‌دی‌آلدئید در گیاه کاملینا شد. این اختلالات فیزیولوژیک، به‌طور مستقیم فرآیند پُر شدن دانه را محدود کرده و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه، عملکرد روغن و اُفت کیفیت روغن گردید؛ به‌گونه‌ای که نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع کاهش یافت. این نتایج بیانگر وابستگی تنگاتنگ کمیت و کیفیت روغن کاملینا به وضعیت فیزیولوژیک گیاه تحت شرایط کم‌آبی است. در مقابل، اعمال آبیاری تکمیلی در مراحل حساس رشد، به‌ویژه در ترکیب با مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی توانست به‌طور مؤثری اثرات منفی تنش خشکی را تعدیل کند. کاربرد هم‌زمان کودهای زیستی و نانوذرات کیتوزان، به‌خصوص در ترکیب با مصرف کاهش‌یافته کود شیمیایی، با بهبود جذب آب و عناصر غذایی، افزایش ظرفیت فتوسنتزی و تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی منجر به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو گردید. این بهبودهای فیزیولوژیک، شرایط مناسب‌تری برای سنتز، انتقال و تجمع مواد فتوسنتزی در دانه فراهم کرده و در نتیجه، افزایش معنی‌دار عملکرد دانه، عملکرد روغن و ارتقای کیفیت روغن کاملینا، به‌ویژه از طریق افزایش سهم اسیدهای چرب غیراشباع حاصل گردید. به‌طوری که، حداکثر محتوی اسیدهای لینولنیک، لینولئیک، ایکوزنوئیک و اولئیک در آبیاری تکمیلی با کاربرد تلفیقی تیمارهای کودی به دست آمد.

جدول ٤- اسیدهای چرب روغن دانه کاملینا تحت تأثیر سطوح آبیاری و منابع مختلف کودی (میانگین دو سال)

Table 4- Camelina seed fatty acids affected by irrigation levels and different fertilizer sources (two-years average)

شرایط آبیاری Irrigation conditions	منابع کودی Fertilizer sources	پالمیتیک اسید Palmic acid	استناریک اسید Stearic acid	اولئیک اسید Oleic acid	لینولئیک اسید Linoleic acid	لینولنیک اسید Linolenic acid	ایکوزانوئیک اسید Eicosanoic acid	اکوسنوئیک اسید Eicosenoic acid	ایکوزادینوئیک اسید Eicosadinoic acid	اروسیک اسید Erucic acid	جمع کل Total
آبیاری تکمیلی Supplemental irrigation	شاهد C	5.85	3.7	15.38	22.38	35.2	1.59	7.81	1.24	3.19	96.34
	کودشیمیایی CF	6.85	4.34	15.82	22.55	34.08	1.85	8.13	1.34	2.53	97.49
	باکتری‌های محرک رشد BF	6.22	3.28	15.79	23.05	34.1	1.51	8.86	1.11	2.31	96.23
	نانوذرات کیتوزان CS	6.2	3.54	14.54	20.28	33.12	1.96	11.04	2.18	3.07	95.93
	۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد 50% CF + BF	5.71	3.45	16.12	19.95	35.28	1.52	11.17	1.37	2.38	96.95
	۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان 50% CF + CS	6.1	3.34	15.75	21.2	35.08	1.5	10.43	1.09	2.36	96.85
	باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان BF + CS	3.73	2.52	16.43	25.15	34.65	1.99	10.05	1.16	3.23	98.91
	۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان 50% CF + BF + CS	4.08	2.33	15.45	22.28	36.79	1.7	11.44	2.45	2.68	99.2
دیم Rainfed	شاهد C	6.11	4.39	15.24	20.8	33.88	1.68	8.16	1.33	2.36	93.95
	کودشیمیایی CF	6.45	4.23	15.42	19.19	31.92	1.56	8.63	1.12	2.4	91.74
	باکتری‌های محرک رشد BF	6.3	3.39	15.6	22.60	35.11	1.56	9.52	1.65	2.45	98.18
	نانوذرات کیتوزان CS	6.16	3.42	14.95	20.56	33.44	1.71	9.06	1.34	2.38	93.02
	۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد 50% CF + BF	5.79	3.47	15.41	22.06	33.71	1.64	10.4	1.21	2.36	96.05
	۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان 50% CF + CS	6.51	3.46	15.57	21.32	32.06	1.64	9.46	1.2	2.36	96.26
	باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان BF + CS	5.89	3.34	14.46	22.5	35.36	1.32	11.2	1.94	2.33	94.73
	۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان 50% CF + BF + CS	6.03	3.33	15.18	20.7	34.17	1.57	11.02	1.11	2.35	95.46

C: شاهد، CF: کود شیمیایی، BF: باکتری‌های محرک رشد، CS: نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF: ۵۰ درصد کود شیمیایی + باکتری‌های محرک رشد، ۵۰٪ CF + CS: ۵۰ درصد کود شیمیایی + نانوذرات کیتوزان، و CS + BF: باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان، ۵۰٪ CF + BF + CS: ۵۰ درصد کودشیمیایی + باکتری‌های محرک رشد + نانوذرات کیتوزان

C: control, CF: chemical fertilizer, BF: growth promoting bacteria, CS: chitosan nanoparticles, 50% CF + BF: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria, 50% CF + CS: 50% chemical fertilizer + chitosan nanoparticles, BF + CS: growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles, 50% CF + BF + CS: 50% chemical fertilizer + growth promoting bacteria + chitosan nanoparticles.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش پایدار عملکـرد و کیفیت روغن کاملینا در شرایط کم‌آبی، بیش از آنکه به مصرف بـالای نهاده‌های شیمیایی وابسته باشد، به حفظ تعادل فیزیولوژیـک گیـاه از طریق مدیریت هوشمند آب و تغذیه متکی است. ازاین‌رو، بـه‌کارگیری آبیاری تکمیلی هدفمند در مراحل گل‌دهی و پُر شدن دانـه همـراه بـا راهبرد تغذیه‌ای تلفیقی مبتنی بر کودهای زیستی و نانوذرات کیتوزان، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی کارآمد، کم‌هزینـه و سـازگار بـا محیط‌زیست برای افزایش بهره‌وری آب، کاهش مصرف کود شیمیایی و بهبود هم‌زمان کمیت و کیفیت روغن کاملینـا در منـاطق خشـک و نیمه‌خشک توصیه شود. همچنین با توجه به نقش کلیدی این تیمارها در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک و ترکیب اسـیدهای چـرب، توسـعه این راهبرد در مقیاس زراعی و بررسی پاسـخ ارقـام مختلـف کاملینـا، اثرات بلندمدت بر سلامت خاک و پایداری میکروبـی، و سـازوکارهای مولکولی مرتبط با سنتز روغن، می‌تواند به تدوین توصیه‌های دقیـق‌تر و قابل تعمیم برای سامانه‌های تولید پایدار کاملینا کمک کند.

References

1. Abd-Elkader, D. Y., Mohamed, A. A., Feleafel, M. N., Al-Huqail, A. A., Salem, M. Z., Ali, H. M., & Hassan, H. S. (2022). Photosynthetic pigments and biochemical response of zucchini (*Cucurbita pepo* L.) to plant-derived extracts, microbial, and potassium silicate as biostimulants under greenhouse conditions. *Frontiers in Plant Science, 13*, 879545. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.879545.
2. Afshari, M., Pazoki, A., & Sadeghipour, O. (2021). Foliar-applied silicon and its nanoparticles stimulate physio-chemical changes to improve growth, yield and active constituents of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil under different irrigation regimes. *Silicon, 13,* 4177–4188. https://doi.org/10.1007/s12633-021-01101-8.
3. Aghdasi, S., AghaAlikhani, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Kahrizi, D. (2021). Exogenously used boron and 24-epibrassinolide improved oil quality and mitigate late-season water deficit stress in camelina. *Industrial Crops and Products, 171*, 113885. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113885.
4. Ali, E., El-Shehawi, A. M., Ibrahim, O., Abdul-Hafeez, E., Moussa, M., & Hassan, F. (2021). A vital role of chitosan nanoparticles in improvisation the drought stress tolerance in *Catharanthus roseus* (L.) through biochemical and gene expression modulation. *Plant Physiology and Biochemistry, 161*, 166-175. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.008.
5. Alkatb, S. H. A. (2022). Improvement of irrigation water efficiency and productivity using supplementary irrigation: A review. *Journal of Water Resources and Geoscience, 1*, 53-69. https://jwrg.gov.iq/index.php/jwrg/article/view/20.
6. Al-Yasi, H., Attia, H., Alamer, K., Hassan, F., Ali, E., Elshazly, S., Siddique, K. H., & Hessini, K. (2020). Impact of drought on growth, photosynthesis, osmotic adjustment ,and cell wall elasticity in Damask rose. *Plant Physiology and Biochemistry, 150*, 133-139. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.038.
7. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M. R., Janmohammadi, M., & Maggi, F. (2021). Funneliformis mosseae application improves the oil quantity and quality and eco-physiological characteristics of soybean (*Glycine max* L.) under water stress conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21*, 3076-3090. https://doi.org/10.22034/saps.2023.55304.2993.
8. Amiri-Darban, N., Nourmohammadi, G., Rad, A. H. S., Mirhadi, S. M. J., & Heravan, I. M. (2020). Potassium sulfate and ammonium sulfate affect quality and quantity of camelina oil grown with different irrigation regimes. *Industrial Crops and Products, 148*, 112308. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112308.
9. Anwar, T., Qureshi, H., Gull, S., Siddiqi, E. H., Chaudhary, T., & Ali, H. M. (2024). Enhancing *Zea mays* growth and drought resilience by synergistic application of Rhizobacteria-Loaded Biochar (RBC) and externally applied Gibberellic Acid (GA). *Environmental Technology & Innovation*, *33*(9), 103517. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103517.
10. Arshad, M., Mohanty, A. K., Acker, R. V., Riddle, R., Todd, J., Khalilf, H., & Misra, M. (2022). Valorization of

camelina oil to biobased materials and biofuels for new industrial uses: A review. *RSC Advances*, *12*, 27230–27245. https://doi.org/ 10.1039/d2ra03253h.

11. Aslani, Z., Hassani, A., Mandoulakani, B. A., Barin, M., & Maleki, R. (2023). Effect of drought stress and inoculation treatments on nutrient uptake, essential oil and expression of genes related to monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*). *Scientia Horticulturae*, *309*, 111610. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111610.
12. Attaran Dowom, S., Karimian, Z., Mostafaei Dehnavi, M., & Samiei, L. (2022). Chitosan nanoparticles improve physiological and biochemical responses of *Salvia abrotanoides* (Kar.) under drought stress. *BMC Plant Biology*, *22*(1), 364. https://doi.org/10.1186/s12870-022-03689-4.
13. Azmat, A., Tanveer, Y., Yasmin, H., Hassan, M. N., Shahzad, A., Reddy, M., & Ahmad, A. (2022). Coactive role of zinc oxide nanoparticles and plant growth promoting rhizobacteria for mitigation of synchronized effects of heat and drought stress in wheat plants. *Chemosphere*, *297*, 133982. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133982.
14. Balusamy, S. R., Rahimi, S., Sukweenadhi, J., Sunderraj, S., Shanmugam, R., Thangavelu, L., Mijakovic, I., & Perumalsamy, H. (2022). Chitosan nanoparticles and modified chitosan biomaterials, a potential tool to combat salinity stress in plants. *Carbohydrate Polymers*, *284*, 119189. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119189.
15. Bano, N., Khan, S., Hamid, Y., Bano, F., Khan, A. G., Ullah, M. A., Li, T., Ullah, H., Bolan, N., & Rinklebe, J. (2024). Seed nano-priming with multiple nanoparticles enhanced the growth parameters of lettuce and mitigated cadmium (Cd) bio-toxicity: An advanced technique for remediation of Cd contaminated environments. *Environmental Pollution*, *1*(344), 123300. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123300.
16. Begum, N., Wang ,L., Ahmad, H., Akhtar, K., Roy, R., Khan, M. I., & Zhao, T. (2022). Co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and the plant growth-promoting rhizobacteria improve growth and photosynthesis in tobacco under drought stress by up-regulating antioxidant and mineral nutrition metabolism. *Microbial Ecology*, *83*(4), 971-988. https://doi.org/10.1007/s00248-021-01815-7 .
17. Bouremani, N., Cherif-Silini, H., Silini, A., Bouket, A. C., Luptakova, L., Alenezi, F. N., Baranov, O., & Belbahri, L. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A rampart against the adverse effects of drought stress. *Water*, *15*(3), 418. https://doi.org/10.3390/w15030418 .
18. Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M., Jatoi, W. N., Malghani, N. A., Shah, A. N., & Manan, A. (2021). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. *Silicon*, *13*, 4757-4772. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4
19. Chieb, M., & Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, *23*(1), 407. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8.
20. Dolatkhah Dashtmian, A., Hosseini Mazinani, S. M., & Pazoki, A. (2023). Exogenous chitosan nanoparticles modulated drought stress through changing yield, biochemical attributes, and fatty acid profile of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Gesunde Pflanzen*, *75*(6), 1-14. https://doi.org/10.1007/s10343-023-00912-6.
21. Ebrahimian, E., Seyyedi, S. M., Bybordi, A., & Damalas, C. A. (2019). Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. *Agricultural Water Management*, *218*, 149-157. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.031.
22. Ekim, R., Arikan, B., Alp-Turgut, F. N., Koyukan, B., Ozfidan-Konakci, C., & Yildiztugay, E. (2024). Polyvinylpyrrolidone-coated copper nanoparticles dose-dependently conferred tolerance to wheat under salinity and/or drought stress by improving photochemical activity and antioxidant system. *Environmental Research*, *241*, 117681. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117681.
23. Farahani, S., Majidi Heravan, E., Shirani Rad, A. H., & Nourmohammadi, G. (2022). Responses of canola morphological and agronomic characteristics to potassium sulfate fertilization under drought stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *53*, 1731-1743.

https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2063318.

24. Farhat, F., Tariq, A., Waseem, M., Masood, A., Raja, S., Ajmal, W., Iftikhar, I., Zulfiqar, U., & Maqsood, M. F. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) induced improvements in the growth, photosynthesis, antioxidants, and nutrient uptake of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of Gesunde Pflanzen*, *75*, 2075-2088. https://doi.org/10.1007/s10343-023-00845-0
25. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. J. S. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, *29*(1), 153-188. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12
26. Ghaffari, M., Gholizadeh, A., Rauf, S., & Shariati, F. (2023). Drought-stress induced changes of fatty acid composition affecting sunflower grain yield and oil quality. *Food Science & Nutrition*, *11*(12), 7718-7731. https://doi.org/10.1002/fsn3.3690.
27. Giri, B., Prasad, R., Wu, Q. S., & Varma, A. (2019). *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*. Springer. 1-521. (eBook). https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4
28. Gugel, R., & Falk, K. J. C. J. O. P. S. (2006). Agronomic and seed quality evaluation of *Camelina sativa* in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, *86*(4), 1047-1058. https://doi.org/10.4141/P04-081.
29. Heath, R. L., & Packer, L. J. A. O. B. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *125*(1), 189-198. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1.
30. Hidangmayum, A., Dwivedi, P., Kumar, P., & Upadhyay, S. K. (2023). Seed priming and foliar application of chitosan ameliorate drought stress responses in mungbean genotypes through modulation of morpho-physiological attributes and increased antioxidative defense mechanism. *Journal of Plant Growth Regulation*, *42*, 6137-6154. https://doi.org/10.1007/s00344-022-10792-1.
31. Imtiaz, H., Mir, A. R., Corpas, F. J., & Hayat, S. (2023). Impact of potassium starvation on the uptake, transportation, photosynthesis, and abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation*, *99*, 429-448. https://doi.org/10.1007/s10725-022-00925-7.
32. Jamshidi Zinab, A., Hasanloo, T., Naji, A. M., Delangiz, N., Farhangi-Abriz, S., Asgari Lajayer, B., Hemati, A., Shobbar, Z. S., & Farooq, M. (2023). Physiological and biochemical evaluation of commercial oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivars under drought stress. *Gesunde Pflanzen*, *75*, 847-860. https://doi.org/10.1007/s10343-022-00755-7
33. Jankowski, K. J., Sokolski, M., & Kordan, B. (2019). Camelina: Yield and quality response to nitrogen and sulfur fertilization in Poland. *Industrial Crops and Products*, *141*, 111776. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111776.
34. Jothimani, K., & Arulbalachandran, D. J. B. (2020). Physiological and biochemical studies of black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper) under polyethylene glycol induced drought stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *29*, 101777. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101777.
35. Katerji, N., Mastrorilli, M., & Rana, G. J. E. J. O. A. (2008). Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy*, *28*, 493-507. https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.12.003.
36. Khalilpour, M., Mozafari, V., & Abbaszadeh-Dahaji, P. (2021). Tolerance to salinity and drought stresses in pistachio (*Pistacia vera* L.) seedlings inoculated with indigenous stress-tolerant PGPR isolates. *Scientia Horticulturae*, *289*, 110440. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110440.
37. Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stresses. Volume II. Water, radiation, salt, and other stresses. *Journal of Ecology*. 70(2), 696-697. https://doi.org/10.2307/2259945
38. Li, Y., Zou, J., Zhu, H., He, J., Setter, T. L., Wang, Y., Meng, Y., Chen, B., Zhao, W., & Wang, S. (2022). Drought deteriorated the nutritional quality of cottonseed by altering fatty acids and amino acids compositions in cultivars with contrasting drought sensitivity. *Environmental and Experimental Botany*, *194*, 104747.

https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104747.

39. Liao, Q., Gu, S ,Kang, S., Du, T., Tong, L., Wood, J. D., & Ding, R. (2022). Mild water and salt stress improve water use efficiency by decreasing stomatal conductance via osmotic adjustment in field maize. *Science of the Total Environment, 20*(805), 150364. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150364.
40. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in enzymology. *Elsevier, 148*, 350-382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1
41. Mabudi Bilasvar, H., Ghassemi-Golezani, K., & Mohammadi Nassab, A. D. (2022). Seed development, oil accumulation and fatty acid composition of drought stressed rapeseed plants affected by salicylic acid and putrescine. *Gesunde Pflanzen, 74*, 333-345. https://doi.org/10.1007/s10343-021-00612-z.
42. Mącik, M., Gryta, A., & Frąc, M. J. A. I. A. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advanced in Agronomy, 162*, 31-87. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001.
43. Mao, Z. H., Deng, L., Duan, F. Z., Li, X. J., & Qiao, D. Y. (2020). Angle effects of vegetation indices and the influence on prediction of SPAD values in soybean and maize .*International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 93*, 102198. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102198.
44. Mehmood, S., Ahmed, W., Ikram, M., Imtiaz, M., Mahmood, S., Tu, S., & Chen, D. J. P. (2020). Chitosan modified biochar increases soybean (*Glycine max* L.) resistance to salt-stress by augmenting root morphology, antioxidant defense mechanisms and the expression of stress-responsive genes. *Plants, 9*, 1173. https://doi.org/10.3390/plants9091173.
45. Mishra, S. K., Khan, M. H., Misra, S., Dixit ,V. K., Gupta, S., Tiwari, S., Gupta, S. C., & Chauhan, P. S. (2020). Drought tolerant *Ochrobactrum* sp. inoculation performs multiple roles in maintaining the homeostasis in *Zea mays* L. subjected to deficit water stress. *Plant Physiology and Biochemistry, 150*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.025.
46. Mohtashami, R., Dehnavi, M. M., Balouchi, H., & Faraji, H. (2020). Improving yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying. *Agricultural Water Management, 232*, 106046. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106046.
47. Monfared, B. B., Noormohamadi, G., Rad, A. H. S., & Hervan, E. M. (2020). Effects of sowing date and chitosan on some characters of canola (*Brassica napus* L.) genotypes. *Journal of Crop Science and Biotechnology, 23*, 65-71. https://doi.org/10.1007/s12892-019-0177-0.
48. Moolphuerk, N., Lawson, T., & Pattanagul, W. J. J. O. C. I. (2022). Chitosan mitigates the adverse effects and improves photosynthetic activity in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings under drought condition. *Journal of Crop Improvement, 36*, 638-655. https://doi.org/10.1080/15427528.2021.2000544.
49. Moradzadeh, S., Siavash Moghaddam, S., Rahimi, A., Pourakbar, L., El Enshasy, H. A., & Sayyed, R. J. H. (2021). Bio-chemical fertilizer improves the oil yield, fatty acid compositions, and macro-nutrient contents in *Nigella sativa* L. *Horticulturae, 7*(10), 345. https://doi.org/10.3390/horticulturae7100345.
50. Mulugeta, S. M., Sárosi, S., & Radácsi, P. (2023). Physio-morphological trait and bioactive constituents of *Ocimum* species under drought stress. *Industrial Crops and Products, 205*, 117545. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117545.
51. Munsif, F., Shah, T., Arif, M., Jehangir, M., Afridi, M. Z., Ahmad, I., Jan, B. L., & Alansi, S. (2022). Combined effect of salicylic acid and potassium mitigates drought stress through the modulation of physio-biochemical attributes and key antioxidants in wheat. *Saudi Journal of Biological Sciences, 29*, 103294. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103294.
52. Narasimhamurthy, K., Udayashankar, A. C., De Britto, S., Lavanya, S. N., Abdelrahman, M., Soumya, K., Shetty, H. S., Srinivas, C., & Jogaiah, S. J. I. J. O. B. M. (2022). Chitosan and chitosan-derived nanoparticles modulate enhanced immune response in tomato against bacterial wilt disease. *International Journal of Biological*

Macromolecoles, 220, 223-237. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.054.

53. Nasrollahzadeh, S., Mamnabi, S., Ghassemi-Golezani, K., Raei, Y., & Weisany, W. (2023). PGPR and vermicompost with reduced chemical fertilizer enhances biodiesel production, nutrient uptake and improve oil composition of rapeseed grown under water deficit stress. *South African Journal of Botany*, *159*, 17-25. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.06.001.
54. Naveen, N., Kumari, N., Avtar, R., Jattan, M., Ahlawat, S., Rani, B., Malik, K., Sharma, A., & Singh, M. J. H. (2021). Evaluation of effect of brassinolide in *Brassica juncea* leaves under drought stress in field conditions. *Horticulturae*, *7*, 514. https://doi.org/10.3390/horticulturae7110514.
55. Nawaz, F., Rafeeq, R., Majeed, S., Ismail, M. S., Ahsan, M., Ahmad, K. S., Akram, A., & Haider, G. (2023). Biochar amendment in combination with endophytic bacteria stimulates photosynthetic activity and antioxidant enzymes to improve soybean yield under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23*, 746-760. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01079-1.
56. Neupane, D., Lohaus, R. H., Solomon, J. K. Q., & Cushman, J. C. (2022). Realizing the potential of *Camelina sativa* as a bioenergy crop for a changing global climate. *Plants, 11*(6), 1-31. https://doi.org/ 10.3390/plants11060772.
57. Ostadi, A., Javanmard, A., Amani Machiani, M., Sadeghpour, A., Maggi, F., Nouraein, M., Morshedloo, M. R., Hano, C., & Lorenzo, J. M. (2022). Co-application of TiO_2 nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi improves essential oil quantity and quality of sage (*Salvia officinalis* L.) in drought stress conditions. *Plants, 11*(13), 1659. https://doi.org/10.3390/plants11131659.
58. Pavlista, A., Hergert, G., Margheim, J., & Isbell, T. J. I. C. (2016). Growth of spring camelina (*Camelina sativa*) under deficit irrigation in Western Nebraska. *Industrial Crops and Products, 83*, 118-123 https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.12017.
59. Pramanik, P., Krishnan, P., Maity, A., Mridha, N., Mukherjee, A., & Rai, V. J. E. N. V. (2020). Application of nanotechnology in agriculture. *Environmental Nanotechnology*, *4*, 317-348. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26668-4_9.
60. Qayyum, A., Al Ayoubi, S., Sher, A., Bibi, Y., Ahmad, S., Shen, Z., & Jenks, M. A. J. S. J. O. B. S. (2021). Improvement in drought tolerance in bread wheat is related to an improvement in osmolyte production, antioxidant enzyme activities, and gaseous exchange. *Saudi Journal Biological Science*, *28*, 5238-5249. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.040.
61. Rad, A. H. S., Malmir, M., & Eyni-Nargeseh, H. (2024). Potassium silicate positively affects oil content, physiologic, and agronomic traits of *Camelina sativa* L. under optimal water supply and drought stress conditions. *Silicon*, *16*, 1071–1082. https://doi.org/10.1007/s12633-023-02741-8.
62. Reddy, P. P., & Reddy, P. P. J. S. I. O. C. P. (2016). Supplemental irrigation. *Sustainable Intensification of Crop Protection*, 253-265. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2702-4_17.
63. Rezaei-Chiyaneh, E., Amirnia, R., Machiani, M. A., Javanmard, A., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2020). Intercropping fennel (*Foeniculum vulgare* L.) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by PGPR inoculation: A strategy for improving yield, essential oil and fatty acid composition. *Scientia Horticulturae*, *261*, 108951. https://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108951.
64. Rezayian, M., Ebrahimzadeh, H., Niknam, V. J. J. O. S. S., & Nutrition, P. (2020). Nitric oxide stimulates antioxidant system and osmotic adjustment in soybean under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *20*, 1122-1132. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00198-x.
65. Rezig, L., Chouaibi, M., Msaada, K., & Hamdi, S. (2012). Chemical composition and profile characterisation of pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed oil. *Industrial Crops and Products, 37*, 82-87. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.004.
66. Sathiyabama, M., & Manikandan, A. J. C. P. (2021). Foliar application of chitosan nanoparticle improves yield,

mineral content and boost innate immunity in finger millet plants. *Cabohydrate Polymers*, *258*, 117691. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117691.

67. Secchi, M. A., Fernandez, J. A., Stamm, M. J., Durrett, T., Prasad, P. V., Messina, C. D., & Ciampitti, I. A. (2023). Effects of heat and drought on canola (*Brassica napus* L.) yield, oil and protein: A meta-analysis. *Field Crops Research*, *293*, 108848. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108848.
68. Sentís-Moré, P., Ortega-Olivé, N., Robles-Rodríguez, I., Royo-Esnal, A., & Romero-Fabregat, M. P. (2023). Protein hydrolysis of *Camelina sativa* meals: A study of molecular weight distribution and emulsifying properties. *Food Bioscience*, *56*, 103062. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103062.
69. Shah, M. N., Wright, D. L., Hussain, S., Koutroubas, S. D., Seepaul, R., George, S., Ali, S., Naveed, M., Khan, M., & Altaf, M. T. (2023). Organic fertilizer sources improve the yield and quality attributes of maize (*Zea mays* L.) hybrids by improving soil properties and nutrient uptake under drought stress. *Journal of King Saud University-Science*, *35*, 102570.
70. Sharma, M., Delta, A. K., & Kaushik, P. (2021). *Glomus mosseae* and *Pseudomonas fluorescens* application sustains yield and promote tolerance to water stress in *Helianthus annuus* L. *Stresses*, *1*, 305-316. https://doi.org/10.3390/stresses1040022.
71. Shemi, R., Wang, R., Gheith, E. S. M., Hussain, H. A., Hussain, S., Irfan, M., Cholidah, L., Zhang, K., Zhang, S., & Wang, L. (2021). Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, *11*, 3195. https://doi.org/10.1038/s41598-021-82264-7.
72. Shiranirad, S., Eyni-Nargeseh, H., Shirani Rad, A. H., & Malmir, M. (2023). Managing irrigation and sowing date can improve oil content and fatty acid composition of *Camelina sativa* L. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *14*, 2847-2861. https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2177989.
73. Silva-Santos, L., Neto, L. P., Corte-Real, N., Sperandio, M. V. L., Camara, C. A. G., Moraes, M. M., & Ulisses, C. (2023). Yeast extract and chitosan elicitation improves essential oil, regulates plant growth and antioxidative system in *Lippia alba* (Mill) NE Brown (Verbenaceae). *South African Journal of Botany*, *163*, 756-769. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.10.024
74. Sima, N. A. K., Jabbari, H., Ebadi, A., Ghaffari, M. R., & Koobaz, P. J. J. O. S. S. (2023). Comparative analysis of exogenous hormone application on contrasting canola (*Brassica napus* L.) genotypes under drought stress conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *24*, 308-317. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01527-6.
75. Tashakorizadeh, M., Vahabi, M. R., Golkar, P., & Mahdavian, K. (2022). The singular and combined effects of drought and copper stresses on the morphological traits, photosynthetic pigments, essential oils yield and copper concentration of *Fumaria parviflora* Lam. *Industrial Crops and Products*, *177*, 114517. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114517.
76. Waraich, E. A., Ahmed, Z., Ahmad, R., Ashraf, M. Y., Naeem, M. S., & Rengel, Z. J. A. J. O. C. S. (2013). *Camelina sativa*, a climate proof crop, has high nutritive value and multiple-uses: A review. *Australian Journal of Crop Science*, *7*, 1551-1559.
77. Wasaya, A., Manzoor, S., Yasir, T. A., Sarwar, N., Mubeen, K., Ismail, I. A., Raza, A., Rehman, A., Hossain, A., & EL Sabagh, A. (2021). Evaluation of fourteen bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by observing gas exchange parameters, relative water and chlorophyll content, and yield attributes under drought stress. *Sustainability*, *13*, 4799. https://doi.org/10.3390/su13094799.
78. Wei, H., Geng, X., Zhu, W., Zhang, X., Zhang, X., Chen, Y., Huo, Z., Xu, K., Zhou, G., & Meng, T. (2023). Individual and combined influences of salinity and drought stress on the agro-physiological traits and grain yield of rice. *Field Crops Research*, *304*, 109172. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109172.
79. Yang, Q., Li, P., Zhang, D., Lin, W., Hao, X., & Zong, Y. (2023). Effects of elevated CO_2 on the photosynthesis, chlorophyll fluorescence and yield of two wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) under persistent drought stress. *Sustainability*, *15*, 1593. https://doi.org/10.3390/su15021593

80. Zafar, S., Li, Y. L., Li, N. N ,Zhu, K. M., & Tan, X. L. J. J. O. B. (2019). Recent advances in enhancement of oil content in oilseed crops. *Journal of Biotechnology, 301*, 35-44. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.05.307.

81. Zanetti, F., Alberghini, B., Marjanović Jeromela, A., Grahovac, N., Rajkovi´c, D., Kiprovski, B., & Monti, A. (2021). Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 41*, 1-18. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00663-y.

82. Zhang, C. J., Gao, Y., Jiang, C., Liu, L., Wang, Y., Kim, D. S., Yu, J., Yu, L., Li, F., & Fan, Y. (2021). Camelina seed yield and quality in different growing environments in northern China. *Industrial Crops and Products, 172*, 114071. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114071.

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 18, No. 2, 2026, p. 213-228

Physiological and Yield Responses of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Thermal Stress in a Sequential Cropping System (Summer-Winter) in the Shavor Region, Khuzestan

Mohammad Ali Molaee[1], Seyed Keyvan Marashi[1*], Abdolali Gilani[2], Shahram Lak[1] and Mojtaba Alavi Fazel[3]

1- Department of Agronomy, Ahv. C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
2- Department of seed and plant Improvement Research, Khuzestan Agricultural and Natural Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.
3- Department of Agronomy, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
(*- Corresponding author's Email: marashi_47@iau.ac.ir)

Received: 11-03-2026
Revised: 26-05-2026
Accepted: 10-06-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:
Molaee, M. A., Marashi, S. K., Gilani, A., Lak, S., & Alavi Fazel, M. (2026). Physiological and yield responses of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars to thermal stress in a sequential cropping system (summer-winter) in the Shavor region, Khuzestan. *Journal of Agroecology*, *18*(2), 213-228. (In Persian)
https:doi.org/10.22067/AGRY.2026.98135.1271

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is a strategic crop for Iran's food security, but in tropical regions like Khuzestan, terminal heat stress severely limits its production. A sequential double-cropping system (summer-winter) has been proposed to maximize land use efficiency. In this system, the first crop is sown in late summer (September-October), and the second crop is sown immediately after harvest in winter (January-February). The summer crop faces high soil temperature at germination but benefits from rapid early growth, while the winter crop encounters cold stress at early stages followed by terminal heat stress during grain filling. Therefore, the success of this system depends on selecting suitable cultivars and optimal sowing dates to manage temperature stresses in both cycles.

Materials and Methods

This research was conducted over two cropping years (2022-2023 and 2023-2024) as a Randomized Complete Block Design with a split-plot arrangement. The main factor included four sowing dates (September 11, September 21, October 1, and October 11), and the sub-factor included four wheat cultivars (Mehregan, Chamran-2, Ayeeneh, and Sarang). Winter cropping was performed immediately after the summer harvest on four corresponding sowing dates: January 15, January 20, January 30, and February 4. Physiological indices including leaf area index (LAI), total dry weight (TDW), crop growth rate (CGR), net assimilation rate (NAR),

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

https:doi.org/10.22067/AGRY.2026.98135.1271

and leaf area duration (LAD) were measured, and grain yield was determined for both cropping cycles. Data from both years were combined and subjected to analysis of variance, and mean comparisons were performed using an appropriate statistical test.

Results and Discussion

The results showed that sowing date, cultivar, and their interaction significantly affected all physiological traits and grain yield. The highest total dry weight (795 g m^{-2}) and crop growth rate (15.74 g m^{-2}. day^{-1}) were observed in the sowing date October 1/January 30 with the Chamran-2 cultivar. The highest net assimilation rate (16.18 g m^{-2} day^{-1}) was also obtained in the same treatment. This superiority can be attributed to the favorable synchronization of the rapid growth phase with moderate temperatures in autumn and early spring, as well as the longer growth duration (135 days) and better heat tolerance of the Chamran-2 cultivar. However, the Mehregan cultivar sown on October 11/February 4 showed a different performance pattern. Despite having moderate or even low values in some physiological indices such as CGR and NAR, it exhibited the highest leaf area index (4.30), the highest leaf area duration (24.55 days), and consequently the highest mean grain yield (1408 kg ha^{-1}) compared to other treatments. The superiority of Mehregan can be explained by its high leaf area duration, which reflects sustained photosynthetic activity over a longer period, and its specific adaptation to water-limited and saline conditions, enabling it to maintain green leaf area even under late sowing dates. In contrast, Chamran-2 and Sarang cultivars, despite their superiority in instantaneous physiological indices (CGR and NAR) at specific sowing dates (especially October 1/January 30), showed lower final yields. This was primarily due to their significantly reduced leaf area index (3.96-3.98) and leaf area duration (17.75-19.75 days), indicating greater susceptibility to terminal heat stress and accelerated leaf senescence during the reproductive stages.

Conclusion

Overall, the success of the sequential cropping system in tropical regions depends on selecting tolerant cultivars and optimal sowing dates. Leaf area index and leaf area duration play a more critical role in final yield compared to other physiological indices. The Mehregan cultivar, sown on October 11/February 4, is recommended for this system. Furthermore, these results can serve as a practical guideline for farmers and agricultural managers in Khuzestan and similar warm regions to improve land-use efficiency and achieve sustainable wheat production through double-cropping systems.

Keywords: Crop growth rate, Crop management, Leaf area index, Sowing date

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۲۸-۲۱۳

پاسخ فیزیولوژیکی و عملکرد ارقام گندم (*Triticum aestivum* L.) نان به تنش دمایی در یک نظام کشت متوالی (تابستانه-زمستانه) در منطقه شاوور-خوزستان

محمد علی مولایی[۱]، سیدکیوان مرعشی[۱*]، عبدالعلی گیلانی[۲]، شهرام لک[۱] و مجتبی علوی فاضل[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

چکیده

گندم (*Triticum aestivum* L.) نقش کلیدی در تأمین امنیت غذایی ایران دارد، امّا در مناطق گرمسیری مانند خوزستان، تنش گرمایی انتهای فصل، تولید آن را با محدودیت جدی مواجه ساخته است. سیستم کشت متوالی (تابستانه-زمستانه) می‌تواند راهکاری برای بهره‌برداری حداکثری از زمین باشد، امّا موفقیت آن به انتخاب رقم مناسب و تاریخ کاشت بهینه وابسته است. این پژوهش طی دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش کرت‌های خردشده با دو عامل تاریخ کاشت (کاشت تابستانه) شامل ۲۰ شهریور، ۳۰ شهریور، ۹ مهر و ۱۹ مهر در کرت‌های اصلی و چهار رقم مهرگان، چمران ۲، آینه و سارنگ در کرت‌های فرعی اجرا گردید. کشت زمستانه بلافاصله پس از برداشت کشت تابستانه در چهار تاریخ کاشت ۲۵ دی، ۳۰ دی، ۱۰ بهمن و ۱۵ بهمن (به‌ترتیب متناظر با تاریخ‌های کاشت تابستانه ۲۰ و ۳۰ شهریور، ۹ و ۱۹ مهر) انجام شد. نتایج نشان داد که اثر تاریخ کاشت، رقم و اثر متقابل آن‌ها بر تمامی صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه معنی‌دار بود. بیشترین ماده خشک کل (۷۹۵ گرم بر مترمربع) و سرعت رشد محصول (۱۵/۷۴ گرم بر مترمربع در روز) در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن و رقم چمران ۲ مشاهده شد. بالاترین سرعت جذب خالص (۱۶/۱۸ گرم بر مترمربع در روز) نیز در همین تیمار حاصل گردید. بااین‌حال، رقم مهرگان در تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن با دارا بودن بالاترین شاخص سطح برگ (۴/۳۰)، دوام سطح برگ (۲۴/۵۵ روز) و میانگین عملکرد دانه (۱۴۰۸ کیلوگرم در هکتار) نسبت به سایر تیمارها برتری داشت. ارقام چمران ۲ و سارنگ علی‌رغم برتری در برخی شاخص‌های فیزیولوژیک لحظه‌ای، به‌دلیل کاهش شاخص سطح برگ و دوام سطح برگ، عملکرد نهایی پایین‌تری نشان دادند. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که موفقیت سیستم کشت متوالی در مناطق گرمسیری به انتخاب رقم متحمل و تاریخ کاشت بهینه وابسته است. شاخص سطح برگ و دوام سطح برگ در مقایسه با سایر شاخص‌های فیزیولوژیک، نقش کلیدی‌تری در عملکرد نهایی دارند. رقم مهرگان در تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن برای این سیستم قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، سرعت رشد محصول، شاخص سطح برگ، مدیریت کشت

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) به‌عنوان محصولی استراتژیک، نقشی محوری در تأمین امنیت غذایی ایران ایفا می‌کند. با این حال، در مناطق گرمسیری، افزایش تولید از طریق روش‌های متعارف با محدودیت‌های جدی، به‌ویژه تنش گرمایی انتهای فصل، روبه‌رو است. در این راستا، کشت متوالی گندم به‌عنوان یک راهکار مدیریتی فشرده برای بهره‌برداری حداکثری از زمین و منابع آبی محدود مورد توجه قرار گرفته است. در این سیستم، کشت اول در انتهای تابستان (شهریور-مهر) و کشت دوم بلافاصله پس از برداشت کشت اول در فصل زمستان انجام می‌شود. با این حال، موفقیت اقتصادی و عملیاتی این سیستم کاملاً وابسته به عملکرد دانه آن در مقایسه با سیستم

۱- گروه زراعت، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۲- بخش اصلاح و تهیه نهال بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،اهواز، ایران.
۳- گروه زراعت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: marashi_47@iau.ac.ir)
https: doi.org/10.22067/AGRY.2026.98135.1271

تک‌کشتی مرسوم است، زیرا هر یک از چرخه‌های کشت با چالش‌های اقلیمی متفاوتی روبه‌رو هستند. در کشت تابستانه، اگرچه دمای بالای خاک در زمان جوانه‌زنی و استقرار گیاه ممکن است چالشی اولیه ایجاد کند، اما شرایط گرم اولیه می‌تواند منجر به سرعت رشد اولیه بیشتر و رسیدن زودتر گیاه به مراحل زایشی شود، به شرطی که گیاه از اوج گرمای تابستان عبور کرده باشد (Hatfield & Prueger, 2015). این امر ممکن است پنجره زمانی مناسبی برای کشت دوم فراهم آورد. اما چالش اصلی در کشت زمستانه متعاقب آن نهفته است. در این چرخه، گیاه در مراحل ابتدایی رشد با دمای پایین مواجه می‌شود که می‌تواند رشد را کند نماید و متعاقباً با افزایش سریع دما و تنش گرمایی در مراحل بحرانی پر شدن دانه روبه‌رو می‌گردد (Asseng et al., 2015).

پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر تنش‌های دمایی بر شاخص‌های رشد و عملکرد گندم پرداخته‌اند. در این راستا، بیان شده است که تنش گرمایی انتهای فصل باعث کاهش شدید دوام سطح برگ و سرعت جذب خالص شده و در نتیجه عملکرد گندم را در خوزستان کاهش می‌دهد (Asseng et al., 2015). همچنین گزارش شده است که ارقام دارای پایداری بیشتر در شاخص‌های رشدی تحت شرایط تنش، عملکرد بهتری دارند (Fischer, 2011). در مطالعه‌ای بر اثر تاریخ‌های کاشت غیرمتعارف، بیان شد که تغییرات قابل توجهی در الگوی تجمع ماده خشک و تخصیص آن در ژنوتیپ‌های گندم بهاره مشاهده می‌شود (Slafer & Rawson, 1994). همچنین بیان شده است که افزایش دما در مرحله پس از گرده‌افشانی، مدت زمان پر شدن دانه را کاهش و سرعت کاهش سطح برگ سبز را افزایش می دهد (Liu et al., 2016). محققین تأکید کرده‌اند که تنش سرما در ابتدای فصل رشد می‌تواند باعث کاهش تعداد پنجه و در نهایت کاهش عملکرد گندم شود (Thakur et al., 2010). همچنین بیان شده است که در شرایط آب و هوایی گرم، کاشت زودهنگام در مناطق گرمسیر می‌تواند سرعت رشد محصول را به دلیل قرارگیری مرحله گلدهی در دوره اوج دما کاهش دهد (Hatfield & Prueger, 2015). محققین به کاهش شاخص سطح برگ در تاریخ‌های کاشت دیرهنگام به دلیل تنش گرمایی و کوتاه شدن دوره رشد رویشی اشاره نموده‌اند (Liu et al., 2021).

در خصوص سیستم‌های کشت فشرده، در مطالعه‌ای بر روی کشت متوالی ذرت–گندم در دشت شمال چین، مدیریت تاریخ کاشت را برای جلوگیری از تداخل تنش‌های دمایی در هر دو فصل، کلید موفقیت سیستم عنوان کردند (Li, 2026). در مطالعه دیگری بر روی سیستم‌های کشت فشرده نشان داده شد که شاخص سطح برگ و سرعت رشد محصول در مراحل اولیه رشد، پیش‌بینی‌کننده‌های مهمی برای عملکرد نهایی هستند (Hamzei & Zarei, 2024). در زمینه واکنش ارقام به تنش‌های دمایی، تأثیر معنی‌دار تاریخ کاشت و رقم بر دوام سطح برگ گزارش شده است (Rahmati et al., 2023). محققین دریافتند که ارقام متحمل به گرما، توانایی حفظ سرعت جذب خالص بالاتری را در شرایط تنش انتهای فصل دارند (Fischer, 2011). رادفورد (Radford, 1967) و آسنگ و همکاران (Asseng et al., 2015) نیز نشان دادند که ارقام مختلف گندم از نظر کارایی فتوسنتزی واکنش متفاوتی به تاریخ کاشت نشان می‌دهند. فاروغ و همکاران (Farooq et al., 2014) تأکید کردند که انتخاب رقم مناسب برای هر تاریخ کاشت خاص، یک راهکار مدیریتی کلیدی برای افزایش تجمع ماده خشک و نهایتاً عملکرد است. در مطالعه دیگری در بررسی اثر تاریخ کاشت و رقم بر شاخص‌های رشد و عملکرد گندم، بیان شد که ارقام دیررس در تاریخ‌های کاشت مناسب، ماده خشک بیشتری نسبت به ارقام زودرس انباشت می‌کنند (Slafer & Rawson, 1994).

این پژوهش با هدف امکان‌سنجی کشت متوالی (تابستانه–زمستانه) ارقام گندم نان در منطقه شاوور–خوزستان و پاسخ به این پرسش طراحی شد که آیا عملکرد کل (مجموع دو کشت) می‌تواند از طریق انتخاب هم‌زمان رقم متحمل و تاریخ کاشت بهینه، به سطح قابل قبول اقتصادی برسد؟ فرضیه اصلی آن است که پایداری و دوام سطح برگ در مواجهه با تنش گرمایی انتهای فصل، عاملی کلیدی‌تر در مقایسه با شاخص‌های فیزیولوژیک مانند سرعت رشد محصول و سرعت فتوسنتز خالص در تعیین موفقیت این سیستم می‌باشد. برای آزمون این فرضیه، شاخص‌های رشدی نظیر شاخص سطح برگ، ماده خشک کل، سرعت رشد محصول، سرعت فتوسنتز خالص، دوام سطح برگ و عملکرد دانه در هر دو چرخه کشت تابستانه و زمستانه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش طی دو سال زراعی ۱۴۰۱–۱۴۰۲ و ۱۴۰۲–۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی ایستگاه کشاورزی شاوور، وابسته به مرکز تحقیقات،

آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، به اجرا درآمد. این ایستگاه در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری شمال شهر اهواز واقع شده و براساس طبقه‌بندی اقلیمی، منطقه‌ای گرم و خشک محسوب می‌شود (Climate Data, 2015). پیش از اجرای کشت، به‌منظور ارزیابی وضعیت حاصلخیزی و ویژگی‌های فیزیکی خاک، از لایه سطحی (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری) نمونه‌برداری انجام و نمونه مرکب تهیه شد. نتایج تجزیه شیمیایی این خاک در جدول ۱ خلاصه شده است.

داده‌های میانگین بلندمدت دمای هوا و بارندگی این منطقه در جدول ۲ ارائه شده است. بر این اساس، متوسط دمای سالانه بیش از ۲۵ درجه سانتی‌گراد و بارندگی سالانه حدود ۲۲۰ میلی‌متر می‌باشد که عمدتاً در فصل پاییز و زمستان رخ می‌دهد. ماه‌های خرداد تا شهریور تقریباً فاقد بارش مؤثر بوده و دما در تیر و مرداد به اوج خود (متجاوز از ۴۲ درجه سانتی‌گراد) می‌رسد. داده‌های واقعی دما و بارش دو سال آزمایش، انطباق کلی با این روند بلندمدت داشت، بااین‌حال سال ۱۴۰۲-۱۴۰۳ از نظر بارش پاییزه کمی مطلوب‌تر بود.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the experimental farm soil

بافت Texture	پتاسیم قابل جذب (mg Available potassium kg^{-1})	فسفر قابل جذب Available phosphorus (mg kg^{-1})	کربن آلی Organic Carbon (%)	نیتروژن Total nitrogen (%)	pH	هدایت الکتریکی EC ($dS\ m^{-1}$)
لومی رسی Clay loam	218.00	10.40	0.76	0.04	7.83	3.91

جدول ۲- میانگین بلندمدت (۲۰ ساله) دمای ماهانه و بارندگی در منطقه شاوور

Table 2- Long-term (20-years) monthly average temperature and rainfall in the Shavor region

ماه Month	میانگین دمای ماهانه Mean monthly temperature (°C)	میانگین بارندگی ماهانه Mean monthly rainfall (mm)
مهر.Oct	30.00	5.00
آبان.Nov	24.00	25.00
آذر.Dec	18.00	40.00
دی.Jan	14.00	50.00
بهمن.Feb	16.00	45.00
اسفند.Mar	20.00	30.00
فروردین.Apr	25.00	20.00
اردیبهشت.May	32.00	10.00
خرداد.Jun	37.00	0.00
تیر.Jul	41.00	0.00
مرداد.Aug	42.00	0.00
شهریور.Sep	38.00	0.00

این پژوهش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش کرت‌های خردشده و در سه تکرار اجرا گردید. عامل اصلی، تاریخ کاشت در چهار سطح شامل: ۲۰ شهریور، ۳۰ شهریور، ۹ مهر و ۱۹ مهر بود. عامل فرعی، رقم گندم در چهار سطح شامل: ارقام مهرگان، چمران ۲، آینه و سارنگ در نظر گرفته شد. کشت زمستانه بلافاصله پس از برداشت کشت تابستانه در چهار تاریخ کاشت ۲۵ دی، ۳۰ دی، ۱۰ بهمن و ۱۵ بهمن (به ترتیب متناظر با تاریخ‌های کاشت تابستانه ۲۰ و ۳۰ شهریور، ۹ و ۱۹ مهر) انجام شد. هر کرت آزمایشی مساحتی معادل ۱۲ مترمربع (۳×۴ متر) داشت. مشخصات چهار رقم گندم مورد استفاده شامل مهرگان، چمران ۲، آینه و سارنگ در جدول (۳) خلاصه شده است (Javahari., 2011).

جدول ۳- مشخصات ارقام گندم مورد استفاده در آزمایش
Table 3- Characteristics of wheat cultivars used in the experiment

رقم Cultivar	منشأ Origin	دوره رشد Growth duration (days)	ویژگی‌های مهم Important characteristics
سارنگ Sarang	مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر Seed and Plant Improvement Institute	130	پایداری نسبتاً خوب عملکرد در شرایط گرم و خشک جنوب کشور Relatively stable yield under the hot and dry conditions of the country's south.
چمران ۲ Chamran-2	مرکز تحقیقات خوزستان و مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر Khuzestan Research Center and Seed and Plant Improvement Institute	135	مقاومت به ورس (خوابیدگی)، تحمل به تنش گرمایی و خشکی انتهای فصل Resistance to lodging, and tolerance to heat stress and late-season drought
آینه Ayeeneh	مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر Seed and Plant Improvement Institute	125	سازگاری عمومی بالا، کیفیت نانوایی مطلوب برای مناطق گرمسیر، عملکرد پایدار در اراضی آبی استان‌های خوزستان، فارس، لرستان، کرمان، خراسان رضوی و کرمانشاه High general adaptability, desirable baking quality for tropical regions, and stable yield in irrigated lands across the provinces of Khuzestan, Fars, Lorestan, Kerman, Razavi Khorasan, and Kermanshah
مهرگان Mehregan	مرکز تحقیقات کرمانشاه Kermanshah Research Center	125	توسعه‌یافته برای شرایط محدودیت آب و شوری خاک Developed for water-limited conditions and soil salinity

آماده‌سازی زمین شامل شخم با گاوآهن برگرداندار در عمق ۲۵-۳۰ سانتی‌متری و دو نوبت دیسک سبک در ۱۵ مرداد ماه (حدود یک ماه قبل از اولین تاریخ کاشت) انجام شد. قبل از کاشت، کودهای فسفره و پتاسه به‌صورت کامل و کود نیتروژنه به‌مقدار یک سوم، به‌عنوان کود پایه در خاک مخلوط گردید. مصرف کودهای شیمیایی براساس نتایج آزمون خاک و توصیه متداول برای کشت گندم در منطقه انجام شد. مقادیر مصرف نیتروژن معادل ۱۳۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار از منبع اوره که به‌صورت تقسیط در دو نوبت (۵۰ درصد به‌عنوان کود پایه قبل از کاشت و ۵۰ درصد به‌عنوان کود سرک در مرحله آغاز ساقه‌دهی) مصرف گردید. مقدار مصرف فسفر معادل ۸۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپرفسفات تریپل که تماماً به‌عنوان کود پایه قبل از کاشت به خاک اضافه شد. مقدار مصرف پتاسیم معادل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع پتاسیم سولفات که تماماً به‌عنوان کود پایه قبل از کاشت مصرف گردید. کاشت به‌روش دستی و با فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع انجام شد (Jafari et al., 2021). آبیاری اول بلافاصله پس از کاشت صورت گرفت و آبیاری‌های بعدی براساس نیاز آبی و عُرف منطقه به‌روش کرتی انجام شد. مبارزه با علف‌های هرز عمدتاً از طریق وجین دستی صورت پذیرفت. در طول فصل رشد، هیچ‌گونه آلودگی آفت یا بیماری مهمی مشاهده نشد و لذا نیازی به عملیات سم‌پاشی ویژه نبود.

جهت تعیین عملکرد دانه در زمان رسیدگی کامل و هنگامی که رطوبت دانه به حدود ۱۰-۱۲ درصد رسید، از سطح مفید هر کرت (با حذف اثر حاشیه) معادل دو مترمربع محصول برداشت شد. پس از خرمن‌کوبی و جدا کردن کاه‌وکلش، دانه‌ها توزین و عملکرد دانه برحسب گرم در مترمربع محاسبه گردید. برای تعیین شاخص سطح برگ در مرحله ظهور کامل سنبله، از هر کرت ۱۰ بوته نمونه‌برداری شد. سطح برگ با استفاده از روش ترسیمی (ترسیم برگ‌های نمونه روی کاغذ A4 و محاسبه نسبت سطح به وزن کاغذ) محاسبه گردید. در نهایت، شاخص سطح برگ از تقسیم سطح برگ کل بر سطح زمین اشغال‌شده تعیین گردید (Koocheki & Sarmadnia, 2013). برای تعیین وزن خشک کل گیاه [1]، نمونه‌برداری در دو مرحله رشدی ابتدای ساقه رفتن (کد ۳۰ در مقیاس زادوکس) و مرحله ظهور کامل سنبله (کد ۵۹ در مقیاس زادوکس) انجام شد. در هر مرحله، از هر کرت ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب گردید. بوته‌ها از ناحیه طوقه قطع شد و کلیه اندام‌های هوایی (شامل برگ، ساقه و سنبله) جدا گردید. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی گراد خشک شدند و سپس وزن خشک آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم تعیین گردید (Koocheki & Sarmadnia, 2013). سرعت رشد محصول [2]، سرعت جذب خالص

1 - Total dry weight, TDW
2 - Crop growth rate, CGR

دوام سطح برگ[2] با استفاده از معادله‌های ۱ تا ۳ بین دو مرحله رشدی شامل ابتدای ساقه رفتن زمان T_1 و ظهور کامل سنبله‌ها زمان T_2محاسبه گردید (Hunt., Koocheki & Sarmadnia, 2013 ; 1978).

$$CGR = (W_2 - W_1) / [A \times (T_2 - T_1)] \quad \text{معادله (۱)}$$

$$NAR = CGR / LAI \quad \text{معادله (۲)}$$

$$LAD = [(LAI_1 + LAI_2) / 2] \times (T_2 - T_1) \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن، W_1 و W_2: به‌ترتیب وزن خشک کل گیاه (گرم در متر مربع) در مراحل T_1 و T_2، A: مساحت نمونه‌برداری (متر مربع) ، T_1 و T_2: زمان نمونه‌برداری(روز) ، LAI_1 و LAI_2: شاخص سطح برگ در مراحل T_1 و T_2 و LAI: میانگین شاخص سطح برگ در بازه زمانی مورد نظر می‌باشد.

پس از جمع‌آوری داده‌ها در دو سال زراعی متوالی (۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳)، تجزیه واریانس مرکب برای کشت تابستانه، زمستانه و همچنین برای میانگین دو کشت تابستانه-زمستانه انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p\leq 0.05$) انجام گردید. کلیه تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

ماده خشک کل (TDW): نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تاریخ کاشت، اثر اصلی رقم و اثر متقابل تاریخ کاشت × رقم بر ماده خشک کل در هر دو کشت تابستانه و زمستانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در میانگین دو کشت، ترکیب رقم چمران ۲ در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن با مقدار ۷۹۵/۱۳ گرم بر مترمربع بیشترین ماده خشک کل را تولید کرد (جدول ۵). کمترین مقدار نیز در میانگین دو کشت مربوط به رقم آینه در تاریخ کاشت ۲۰ شهریور/ ۲۵ دی با مقدار ۵۳۹/۱۵ گرم بر مترمربع مشاهده شد. برتری ترکیب رقم چمران ۲ با تاریخ کاشت ۹ مهر و ۱۰ بهمن در تجمع ماده خشک (۷۹۵/۱۳ گرم بر مترمربع) به‌دلیل هماهنگی دوره رشد رویشی و زایشی این رقم با شرایط دمایی مطلوب (عدم تداخل با اوج گرمای تابستان در کشت اول و فرار از سرمای شدید زمستان در کشت دوم) می‌باشد. در مقابل، ماده خشک ضعیف رقم آینه در تاریخ کاشت۲۰ شهریور و ۲۵ دی ناشی از قرارگیری مراحل رشد رویشی در کشت زمستانه در معرض سرمای بهمن و اسفند و همچنین تداخل مراحل رشد رویشی در کشت تابستانه با اوج گرمای شهریور می‌باشد. یافته‌های حاضر مبنی بر تأثیر معنی‌دار تاریخ کاشت و رقم بر ماده خشک کل با نتایج پژوهش‌های متعددی همسو است. گزارش شده است که تأخیر در کاشت گندم به دلیل مواجهه با تنش گرمایی انتهای فصل، منجر به کاهش معنی‌دار ماده خشک کل می‌شود (Asseng et al., 2015). همچنین مشاهده شده است که ارقام دیررس در تاریخ‌های کاشت مناسب، ماده خشک بیشتری نسبت به ارقام زودرس انباشت می‌کنند (Slafer & Rawson, 1994). در مطالعه‌ای دیگر بر روی گندم نان نشان داده شد که اثر متقابل تاریخ کاشت و رقم بر تجمع ماده خشک معنی‌دار بود (Fischer, 2011). بیان شده است که تاریخ کاشت بهینه با هماهنگی مراحل رشد با شرایط محیطی مطلوب، حداکثر جذب منابع و تولید ماده خشک را ممکن می‌سازد (Sadras & Calderini, 2015). فاروق و همکاران (Farooq et al., 2014) نیز گزارش کرده‌اند که انتخاب رقم مناسب برای هر تاریخ کاشت خاص، یک راهکار مدیریتی کلیدی برای افزایش تجمع ماده خشک و نهایتاً عملکرد است.

شاخص سطح برگ (LAI): در این تحقیق اثر تاریخ کاشت در سطح یک درصد، اثر رقم در کشت تابستانه در سطح پنج درصد و در کشت زمستانه در سطح یک درصد و اثر متقابل تاریخ کاشت × رقم به‌جز در کشت تابستانه بر شاخص سطح برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در میانگین دو کشت، بیشترین شاخص سطح برگ مربوط به تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن رقم مهرگان (۴/۳۰) بود. کمترین شاخص سطح برگ در تاریخ کاشت ۹ مهر و ۱۰ بهمن ارقام مهرگان (۳/۹۶) و چمران ۲ (۳/۹۸) مشاهده شد (جدول ۵). رقم مهرگان که برای شرایط تنش‌آبی و شوری توسعه یافته، احتمالاً با داشتن سیستم ریشه‌ای کارآمدتر و حفظ تعادل آبی بهتر، توانسته است در تاریخ کاشت دیرتر (۱۹ مهر و ۱۵ بهمن) نیز سطح برگ نسبتاً بالایی را حفظ کند (Farooq et al., 2014). بر خلاف انتظار، کاهش شدید شاخص سطح برگ در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن مشاهده شد که می‌تواند ناشی از همزمانی مراحل حساس رشد (گلدهی و پر شدن دانه) با اوج تنش‌های دمایی در این تاریخ کاشت باشد. در حالی که در تاریخ کاشت ۹ مهر و ۱۵ بهمن، کشت تابستانه به طور قابل توجهی از گرمای تابستان فرار کرده و دوره رشد رویشی طولانی‌تری در دمای مطلوب پاییز داشته است. همچنین رقم مهرگان که برای شرایط تنش انتخاب شده، در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن (شرایط ملایم‌تر) واکنش ضعیف‌تری نشان داده، اما در تاریخ کاشت ۹ مهر و ۱۵ بهمن (شرایط تنش‌زاتر) مکانیسم‌های تحمل خود را فعال کرده و سطح برگ بالاتری حفظ نموده است (Fischer, 2011).

1 - Net assimation rate, NAR
2 - Leaf area duration, LAD

جدول ٤- تجزیه واریانس مرکب اثر تاریخ کاشت متوالی و رقم بر ماده خشک کل (TDW)، شاخص سطح برگ (LAI) و سرعت رشد محصول (CGR) گندم

Table 4- Combined analysis of variance for the effect of sequential sowing date and cultivar on total dry weight (TDW), leaf area index (LAI) and crop growth rate (LAI) of wheat

منابع تغییرات S.O. V	درجه آزادی df	ماده خشک کل Total dry weight (TDW)			شاخص سطح برگ Leaf area index (LAI)			سرعت رشد محصول Crop growth rate (CGR)		
		تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean	تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean	تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean
سال Year (Y)	1	20760.99 ns	2655.2 ns	2141.749 ns	0.003 ns	0.002 ns	0.0024 ns	8.95 ns	0.63 ns	1.21 ns
بلوک (سال) Replication	4	55077.92**	43810.98**	40775.97**	0.248**	0.214**	0.231**	12.15**	13.19**	9.63**
تاریخ کاشت Sowing date (T)	3	83013.84 **	56450.53 **	62374.576 **	0.175 **	0.15 **	0.163 **	32.75 **	22.26 **	24.69 **
Y × T	3	41.18 ns	24.9 ns	163.230 ns	0.004819 ns	0.004 ns	0.004496 ns	0.07 ns	0.01 ns	0.05 ns
خطای کرت اصلی Main plot error	12	6596.0	4870.26	5720.5395	0.0055	0.01	0.0052	2.41	1.78	2.09
رقم Cultivar (V)	3	56019.65 **	34143.31 **	44132.354 **	0.04742 *	0.03 **	0.03549 **	22.25 **	13.82 **	17.68 **
Y × V	3	19.34 ns	12.011 ns	4.51605 ns	0.01928 *	0.001 ns	0.006582 ns	0.07 ns	0.052 ns	0.06 ns
T × V	9	26545.79 **	16568.01 **	22520.695 **	0.0263 ns	0.04 **	0.0316 **	10.99 **	6.91 **	9.33 **
Y × T × V	9	10.05 ns	17.91 ns	188.858557 ns	0.01165 *	0.001 ns	0.00314 ns	0.04 ns	0.02 ns	0.097 ns
خطای کرت فرعی Sub plot error	48	2625.82	1782.57	2145.7149	0.005	0.004	0.0044	1.01	0.7	0.83
CV (%)		7.46	10.29	7.32	5.98	8.73	7.82	7.5	10.38	7.38

** و *: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد :ns غیرمعنی‌دار.

** and *: significant at 1% and 5% levels, respectively; ns: non-significant.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل تاریخ کاشت و رقم بر ماده خشک کل، شاخص سطح برگ و سرعت رشد محصول گندم

Table 5- Mean comparison of the interaction effect of sowing date and cultivar on total dry weight, leaf area index and crop growth rate of wheat

تاریخ کاشت Sowing date	رقم Cultivar	ماده خشک کل Total dry weight (TDW) ($g\ m^{-2}$)			شاخص سطح برگ Leaf area index (LAI)			سرعت رشد محصول Crop growth rate (CGR) ($g\ m^{-2}.\ day^{-1}$)		
		تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean	تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean	تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean
۲۰ شهریور و ۲۵ دی September 11 and January 15	آینه Ayeeneh	867.32 a*	490.89 f	539.15 d	4.12 f	4.20 bc	4.26 ab	11.43 e	9.56 e	10.50 d
	چمران۲ Chamran-2	795.20 b	503.60 ef	546.28 d	4.01 g	4.15 cde	4.20 bc	11.46 e	9.81 de	10.64 d
	سارنگ Sarang	760.08 bc	541.62 def	594.67 d	4.11 f	4.25 ab	4.26 ab	12.59 de	10.53 de	11.56 cd
	مهرگان Mehregan	756.09 bc	503.10 ef	560.77 d	3.99 g	4.07 fg	4.11 cd	11.47 e	9.80 de	10.92 d
۳۰ شهریور و ۳۰ دی September 21 and January 20	آینه Ayeeneh	754.87 bc	624.74 b	685.57 bc	4.25 abc	4.16 cd	4.21 b	14.54 bc	12.17 b	13.36 bc
	چمران۲ Chamran-2	746.41 bc	646.47 b	700.67 bc	4.23 bcde	4.14 cdef	4.18 bc	14.83 bc	12.71 b	13.77 bc
	سارنگ Sarang	709.09 cd	632.86 b	694.47 bc	4.26 b	4.18 bcd	4.22 ab	14.73 bc	12.33 b	13.53 bc
	مهرگان Mehregan	657.85 de	560.65 cd	593.86 d	4.15 cef	4.07 efg	4.11 cd	12.75 de	10.89 cd	11.53 cd
۹ مهر و ۱۰ بهمن October 1 and January 30	آینه Ayeeneh	589.64 e	550.06 def	603.95 d	4.15 ef	4.05 g	4.09 d	12.38 de	10.70 de	11.74 cd
	چمران۲ Chamran-2	588.95 e	722.94 a	795.13 a	4.11 f	3.94 h	3.98 e	12.54 de	14.32 a	15.74 a
	سارنگ Sarang	588.90 e	656.70 b	725.95 b	4.29 ab	4.04 g	4.08 d	14.80 bc	12.79 b	14.13 b
	مهرگان Mehregan	587.41 e	504.08 ef	546.86 d	4.29 ab	3.92 h	3.96 e	13.81 cd	9.82 de	10.65 d
۱۹ مهر و ۱۵ بهمن October 11 and February 4	آینه Ayeeneh	656.62 de	535.70 def	585.91 d	4.33 a	4.08 efg	4.11 cd	12.79 de	10.43 de	11.41 cd
	چمران۲ Chamran-2	647.73 de	555.04 de	599.59 d	4.24 abcd	4.03 g	4.07 d	17.17 a	10.81 d	11.67 cd
	سارنگ Sarang	644.15 de	635.67 b	697.87 bc	4.28 ab	4.10 defg	4.19 bc	15.47 b	12.38 b	13.59 bc
	مهرگان Mehregan	636.12 e	607.25 bc	658.17 c	4.15 cef	4.30 a	4.30 a	12.48 de	11.83 bc	12.82 c

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف مشابه اختلاف معنی‌داری ندارند (دانکن، ۵٪).

* In each column, means with the same letter are not significantly different (Duncan's test, 5%).

نتایج تحقیق حاضر مبنی بر کاهش شاخص سطح برگ با تأخیر در کاشت، با گزارش‌های متعددی مطابقت دارد که کاهش این شاخص را در تاریخ‌های کاشت دیرهنگام به دلیل تنش گرمایی و کوتاه شدن دوره رشد رویشی ذکر کردند (Asseng et al., 2015). نشان داده شده است که تنش گرمایی ناشی از کاشت دیرهنگام، باعث تسریع پیری برگ و کاهش سطح سبز مؤثر می‌شود (Liu et al., 2016). تأکید شده است که انتخاب رقم با پتانسیل رشد برگ بالاتر و مقاومت به تنش، می‌تواند اثرات منفی تاریخ کاشت نامناسب بر شاخص سطح برگ را کاهش دهد (Thakur et al., 2010).

سرعت رشد محصول (CGR): اثر اصلی تاریخ کاشت، اثر اصلی رقم و اثر متقابل تاریخ کاشت × رقم بر سرعت رشد محصول در هر دو کشت تابستانه و زمستانه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۴). در میانگین دو کشت، بیشترین سرعت رشد محصول مربوط به تاریخ کاشت ۹ مهر و ۱۰ بهمن با رقم چمران ۲ (۱۵/۷۴ گرم بر مترمربع در روز) و پس از آن رقم سارنگ در همان تاریخ (۱۴/۱۳ گرم بر مترمربع در روز) بود. کمترین سرعت رشد محصول در تاریخ کاشت ۲۰ شهریور و ۲۵ دی با ارقام آینه (۱۰/۵۰)، مهرگان (۱۰/۹۲) و چمران ۲ (۱۰/۶۴) مشاهده شد. رقم مهرگان نیز در تاریخ‌های کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن کمترین سرعت رشد را داشت (۱۰/۶۵) (جدول ۵). تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن ظاهراً بهترین هماهنگی را بین مرحله رشد سریع گیاه با شرایط محیطی (دمای معتدل پاییز و اوایل بهار) فراهم کرده است. رقم چمران ۲ با دوره رشد طولانی‌تر (۱۳۵ روز) و تحمل گرمایی، از این پنجره مطلوب بهینه‌ترین استفاده را برده است. در مقابل، سرعت رشد پایین در تاریخ کاشت ۲۰ شهریور و ۲۵ دی می‌تواند به‌دلیل پایین بودن دما در ابتدای دوره رشد (زمستان برای کشت دوم) و در نتیجه کُندی فرآیندهای فیزیولوژیک باشد. همچنین در تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن، اگرچه شاخص سطح برگ بالایی ثبت شد، امّا سرعت رشد محصول پایین‌تر از ۹ مهر و۱۰ بهمن بود که نشان‌دهنده کاهش کارآیی فتوسنتز در واحد سطح برگ در این تیمار می‌باشد. نتایج این مطالعه از این نظر که سرعت رشد محصول تحت تأثیر شدید تعامل تاریخ کاشت و رقم قرار دارد، با یافته‌های متعددی همخوانی دارد. گزارش شده است که تنش گرمایی ناشی از کاشت زودهنگام در مناطق گرمسیر می‌تواند سرعت رشد محصول را کاهش دهد (Asseng et al., 2015). همچنین نشان داده شده است که توزیع مطلوب دما در طول مرحله رشد رویشی سریع، کلید دستیابی به سرعت رشد محصول بالا است (Hatfield & Prueger, 2015). تأکید شده است که انتخاب رقم مناسب برای هر تاریخ کاشت خاص، یک راهکار مدیریتی کلیدی برای افزایش سرعت رشد و نهایتاً عملکرد است (Fischer, 2011). مطالعات نشان می‌دهد که تاریخ کاشت میانی (اوایل مهر در مناطق گرم) اغلب بالاترین سرعت رشد را برای گندم فراهم می‌کند (Slafer & Rawson, 1994).

سرعت جذب خالص (NAR): اثر تاریخ کاشت، اثر رقم و اثر متقابل تاریخ کاشت × رقم بر سرعت جذب خالص در هر دو کشت تابستانه و زمستانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). در میانگین دو کشت، بیشترین سرعت جذب خالص مربوط به تاریخ کاشت ۹ مهر و ۱۰ بهمن ارقام چمران ۲ (۱۶/۱۸ گرم بر مترمربع در روز) و سارنگ (۱۳/۱۷گرم بر مترمربع در روز) بود. کمترین سرعت جذب خالص در تاریخ کاشت ۲۰ شهریور/ ۲۵ دی ارقام آینه (۸/۵۴)، چمران ۲ (۸/۸۸) و سارنگ (۹/۰۰) مشاهده شد (جدول ۷). سرعت جذب خالص به کارآیی فتوسنتز خالص در واحد سطح برگ اشاره دارد. مقادیر بالاتر سرعت جذب خالص در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن و برای ارقام چمران ۲ و سارنگ، نشان‌دهنده کارآیی فتوسنتزی بالاتر این تیمارها در تبدیل انرژی به ماده خشک است. این امر می‌تواند ناشی از هماهنگی مناسب مرحله رشد سریع گیاه با شرایط دمایی معتدل پاییز و اوایل بهار در این تاریخ کاشت و همچنین پایداری بیشتر دستگاه فتوسنتزی این ارقام تحت شرایط منطقه باشد. در مقابل، پایین بودن سرعت جذب خالص در تاریخ کاشت ۲۰ شهریور و ۲۵ دی احتمالاً به‌دلیل قرارگیری مرحله رشد رویشی در دمای پایین زمستان (برای کشت زمستانه) و در نتیجه کاهش نرخ فتوسنتز می‌باشد. نکته قابل توجه اینکه در تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن، اگرچه شاخص سطح برگ بالایی ثبت شد، امّا سرعت جذب خالص در کشت تابستانه برای رقم چمران ۲ بسیار بالا (۱۷/۰۶) و در کشت زمستانه پایین‌تر بود که نشان‌دهنده تأثیر منفی تنش گرمایی اواخر بهار بر کارآیی فتوسنتز در این تیمار می‌باشد.

جدول ٦- تجزیه واریانس مرکب اثر تاریخ کاشت متوالی و رقم بر سرعت جذب خالص (NAR)، دوام سطح برگ (LAD) و عملکرد دانه گندم

Table 6- Combined analysis of variance for the effect of sequential sowing date and cultivar on net assimilation rate (NAR), leaf area duration (LAD) and grain yield of wheat

منابع تغییرات S.O. V	درجه آزادی df	سرعت جذب خالص Net assimilation rate (NAR)			دوام سطح برگ Leaf area duration (LAD)			عملکرد دانه Grain yield		
		تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean	تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean	کشت تابستانه Summer	کشت زمستانه Winter	میانگین Mean
سال Year (Y)	1	6.83 ns	1.14 ns	0.6 ns	0.87 ns	0.75 ns	0.81 ns	304099.98 ns	2497.16 ns	90427.78 ns
بلوک (سال) Replication	4	23.38**	1.45**	8.42**	84.06**	73.25**	78.56**	192019.87**	227782.62**	60503.93**
تاریخ کاشت Sowing date (T)	3	68.11 **	51.82 **	57.67 **	58.05 **	50.53 **	54.301 **	399379.1 **	139386.72 **	18158.53 *
Y × T	3	0.47 ns	0.34 ns	0.36 ns	1.61 ns	1.4 ns	1.51 ns	6736.31 ns	3909.17 ns	1344.88 ns
خطای کرت اصلی Main plot error	12	1.71	1.65	1.56	1.85	2.09	1.74	11780.2	5741.11	29730.5
رقم Cultivar (V)	3	18.29 **	15.52 **	16.67 **	10.79 **	12.03 **	11.39 **	109781.36 **	24709.99 **	33988.93 **
Y × V	3	0.1 ns	0.104 ns	0.1 ns	0.23 ns	0.183 ns	0.2 ns	1390.787 ns	580.025 ns	779.76 ns
T × V	9	10.81 **	8.01 **	9.76 **	16.81 **	14.6 **	15.65 **	6806.55 ns	40592.25 **	10126.56 ns
Y × T × V	9	0.12 ns	0.07 ns	0.12 ns	0.27 ns	0.23 ns	0.25 ns	5256.51 ns	641.56 ns	3902.77 ns
خطای کرت فرعی Sub plot error	48	1.12	0.84	0.98	1.71	1.73	1.74	4888.83	3687.07	2433.85
CV (%)		9.22	8.81	9.07	6.05	8.5	6.31	4.76	9.72	3.9

** و *: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد ns: غیرمعنی‌دار.

** and *: significant at 1% and 5% levels, respectively; ns: non-significant.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل تاریخ کاشت و رقم بر سرعت جذب خالص، دوام سطح برگ و عملکرد دانه گندم

Table 7- Mean comparison of the interaction effect of sowing date and cultivar on net assimilation rate, leaf area duration and grain yield of wheat

تاریخ کاشت Sowing date	رقم Cultivar	سرعت جذب خالص Net assimilation rate (TDW) ($g\ m^{-2}.\ day^{-1}$)			دوام سطح برگ Leaf area duration (LAD) (days)			عملکرد دانه Grain yield ($kg.\ ha^{-1}$)		
		تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean	تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean	تابستانه Summer	زمستانه Winter	میانگین Mean
۲۰ شهریور و ۲۵ دی September 11 and January 15	آینه Ayeeneh	9.05 h*	8.04 h	8.54 i	23.42 bc	21.99 bc	22.70 bc	1326.84 gh	1148.42 bc	1237.64 cd
	چمران۲ Chamran-2	9.25 h	8.52 gh	8.88 hi	22.55 cde	21.01 cdef	21.78 cde	1312.09 h	1107.57 cde	1209.83 d
	سارنگ Sarang	9.52 gh	8.48 gh	9.00 ghi	24.40 ab	22.91 ab	23.65 ab	1403.04 efgh	1196.48 ab	1299.76 bc
	مهرگان Mehregan	10.08 efgh	9.32 efg	9.94 efgh	20.94 efg	19.44 fgh	20.23 efg	1423.79 def	1024.97 fg	1226.15 d
۳۰ شهریور و ۳۰ دی September 21 and January 20	آینه Ayeeneh	11.74 cd	10.47 cde	11.10 cde	22.82 bcd	21.44 bcde	22.13 bcd	1341.11 fgh	1118.49 cd	1229.80 d
	چمران۲ Chamran-2	12.12 cd	11.19 c	11.65 cd	22.23 cdef	20.71 cdefg	21.47 cdef	1356.01 fgh	1091.59 cdef	1223.80 d
	سارنگ Sarang	11.83 cd	10.54 cd	11.19 cde	23.05 bcd	21.63 bcd	22.34 bcd	1391.01 efgh	1130.41 bcd	1260.72 cd
	مهرگان Mehregan	11.24 def	10.23 cdef	10.49 def	20.94 efg	19.59 fgh	20.23 efg	1500.37 cd	1031.99 efg	1264.42 cd
۹ مهر و ۱۰ بهمن October 1 and January 30	آینه Ayeeneh	10.72 defg	10.30 cdef	10.95 cde	21.06 efg	19.29 fgh	19.93 fg	1593.76 b	1008.57 g	1301.17 bc
	چمران۲ Chamran-2	11.29 de	15.31 a	16.18 a	20.14 g	17.13 i	17.75 h	1631.10 b	902.33 h	1266.72 cd
	سارنگ Sarang	12.73 c	12.34 b	13.17 b	21.52 defg	19.13 gh	19.75 fg	1602.85 b	999.11 g	1300.99 bc
	مهرگان Mehregan	9.91 fgh	10.68 cd	11.14 cde	25.42 a	16.81 i	17.42 h	1787.97 a	885.67 h	1336.82 b
۱۹ مهر و ۱۵ بهمن October 11 and February 4	آینه Ayeeneh	11.60 cd	9.62 defg	10.17 efg	20.56 fg	19.77 efgh	20.42 efg	1450.60 de	1033.13 efg	1241.87 cd
	چمران۲ Chamran-2	17.06 a	10.44 cde	10.86 cde	18.37 h	18.78 h	19.46 g	1417.92 defg	989.24 g	1203.58 d
	سارنگ Sarang	13.99 b	11.35 bc	12.04 bc	20.38 g	20.20 defgh	20.86 defg	1412.57 defg	1055.66 defg	1234.12 cd
	مهرگان Mehregan	11.60 cd	9.13 fgh	9.52 fghi	18.03 h	23.68 a	24.55 a	1567.78 bc	1248.41 a	1408.10 a

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف مشابه اختلاف معنی‌داری ندارند (دانکن، ٪۵).

* In each column, means with the same letter are not significantly different (Duncan's test, 5%).

مطابق با یافته‌های تحقیق حاضر، گزارش شده است که ارقام مختلف گندم از نظر کارایی فتوسنتزی واکنش متفاوتی به تاریخ کاشت نشان می‌دهند (Acevedo, 2002). تأکید شده است که سرعت جذب خالص بیشتر تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دما و نور در مقایسه با عوامل ژنتیکی می‌باشد (Hatfield & Prueger, 2015). همچنین نشان داده شده است که تنش گرمایی می‌تواند به شدت سرعت جذب خالص را با تأثیر بر آنزیم‌های کلیدی فتوسنتز کاهش دهد (Asseng et al., 2015). دریافتند که ارقام متحمل به گرما، توانایی حفظ سرعت جذب خالص بالاتری را در شرایط تنش انتهای فصل دارند (Wahid et al., 2007).

دوام سطح برگ (LAD): اثر اصلی تاریخ کاشت، اثر اصلی رقم و اثر متقابل تاریخ کاشت × رقم بر دوام سطح برگ در هر دو کشت تابستانه و زمستانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). در میانگین دو کشت، بیشترین دوام سطح برگ مربوط به رقم مهرگان در تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن (۲۴/۵۵ روز) بود. دومین دوام سطح برگ مربوط به رقم سارنگ در تاریخ کاشت ۲۰ شهریور و ۲۵ دی (۲۳/۶۵ روز) بود. کمترین دوام سطح برگ نیز مربوط به رقم چمران ۲ در تاریخ کاشت ۹ مهر و ۱۰ بهمن (۱۷/۷۵ روز) مشاهده شد (جدول ۷). دوام سطح برگ شاخصی از طول دوره فعالیت فتوسنتزی کل گیاه است. رقم مهرگان که برای شرایط دشوار (تنش‌آبی و شوری) انتخاب شده، توانسته است در تاریخ کاشت دیرتر (۹ مهر و ۱۵ بهمن) سطح برگ خود را برای مدت طولانی‌تری حفظ کند که می‌تواند یک مکانیزم تحمل برای جبران دوره رشد کوتاه‌تر در شرایط تنش باشد. رقم سارنگ نیز در تاریخ کاشت اولیه (۲۰ شهریور و ۲۵ دی) با فراهم آمدن یک دوره رشد طولانی و بدون تنش شدید، بیشترین دوام سطح برگ را نشان داد. کاهش شدید دوام سطح برگ در رقم چمران۲ در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن ممکن است نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این رقم به همزمانی مراحل حساس رشد با اوج تنش‌های دمایی در این تاریخ خاص و تسریع در پیری برگ‌ها باشد (Reynolds et al., 2012). نتایج این پژوهش مبنی بر تأثیر معنی‌دار تاریخ کاشت و رقم بر دوام سطح برگ با گزارش‌های متعددی هماهنگی دارد که کاهش دوام سطح برگ را با تأخیر در کاشت و افزایش تنش گرمایی مرتبط دانستند (Prasad et al., 2011). اعلام کردند که دوام سطح برگ یک شاخص کلیدی در تعیین عملکرد نهایی است و مدیریت تاریخ کاشت ابزاری برای بهینه‌سازی آن محسوب می‌شود (Richards et al., 2014). در مدل‌سازی رشد گیاه نشان دادند که افزایش دوام سطح برگ اغلب تأثیر مستقیم‌تری بر عملکرد نهایی نسبت به افزایش لحظه‌ای سرعت فتوسنتز دارد (Sinclair & Muchow, 2013).

عملکرد دانه: اثر اصلی تاریخ کاشت در کشت تابستانه در سطح یک درصد و در کشت زمستانه در سطح یک درصد، اثر اصلی رقم در هر دو کشت در سطح یک درصد و اثر متقابل تاریخ کاشت × رقم فقط در کشت زمستانه در سطح یک درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۶). در میانگین دو کشت، بیشترین عملکرد دانه مربوط به رقم مهرگان در تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن (۱۴۰۸ کیلوگرم در هکتار) بود. پس از آن، رقم مهرگان در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن (۱۳۳۷ کیلوگرم در هکتار) و رقم سارنگ در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن (۱۳۰۱ کیلوگرم در هکتار) قرار گرفتند. کمترین عملکرد نیز مربوط به رقم چمران ۲ در تاریخ‌های کاشت ۲۰ شهریور و ۲۵ دی (۱۲۱۰ کیلوگرم در هکتار) و ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن (۱۲۰۴ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول ۷). عملکرد دانه نهایی، حاصل تعامل پیچیده تمام شاخص‌های رشدی مورد بررسی است. رقم مهرگان با وجود داشتن مقادیر متوسط یا حتی پایین برخی شاخص‌های فیزیولوژیک (مانند سرعت رشد محصول و سرعت جذب خالص)، امّا با داشتن دوام سطح برگ بسیار بالا (۲۴/۵۵ روز) و شاخص سطح برگ (۴/۳۰) در ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن، موفق به تولید بیشترین عملکرد دانه شده است. این یافته بر اهمیت "دوام" و "پایداری" در شرایط تنش انتهای فصل در مناطق گرم و خشک تأکید دارد. عملکرد نسبتاً پایین رقم چمران ۲ علی‌رغم برتری در برخی شاخص‌های فیزیولوژیک (مانند سرعت رشد محصول و سرعت جذب خالص در تاریخ کاشت ۹ مهر و ۱۰ بهمن، می‌تواند ناشی از کاهش شدید دوام سطح برگ (۱۷/۷۵ روز در ۹ مهر و۱۰ بهمن) و شاخص سطح برگ (۳/۹۸) و احتمالاً تأثیر تنش گرمایی بر فرآیندهای زایشی مانند گرده‌افشانی و پُر شدن دانه باشد. رقم سارنگ نیز با وجود عملکرد قابل قبول در تاریخ کاشت ۹ مهر و۱۰ بهمن (۱۳۰۱ کیلوگرم در هکتار)، نتوانست به سطح عملکرد رقم مهرگان در تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن دست یابد. مطابق با نتایج این تحقیق، گزارش شده است که در مناطق گرمسیر، ارقام متحمل به خشکی و گرما (مانند مهرگان) در تاریخ‌های کاشت دیرتر

اغلب عملکرد پایدارتری دارند (Bahalkeh et al., 2021). یوسف و همکاران (Yusuf et al., 2019) نشان دادند که اثر متقابل تاریخ کاشت × رقم بر عملکرد دانه بسیار معنی‌دار است و نمی‌توان یک توصیه کلی برای تاریخ کاشت ارائه داد. کاوا و همکاران (Kawa et al., 2021) تأکید کردند که در شرایط تغییر اقلیم و افزایش دما، انتخاب ارقام با پایداری عملکرد در تاریخ‌های کاشت مختلف یک اولویت است. رن و همکاران (Ren et al., 2019) نیز دریافتند که در فلات لس چین، تاریخ کاشت دیرهنگام‌تر برای ارقام خاصی منجر به استفاده کارآمدتر از آب ذخیره شده زمستانه و عملکرد بالاتر شد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که اجرای سیستم کشت متوالی گندم (تابستانه–زمستانه) در شرایط گرم و خشک امکان‌پذیر است، امّا موفقیت و بهره‌وری آن به‌طور حیاتی وابسته به مدیریت هم‌زمان دو عامل ژنتیکی و زراعی، یعنی انتخاب رقم مناسب و تعیین تاریخ کاشت بهینه، برای کاهش اثرات تنش‌های دمایی است. نتایج به‌وضوح تمایز بین پتانسیل شاخص‌های فیزیولوژیک و پایداری عملکرد نهایی را آشکار کرد. اگرچه ارقامی مانند چمران ۲ و سارنگ در برخی تاریخ‌های کاشت، شاخص‌های فیزیولوژیک با نرخ بالا (مانند سرعت رشد محصول و سرعت جذب خالص) را نشان دادند، امّا به دلیل کاهش دوام سطح برگ و شاخص سطح برگ و احتمالاً آسیب‌پذیری بیشتر در مراحل زایشی حساس، نتوانستند این مزیت را به برتری در عملکرد کل تبدیل کنند. در مقابل، رقم مهرگان که برای شرایط تنش‌آبی و شوری اصلاح شده است، با وجود مقادیر متوسط در برخی شاخص‌های رشدی، به‌ویژه با حفظ دوام سطح برگ بسیار بالا، موفق شد در تاریخ کاشت نسبتاً دیر (۱۹ مهر) به بیشترین عملکرد کل دست یابد. این یافته بر اهمیت کلیدی "پایداری و تحمل" در مواجهه با تنش گرمایی انتهای فصل و نقش محوری دوام سطح برگ و شاخص سطح برگ به‌عنوان شاخصی تعیین‌کننده در این شرایط تأکید می‌کند. به‌طور کلی، برای دستیابی به عملکرد اقتصادی و پایدار در سیستم کشت در مناطق گرمسیری مشابه شاووور–خوزستان، اولویت باید بر انتخاب ارقام متحمل و سازگار باشد که قادر به حفظ سطح سبز و فعالیت فتوسنتزی در طول دوره رشد، به‌ویژه در برابر دماهای پایان فصل هستند. در این میان، رقم مهرگان در تاریخ کاشت ۱۹ مهر و ۱۵ بهمن می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب معرفی شود.

References

1. Acevedo, E., Silva, P., & Silva, H. (2002). Wheat growth and physiology. *FAO Plant Production and Protection Series*, *30*, 39-70.
2. Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Izaurralde, R. C., Jabloun, M., Jones, C. D., Kersebaum, K. C., Koehler, A.-K., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J. E., Palosuo, T., Priesack, E., Rezaei, E. E., Ruane, A. C., Semenov, M. A., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z., & Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, *5*(2), 143-147. https://doi.org/10.1038/nclimate2470
3. Climate Data. (2015). *Climate: Khuzestan*. https://en.climate-data.org/asia/iran/khuzestan-2094/
4. Bahalkeh, G., Biabani, A., Sabouri, H., & Fallahi, H. (2021). Effect of sowing date on grain yield and yield components of wheat cultivars under dryland condition. *International Journal of Food Science and Agriculture*, *5*(4), 574-583. https://doi.org/ 5. 574-583. 10.26855/ijfsa.2021.12.003 .
5. FAO. (2022). *Wheat production in arid and semi-arid regions: Cultivar selection and management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/wheat-production
6. Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. M. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *33*(4), 331-349. https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291
7. Fischer, R. A. (2011). Wheat physiology: A review of recent developments. *Crop and Pasture Science*, *62*(2), 95-114. https://doi.org/10.1071/CP10344
8. Hamzei, J., & Zarei, M. (2024). Evaluation of growth indices, yield performance and advantages in intercropping of wheat, soybean and corn. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *34*(3), 1-18. (In Persian).

https://doi.org/10.22034/saps.2023.54328.2953
9. Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes, 10*, 4-10. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001
10. Hunt, R. (1978). *Plant growth analysis*. CABI Databases, 67pp. U.K.
11. Jafari, A., Rahnama, A., & Lorzadeh, S. (2021). Evaluation effective traits on crop production of bread wheat under warm and dry climate condition (Khuzestan province, southwest of Iran). *Journal of Crop Nutrition Science, 7*(4), 46-58. (In Persian). https://oicpress.com/jcns/article/view/5959
12. Javahari, M. (2022). Identification and introduction of new bread wheat cultivars to replace old cultivars in warm regions of Kerman province. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*. *4* (1): 87-95. (In Persian).
13. Kawa, A.A., Amin, S.M., & Abdullah, R.A. (2021). Late sowing date influence on wheat and triticale crop yields as a drought management tool. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 20*(5), 353-358. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.04.002
14. Koocheki, A., & Sarmadnia, G. H. (2013). *Physiology of Crop Plants* (F. P. Gardner, R. B. Pearce, & R. L. Mitchell, Authors). Jihad Daneshgahi Press, Mashhad Branch, 400 pp. (In Persian).
15. Li, L., Guan, X., Wen, P., & Wang, T. (2026). Advancement and challenges of wheat-maize double cropping system in China. *Crop and Environment, 5*(3), 100131. https://doi.org/10.1016/j.crope.2026.100131
16. Liu, B., Asseng, S., Müller, C., Ewert, F., Elliott, J., Lobell, D. B., Martre, P., Ruane, A. C., Wallach, D., Jones, J. W., Rosenzweig, C., Aggarwal, P. K., Alderman, P. D., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Cammarano, D., Challinor, A., Deryng, D., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Folberth, C., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Izaurralde, R. C., Jabloun, M., Jones, C. D., Kersebaum, K. C., Kimball, B. A., Koehler, A.-K., Kumar, S. N., Nendel, C., O'Leary, G. J., Olesen, J. E., Ottman, M. J., Palosuo, T., Prasad, P. V. V., Priesack, E., Pugh, T. A. M., Reynolds, M., Rezaei, E. E., Rötter, R. P., Schmid, E., Semenov, M. A., Shcherbak, I., Stehfest, E., Stöckle, C. O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P., Waha, K., Wall, G. W., Wang, E., White, J. W., Wolf, J., Zhao, Z., & Zhu, Y. (2016). Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. *Nature Climate Change, 6*(12), 1130-1136. https://doi.org/10.1038/nclimate3115
17. Prasad, P. V. V., Pisipati, S. R., Momčilović, I., & Ristic, Z. (2011). Independent and combined effects of high temperature and drought stress during grain filling on plant yield and chloroplast EF-Tu expression in spring wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science, 197*(6), 430-441. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00477.x
18. Radford, P. J. (1967). Growth analysis formulae – their use and abuse. *Crop Science, 7*(3), 171-175. https://doi.org/10.2135/cropsci1967.0011183X000700030001x
19. Rahmati, H., & Nakhzari Moghadam, A. (2023). Evaluation of agronomic and physiological characteristics of durum wheat cultivars under rainfed and supplementary irrigation conditions. *Cereal Biotechnology and Biochemistry, 2*(4), 446-467. (In Persian. https://doi.org/10.22126/cbb.2024.10445.1068
20. Ren, A., Sun, M., Wang, P., Xue, L., Lei, M., Xue, J., & Yang, Z. (2019). Optimization of sowing date and seeding rate for high winter wheat yield based on pre-winter plant development and soil water usage in the Loess Plateau. *Journal of Integrative Agriculture, 18*(1), 33-42. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61980-X
21. Reynolds, M. P., Foulkes, M. J., Slafer, G. A., Berry, P., Parry, M. A. J., Snape, J. W., & Angus, W. J. (2012). Achieving yield gains in wheat. *Plant, Cell & Environment, 35*(10), 1799-1823. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02588.x
22. Richards, R. A., Rebetzke, G. J., Watt, M., Condon, A. G., Spielmeyer, W., & Dolferus, R. (2014). Breeding for improved water productivity in temperate cereals: Phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Functional Plant Biology, 41*(2), 135-148. https://doi.org/10.1071/FP09219
23. Sadras, V. O., & Calderini, D. F. (2015). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy* (2nd ed.). Academic Press. 564 pages
24. Sinclair, T. R., & Muchow, R. C. (2013). Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy, 65*, 215-265. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60914-1
25. Slafer, G. A., & Rawson, H. M. (1994). Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Australian Journal of Plant Physiology, 21*(4), 393-426. https://doi.org/10.1071/PP9940393

26. Thakur, P., Kumar, S., Malik, J. A., Berger, J. D., & Nayyar, H. (2010). Cold stress effects on reproductive development in grain crops: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, *67*(3), 429-443. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.09.004
27. Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, *61*(3), 199-223. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011
28. Yusuf, M., Kumar, S., Dhaka, A., Singh, B., & Bhuker, A. (2019). Effect of sowing dates and varieties on yield and quality performance of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agricultural Science Digest - A Research Journal*, *39*(4): 306-310. https://doi.org/ 10.18805/ag. D-4977

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 18, No. 2, 2026, p. 229-246

Agronomic, Ecological, and Economic Evaluation of Barley (*Hordeum vulgare* L.) and Vetch (*Vicia panonica*) Intercropping in Rotation with Rice (*Oryza sativa* L.) in Paddy Fields

Mohammad Rabiee[1*] and Sajjad Shaker Kouhi[1]

1- Department of Seed Improvement, Rice Research Institute, Rasht, Iran
(*- Corresponding author's Email: m.rabiee@areeo.ac.ir)

Received: 25-04-2026
Revised: 26-07-2026
Accepted: 29-07-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:
Rabiee, M., & Shaker Kouhi, S. (2026). Agronomic, ecological, and economic evaluation of barley (*Hordeum vulgare* L.) and vetch (*Vicia panonica*) intercropping in rotation with rice (*Oryza sativa* L.) in paddy fields. *Journal of Agroecology*, *18*(2), 229-246. (In Persian)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.98402.1272

Introduction

Intercropping is the growing of two or more crop species simultaneously in the same field during a growing season. This system has been considered a method in which resources can be utilized more efficiently, consequently improving plant production. Intercropping annual forage legumes with winter cereals after rice (*Oryza sativa* L.) harvesting in paddy fields of the Northern provinces of Iran can be an effective strategy to provide fodder for livestock, increase land productivity, improve the sustainability of rice production, increase paddy farmers' income, and thus prevent migration of villagers. Therefore, this study was carried out with the aim of agronomical, ecological, and economic evaluation of barley (*Hordeum vulgare* L.) and vetch (*Vicia panonica*) intercropping in rotation with rice in paddy fields of Guilan province.

Materials and Methods

This study was conducted based on a Randomized Complete Block Design with three replications at the research fields of the Rice Research Institute of Iran in Rasht during two cropping seasons of 2023-2024 and 2024-2025. The experimental treatments included intercropping of barley and vetch with replacement ratios of 3:1 (three rows of barley + one row of vetch), 1:3 (one row of barley + three rows of vetch), 1:1 (one row of barley + one row of vetch), and 2:2 (two rows of barley + two rows of vetch), and sole cropping of barley and vetch. In this study, traits such as fresh and dry forage yield, crude protein content, protein yield and forage ash were evaluated. The beneficial indicators of intercropping, including land equivalent ratio[2], actual yield loss[3], relative crowding coefficient[4], intercropping advantage[5], monetary advantage index,[1] and system productivity

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.98402.1272

1- SPI
2- LER
3- AYL
4- K
5- IA

index, were calculated.

Results and Discussion

The results of combined analysis of variance indicated that the cropping pattern had a significant effect on all studied traits. Mean comparison showed that the first year of the experiment had higher fresh and dry forage yields (40661 and 9977 kg ha^{-1}, respectively) compared to the second year. Among different planting patterns, the highest fresh forage yield (42325 kg ha^{-1}) and dry forage yield (11550 kg ha^{-1}) were obtained from 1:1 barley: vetch intercropping. The ratio of 3:1 barley: vetch was in the next position. The lowest fresh forage yield (36535 kg ha^{-1}) and dry forage yield (7095 kg ha^{-1}) were related to monoculture of vetch. Increasing vetch percentage in intercropping resulted in increased crude protein content, forage ash, and consequently, increased forage quality. The maximum protein yield (1548 kg ha^{-1}) was obtained from 1:1 barley: vetch intercropping. LER in all intercropping treatments was more than one, except the 1:3 barley: vetch treatment. The highest values of this index were obtained in the 1:1 and 3:1 barley: vetch treatments, respectively. The total AYL values were positive for ratios of 3:1, 1:1, and 2:2 barley: vetch. The ratio of 1:1 barley: vetch had the highest total AYL (0.68). The higher values of the K index for barley indicate the competitive superiority of barley over vetch. The maximum value of total K (5.55) was revealed at a ratio of 1:1 barley: vetch. The ratio of 3:1 barley: vetch was also ranked next. The ratios of 3:1, 1:1, and 2:2 barley: vetch with IA (7554), (6230), and (3446) were ranked first to third, respectively. The highest MAI was observed in the ratios of 1:1 (29449141) and 3:1 (20246333) barley: vetch, respectively. The increased MAI index in these ratios can be attributed to the higher LER and total K. The SPI was positive across all intercropping ratios, indicating the overall effectiveness of intercropping. According to the results, the maximum value of SPI was obtained from 1:1 (1579) and 3:1 (1511) barley: vetch treatments, respectively.

Conclusion

According to the results of the present study, to achieve optimal yield, as well as greater economic advantage, the ratios of 1:1 and 3:1 barley: vetch are recommended as the most suitable intercropping combinations for the second crop after rice harvesting in paddy fields of Guilan province, respectively.

Keywords: Advantage, Forage yield, Land equivalent ratio, Second crop, System productivity.

6- MAI

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۴۶-۲۲۹

ارزیابی زراعی، بوم‌شناختی و اقتصادی کشت مخلوط جو (*Hordeum vulgare* L.) و ماشک (*Vicia panonica*) در تناوب با برنج (*Oryza sativa* L.) در شالیزار

محمد ربیعی[1*] و سجاد شاکرکوهی[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

چکیده

به‌منظور بررسی زراعی، بوم‌شناختی و اقتصادی کشت مخلوط جو (*Hordeum vulgare* L.) و ماشک (*Vicia panonica*) در تناوب با برنج (*Oryza sativa* L.) در شالیزار، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳ در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور در شهرستان رشت به اجرا درآمد. تیمارهای آزمایشی شامل کشت مخلوط جو و ماشک با نسبت‌های جایگزینی سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳)، یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱)، یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) و دو ردیف جو + دو ردیف ماشک (۲:۲) و کشت خالص دو گونه بودند. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد علوفه تر (۴۴۵۷۱ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد علوفه خشک (۱۲۱۵۷ کیلوگرم در هکتار) از کشت مخلوط ۱:۱ جو: ماشک حاصل شد. با افزایش نسبت ماشک در کشت مخلوط، میزان پروتئین خام، خاکستر علوفه و به‌تبع آن کیفیت علوفه افزایش یافت. نسبت برابری زمین (LER) در کلیه تیمارهای کشت مخلوط به‌جز تیمار ۳:۱ جو: ماشک، بیشتر از یک بود. محاسبه شاخص‌های اقتصادی نشان داد که بیشترین سودمندی کشت مخلوط (IA) و مزیت پولی (MAI) به‌ترتیب با میانگین‌های ۷۵۵۴ و ۲۹۴۴۹۱۴۱ به تیمارهای ۱:۳ و ۱:۱ جو: ماشک اختصاص داشت. شاخص بهره‌وری سیستم (SPI) نیز در کلیه نسبت‌های کشت مخلوط مثبت بود. براساس نتایج، جهت حصول عملکرد مناسب علوفه، افزایش کارآیی استفاده از زمین و سودمندی اقتصادی بیشتر، کشت مخلوط جو و ماشک با نسبت‌های ۱:۱ و ۱:۳ به‌عنوان کشت دوم پس از برداشت برنج در اراضی شالیزاری استان گیلان قابل توصیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری سیستم، سودمندی، عملکرد علوفه، کشت دوم، نسبت برابری زمین

مقدمه

با افزایش جمعیت جهان و تخریب منابع طبیعی، رویکردهای نوین و پایدار برای تضمین امنیت غذایی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از روش‌ها و الگوهای کشتی که می‌تواند در این زمینه مورد توجه قرار گیرد، کشت مخلوط یا تنوع و دگرگونی در بوم‌نظام‌ها است (Maitra et al., 2021). کشت مخلوط به‌صورت کشت هم‌زمان دو و یا چند گیاه زراعی در یک قطعه زمین تعریف می‌شود. این سیستم کشت اشاره به الگویی دارد که با بهره‌گیری از تفاوت آشیان اکولوژیک گونه‌های گیاهی سبب اختلاف در نیازهای محیطی در زمان و مکان شده و استفاده بهتر از محیط رشد را فراهم می‌نماید (Esmaeilian et al., 2022). استفاده از کشت مخلوط به‌عنوان جزئی مرسوم از مدیریت بوم‌نظام‌های زراعی در بسیاری از مناطق جهان ثابت کرده که این سیستم کشت می‌تواند مزایای بسیاری را به همراه داشته باشد. از جمله مزایای این سیستم کشت می‌توان به افزایش عملکرد در واحد سطح، کاهش ریسک تولید، افزایش تنوع زیستی، مدیریت بهتر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، افزایش کیفیت خاک و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی از طریق کاهش

۱- بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.rabiee@areeo.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.98402.1272

مصرف سموم و کودهای شیمیایی، اشاره کرد (Kugbe et al., 2018; Lan et al., 2024). به‌طورکلی، کشت مخلوط به‌دلیل استفاده بهینه از فضای کل قابل دسترس، کاهش کاربرد ماشین‌آلات کشاورزی و استفاده بهتر از مواد مغذی و رطوبت می‌تواند بهره‌وری اقتصادی را نسبت به کشت خالص افزایش دهد (Cuartero et al., 2022). تفاوت سیستم ریشه‌ای، ارتفاع بوته و سطح برگ در گونه‌های کشت مخلوط موجب افزایش جذب آب، عناصر غذایی و تشعشع خورشیدی شده و در نتیجه، افزایش عملکرد را به دنبال خواهد داشت. به عبارت دیگر، حداکثر عملکرد در کشت مخلوط زمانی حاصل می‌شود که گیاهان تشکیل‌دهنده از نظر ویژگی‌های ریخت‌شناختی و فیزیولوژیکی و میزان استفاده از منابع طبیعی با یکدیگر متفاوت باشند (Wang et al., 2018).

جایگزین کردن شیوه‌های چندکشتی به‌جای تک‌کشتی برنج (*Oryza sativa* L.)، یکی از شیوه‌های افزایش بهره‌وری از اراضی شالیزاری می‌باشد. اراضی شالیزاری شمال کشور از پتانسیل بالایی برای کشت دوم پس از برداشت برنج برخوردار هستند. علی‌رغم پتانسیل بالای این اراضی جهت کشت دوم در پاییز، متأسفانه بیشتر آن‌ها در نیمه دوم سال که می‌توانند جهت جبران بخشی از نیازهای غذایی و علوفه‌ای منطقه مورد استفاده قرار گیرند، بدون استفاده باقی می‌مانند. کشت دوم پس از برداشت برنج باعث تولید محصول زراعی زمستانه مهم در نیمه دوم سال، رعایت تناوب زراعی، بهبود شرایط محیط و خاک، افزایش درآمد کشاورزان و پایداری تولید برنج می‌شود (Rabiee & farahdahr, 2020). یکی از عوامل مهم محدودکننده در توسعه دامپروری و تولیدات دامی، تأمین علوفه مورد نیاز دام‌ها می‌باشد. به‌طوری که واردات علوفه و دانه‌های علوفه‌ای بخش قابل توجهی از واردات کشور را به خود اختصاص می‌دهند. بنابراین، ضرورت تولید علوفه روزبه‌روز بیشتر احساس می‌شود (Shafagi et al., 2020). در این راستا، استفاده از گیاهان علوفه‌ای پاییزه با قابلیت کشت در اراضی شالیزاری که عملکرد بالا و کیفیت مطلوبی دارند، علاوه‌بر تأمین علوفه مورد نیاز دام‌ها، می‌تواند نقش مهمی در کشاورزی پایدار و برقراری نظام چندکشتی ایفا نماید. کشت مخلوط گیاهان علوفه‌ای به‌ویژه گیاهان تیره بقولات در تناوب با برنج می‌تواند موجب افزایش فعالیت‌های بیولوژی خاک، حفاظت خاک در برابر عوامل فرسایش‌دهنده، توسعه صنعت دامپروری و افزایش تولید گردد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه کشت گیاهان علوفه‌ای در اراضی شالیزاری شمال کشور بدون مصرف آب و به‌صورت دیم صورت می‌گیرد، اجرای این الگوی کشت علاوه‌بر کاهش فشار به منابع آبی و کاهش هزینه تولید، می‌تواند گامی مؤثر در جهت تأمین امنیت غذایی کشور باشد (Rabiee & Shaker Kouhi, 2025).

انتخاب مناسب گونه‌ها در کشت مخلوط به‌منظور بهینه‌سازی استفاده از فضا، زمان و منابع از طریق به حداکثر رساندن اثرات مثبت و به حداقل رساندن اثرات منفی رقابت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این انتخاب باید به‌نحوی صورت گیرد که قرار گرفتن گونه‌های مختلف در کنار یکدیگر موجب افزایش عملکرد در واحد سطح شده و برتری کشت مخلوط نسبت به کشت خالص نمایان شود. لزوم این کار، شناخت کامل گونه‌ها در ارتباط با نیازهای بوم‌شناختی و نحوه پاسخ آن‌ها به محیط است (Darabi, 2025). از جمله ترکیبات مناسب برای کشت مخلوط پس از برداشت برنج در شالیزار می‌توان به ترکیب گیاهان خانواده غلات مانند جو (*Hordeum vulgare* L.) و تریتیکاله (*X Triticosecale* Wittmack) با لگوم‌های علوفه‌ای نظیر شبدر برسیم (*Trifolium alexandrinum* L.)، ماشک (*Vicia panonica*) و نخودفرنگی علوفه‌ای (*Pisum sativum* L.) اشاره کرد. در این ترکیب، غلات به‌عنوان یک قیم مناسب برای لگوم‌ها عمل کرده و مشکل برداشت مکانیزه این گیاهان (به‌علت ورس) را برطرف می‌کنند. از طرفی دیگر، لگوم‌های علوفه‌ای باعث افزایش درصد پروتئین و قابلیت هضم، کاهش درصد فیبر خام و در نهایت افزایش کیفیت علوفه در کشت مخلوط می‌شوند. همچنین این گیاهان از طریق افزایش ماده آلی خاک و تثبیت بیولوژیکی نیتروژن منجر به کاهش مصرف کود نیتروژن و در نتیجه کاهش هزینه تولید می‌گردند (Tzemi et al., 2025; Rabiee & Shaker Kouhi, 2025). با توجه به اینکه کشت متوالی برنج به‌دلیل شرایط غرقابی و عملیات گل‌خرابی سبب تخریب ساختمان خاک، کاهش فعالیت ریزجانداران و واکنش‌های بیوشیمیایی می‌شود، کشت بقولاتی نظیر ماشک پس از برداشت برنج می‌تواند موجب افزایش فعالیت‌های میکروبیولوژی خاک شده و فرآیند معدنی شدن نیتروژن را تسریع نماید (Benintende et al., 2008). نیتروژن تثبیت‌شده به‌وسیله بقولات به‌صورت آلی در بقایای ریشه باقی مانده و به‌تدریج از طریق فرآیند معدنی شدن در اختیار گیاه بعدی (برنج) قرار می‌گیرد و از این طریق می‌تواند تا ۵۰ درصد از نیاز برنج به نیتروژن را برطرف کند (Rezaei Noupashani & Aminpanah, 2018).

اجرای سیستم‌های کشت مخلوط برپایه گیاهان علوفه‌ای در تناوب پس از برنج در اراضی شالیزاری می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مناسب برای تولید علوفه با کمیت و کیفیت بالا در نظر گرفته شود. در این راستا، معرفی و انتخاب گونه‌های مناسب و تعیین بهترین الگو و نسبت کاشت آن‌ها در موفقیت و توسعه سیستم‌های کشت مخلوط از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی زراعی، بوم‌شناختی و اقتصادی کشت مخلوط جو و ماشک به‌عنوان کشت دوم پس از برداشت برنج در اراضی شالیزاری گیلان انجام شد.

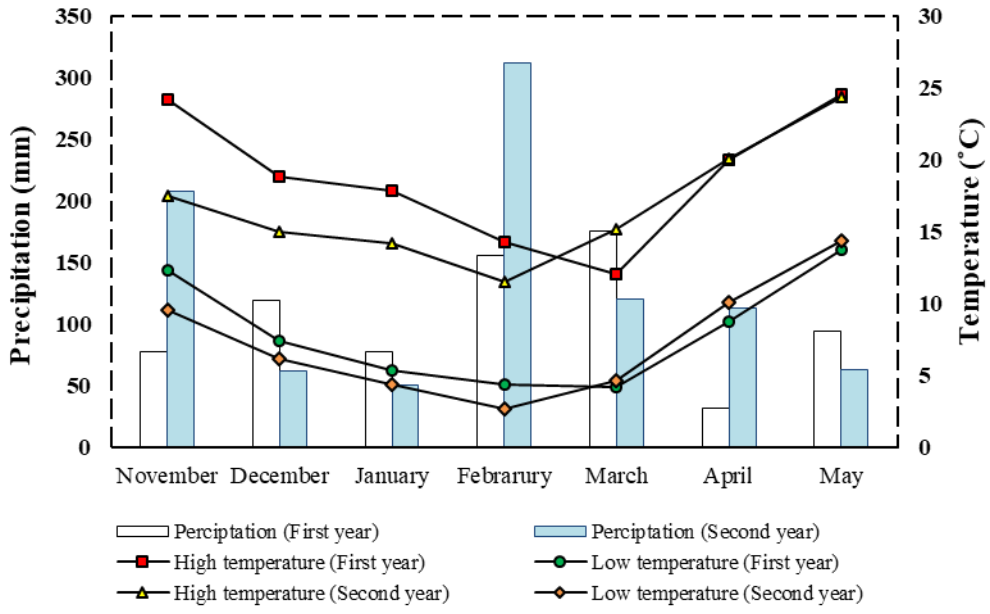
مواد و روش‌ها

این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳ در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور در رشت طراحی و اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل کشت مخلوط جو و ماشک با نسبت‌های جایگزینی سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳)، یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱)، یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) و دو ردیف جو + دو ردیف ماشک (۲:۲) و کشت خالص دو گونه بودند. بذور جو (رقم گلچین) از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و بذور ماشک (رقم لامعی) از مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور تهیه شدند. قبل از اجرای آزمایش، یک نمونه مرکب خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از چندین نقطه مزرعه آزمایشی تهیه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین گردید (جدول ۱). الگوی تغییرات جوی محل اجرای آزمایش شامل میانگین درجه حرارت و مجموع بارندگی منطقه طی سال‌های زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۲ در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical properties of the soil at the experiment site

بافت Texture	اسیدیته pH	کربن آلی Organic carbon (%)	نیتروژن کل Total nitrogen (%)	فسفر قابل جذب Available posphorous (mg kg^{-1})	پتاسیم قابل جذب Available potassium (mg kg^{-1})	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})
رسی-سیلتی Clay-silty	7.1	1.24	0.128	19.1	175	0.76



شکل ۱- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش (۱۴۰۴-۱۴۰۲)

Fig. 1- Meteorological information of the experiment site (2023-2025).

پس از برداشت برنج، عملیات شخم با استفاده از روتیواتور طی دو مرحله در عمق ۱۵-۱۰ سانتی‌متر انجام گرفت و جهت مبارزه با علف‌های هرز، از علف‌کش تری‌فلورالین (ترفلان) پنج روز پیش از کاشت و به‌میزان دو لیتر در هکتار استفاده شد. به‌منظور خروج آب اضافی در اثر بارندگی‌های سنگین احتمالی و ایجاد شرایط مناسب برای کشت، زهکش‌هایی به‌عمق ۳۰ -۲۰ سانتی‌متر و به‌عرض ۳۰-۲۵ سانتی‌متر دور تا دور زمین و همچنین مابین تکرارها احداث گردید. تاریخ کاشت در هر دو سال آزمایش، نهم آبان بود. هر کرت شامل هشت خط کاشت به‌طول هفت متر و با فاصله ۲۵ سانتی‌متر بود. فواصل بین کرت‌ها دو متر و فاصله بین تکرارها نیز سه متر در نظر گرفته شد. میزان بذر مصرفی برای جو و ماشک به‌ترتیب ۱۴۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار بود. مبارزه با آفت حلزون در ابتدای سبز شدن بذور و در مرحله سه تا چهار برگی با استفاده از سم متالدهاید (سه کیلوگرم در هکتار) انجام شد. برداشت علوفه در مرحله شیری شدن دانه‌های جو و مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی ماشک (اوایل اردیبهشت) صورت گرفت. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در توسعه کشت دوم پس از برداشت برنج در شالیزار، تداخل زمان برداشت محصولات دوم با نشاء برنج می‌باشد، دلیل انتخاب زمان برداشت علوفه جو و ماشک، جلوگیری از این هم‌پوشانی بود. جهت تعیین عملکرد علوفه تر در واحد سطح با حذف خطوط کناری و یک متر از بالا و پایین هر کرت به‌عنوان اثر حاشیه‌ای، علوفه برداشت و بلافاصله توزین شد. برای اندازه‌گیری عملکرد علوفه خشک، یک کیلوگرم علوفه تر از هرکرت به‌طور تصادفی انتخاب و نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین شدند. میزان پروتئین خام علوفه از طریق اندازه‌گیری درصد نیتروژن نمونه‌ها به‌روش کجلدال و ضرب کردن آن در عدد ثابت ۶/۲۵ محاسبه گردید (Tabatabaei & Ranjbar, 2012). عملکرد پروتئین نیز از حاصل‌ضرب پروتئین خام و عملکرد علوفه خشک به دست آمد (Ul-Allah et al., 2014). برای اندازه‌گیری خاکستر علوفه از کوره الکتریکی با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده گردید. برای ارزیابی سودمندی و کارآیی کشت مخلوط، از شاخص‌های نسبت برابری زمین (LER[1])، کاهش واقعی عملکرد (AYL[2])، ضریب ازدحام نسبی (K[3])، سودمندی کشت مخلوط (IA[4])، مزیت پولی (MAI[5]) و بهره‌وری سیستم (SPI[6]) براساس معادله‌های ۱ تا ۶ استفاده شد (Lithourgidis et al., 2011; Zhang et al., 2015).

معادله (۱)
$$LER = (Yab/Yaa) + (Yba/Ybb)$$

$$LER = LERa + LERb$$

معادله (۲)
$$AYL = AYLa + AYLb$$

$$AYLb = [LERb \times (100/Zba)$$ -1] -1]

$$AYLa = [LERa \times (100/Zab)$$

معادله (۳)
$$K = Ka \times Kb$$

$$Kb = YbaZab/(Ybb - Yba)\,Zba$$

$$Ka = YabZba/(Yaa - Yab)\,Zab$$

پمعادله (۴)
$$IAb = AYLb \times Pb$$

$$IA = IAa + IAb \qquad IAa = AYLa \times Pa$$

معادله (۵)
$$MAI = (YabPa + YbaPb) \times (LER - 1/LER)$$

معادله (۶)
$$SPI = (Yaa/Ybb) \times (Yab + Yba)$$

که در آن‌ها، LER_a و LER_b: به‌ترتیب نسبت برابری زمین جزئی جو و ماشک، Y_{ab} و Y_{ba}: به‌ترتیب عملکرد علوفه جو و ماشک در کشت مخلوط (کیلوگرم در هکتار)، Y_{aa} و Y_{bb}: به‌ترتیب عملکرد علوفه در کشت خالص جو و ماشک (کیلوگرم در هکتار)، AYL_a و AYL_b: به‌ترتیب کاهش واقعی عملکرد جو و ماشک در کشت مخلوط، Z_{ab} و Z_{ba}: به‌ترتیب نسبت جو و ماشک در کشت مخلوط (درصد) و P_a و P_b: به‌ترتیب قیمت علوفه خشک جو (۸۰۰۰۰ ریال در سال اول و ۱۰۰۰۰۰ ریال در سال دوم) و ماشک (۱۲۰۰۰۰ ریال در سال اول و ۱۵۰۰۰۰ ریال در سال دوم) می‌باشند.

جهت حفظ و پایداری شیوه زراعی مبتنی برپایه برنج (اجرای تناوب) و بررسی اثر کشت مخلوط جو و ماشک بر عملکرد برنج، پس از برداشت محصولات علوفه‌ای، کشت برنج رقم هاشمی در بهار سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ در زمین مورد نظر صورت گرفت. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت. بررسی توزیع نرمال

1- Land equivalent ratio
2- Actual yield loss
3- Relative crowding coefficient
4- Intercropping advantage
5- Monetary advantage index
6- System productivity index

داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف–اسمیرنوف انجام شد. پس از انجام آزمون یکنواختی واریانس اشتباه آزمایشی (آزمون بارتلت) و اطمینان از یکنواخت بودن خطاهای آزمایشی در سال‌های مختلف، تجزیه مرکب داده‌ها صورت گرفت. تجزیه مرکب با فرض تصادفی بودن سال و ثابت بودن تیمارهای آزمایشی برای صفات مورد نظر انجام شد. مقایسه میانگین نیز با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد علوفه تر

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سال و الگوی کشت در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد علوفه تر معنی‌دار بود (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین، سال اول آزمایش (۴۰۶۶۱ کیلوگرم در هکتار) نسبت به سال دوم (۳۸۷۹۸ کیلوگرم در هکتار) از نظر عملکرد علوفه تر از برتری معنی‌داری برخوردار بود (جدول ۳). بیشتر بودن عملکرد علوفه تر در سال اول را می‌توان به شرایط مساعد آب‌وهوایی در این سال (بارندگی کمتر و در نتیجه شرایط غرقابی کمتر، دمای بالاتر و مجموع ساعات آفتابی بیشتر) و در نتیجه ایجاد پوشش گیاهی مناسب‌تر و رشد رویشی بیشتر نسبت داد. در بین الگوهای مختلف کشت، بیشترین عملکرد علوفه تر به‌ترتیب با میانگین‌های ۴۲۳۲۵ و ۴۱۱۶۳ کیلوگرم در هکتار به تیمارهای یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) و سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳) اختصاص داشت. با افزایش درصد ماشک در کشت مخلوط از عملکرد علوفه تر کاسته شد و در تیمار کشت خالص ماشک به حداقل مقدار خود (۳۶۵۳۵ کیلوگرم در هکتار) رسید (جدول ۳). افزایش نسبت جو در کشت مخلوط، تأثیر معنی‌داری بر جبران کاهش عملکرد علوفه ماشک داشت که این مهم از طریق افزایش عملکرد جو حاصل شد. افزایش عملکرد علوفه تر در کشت مخلوط را می‌توان به تفاوت در ساختار ریخت‌شناسی جو و ماشک برای استفاده بهتر از منابع نسبت داد. به‌طوری که حضور گیاه جو با ریشه‌های سطحی و افشان در مجاورت گیاه ماشک که دارای ریشه‌های عمیق‌تری می‌باشد، موجب می‌شود که ریشه این گیاهان در سطوح مختلف خاک پراکنده شده و در مجموع آب و مواد غذایی بیشتری از حجم معینی از خاک جذب گردد که منجر به افزایش عملکرد می‌گردد (Lameie-Harvani, 2013).

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب صفات کمّی و کیفی علوفه در الگوهای مختلف کشت طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۴۰۲

Table 2- Combined variance analysis for qualitative and quantitative traits of forage in different planting patterns (2023-2025)

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد علوفه تر Fresh forage yield	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield	پروتئین خام Crude protein	عملکرد پروتئین Protein yield	خاکستر Ash
سال Year (Y)	1	27556249**	5812117**	0.16^{ns}	136407**	0.2^{ns}
سال × تکرار Y × R	2	3230419	403886	0.13	8485	0.25
الگوی کشت Planting pattern (CP)	5	31257417**	20285987**	39.03**	256103**	12.19**
سال × الگوی کشت Y × CP	5	774272^{ns}	114157^{ns}	0.08^{ns}	6688^{ns}	0.42^{ns}
خطا Error	20	4229946	404979	0.52	12111	0.38
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	16.5	13.2	6.8	11.6	5.4

ns: عدم معنی‌داری و * و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and **: non-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر سال و الگوی کشت بر عملکرد کمّی و کیفی علوفه طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۴۰۲

Table 3- Mean comparison for the effects of year and planting pattern on qualitative and quantitative of forage yield (2023-2025)

تیمار Treatment	عملکرد علوفه تر Fresh forage yield (kg ha^{-1})	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield (kg ha^{-1})	عملکرد پروتئین Protein yield (kg ha^{-1})
سال Year			
سال اول First year	40661	9977	1313
سال دوم Second year	38798	9173	1190
LSD 5%	156.15	512.35	81.64
الگوی کشت Planting pattern			
کشت خالص جو Sole cropping of barley	39209	9700	957
۳ ردیف جو : ۱ ردیف ماشک 3 row of barley : 1 row of vetch	41163	11065	1269
۱ ردیف جو : ۱ ردیف ماشک 1 row of barley : 1 row of vetch	42325	11550	1548
۱ ردیف جو : ۳ ردیف ماشک 1 row of barley : 3 row of vetch	38221	7606	1116
۲ ردیف جو : ۲ ردیف ماشک 2 row of barley : 2 row of vetch	40924	10437	1392
کشت خالص ماشک Sole cropping of vetch	36535	7095	1225
LSD 5%	2432.11	886.44	121.35

میانگین‌های که اختلاف آن‌ها از مقدار LSD در سطح پنج درصد بیشتر باشد، دارای اختلاف معنی‌داری هستند.

Means differing by more than the LSD (5%) are statistically significant.

همچنین به‌دلیل اینکه اجزای کشت مخلوط در مصرف منابع محیطی به‌طور مکمل عمل می‌کنند، بنابراین رقابت برون‌گونه‌ای کمتر از رقابت درون‌گونه‌ای بوده که این امر موجب افزایش تولید علوفه در کشت مخلوط می‌شود (Javanmard et al., 2019). محققان در بررسی عملکرد کمّی و کیفی علوفه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط جو و ماشک گزارش کردند که کشت مخلوط از عملکرد علوفه تر بیشتری نسبت به کشت خالص دو گونه برخوردار بود، به‌طوری که بیشترین عملکرد علوفه تر به‌ترتیب با میانگین‌های ۳۹۰۰۰ و ۳۸۱۶۷ کیلوگرم در هکتار از کشت مخلوط افزایشی ۶۰:۱۰۰ و ۴۰:۱۰۰ جو: ماشک به دست آمد (Jeylani et al., 2015).

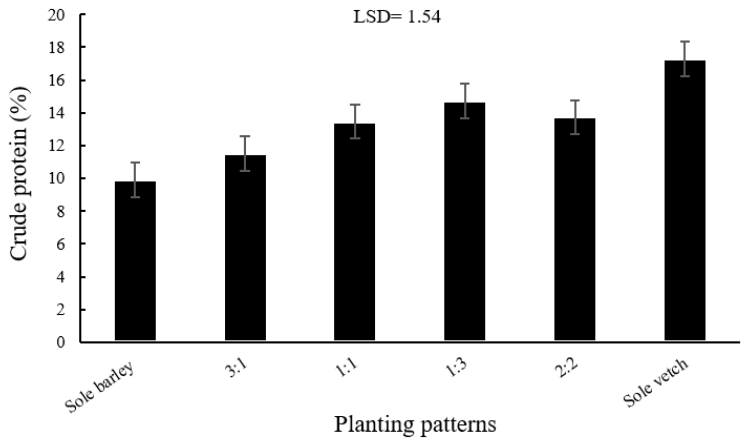
عملکرد علوفه خشک

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار سال و الگوی کشت بر عملکرد علوفه خشک بود (جدول ۲). هم‌راستا با عملکرد علوفه تر، عملکرد علوفه خشک در سال اول آزمایش (۹۹۷۹ کیلوگرم در هکتار) نسبت به سال دوم (۹۱۷۳ کیلوگرم در هکتار) بیشتر بود. عملکرد علوفه خشک در تمامی تیمارهای کشت مخلوط به‌جز تیمار یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱)، بیشتر از کشت خالص دو گونه بود. بیشترین عملکرد علوفه خشک به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۱۵۵۰، ۱۱۰۶۵ و ۱۰۴۳۷ کیلوگرم در هکتار به تیمارهای یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱)، سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳) و دو ردیف جو + دو ردیف ماشک (۲:۲) اختصاص داشت (جدول ۳). بیشتر بودن عملکرد علوفه خشک در این تیمارها را می‌توان به بیشتر بودن عملکرد علوفه تر نسبت داد. به نظر می‌رسد که جو با ارتفاع بیشتر خود تشعشات ورودی به تاج‌پوشش سیستم کشت مخلوط را جذب نموده و از طرف دیگر، ماشک با پوشش بیشتر سطح زمین، تشعشاتی که توسط جو قابل استفاده نبود را جذب کرده و بدین طریق کارآیی استفاده از نور و به‌تبع آن عملکرد در کشت مخلوط افزایش یافت (Nassiri Mahallati et al., 2015). محققان

در کشت مخلوط جو و ماشک گزارش کردند که بیشترین عملکرد علوفه خشک (۳۴۱۵ کیلوگرم در هکتار) در کشت مخلوط و در تیمار ۵۰ درصد جو + ۵۰ درصد ماشک حاصل شد (Zeiditoolabi et al., 2021). نتایج آزمایشی دیگر نشان داد که تیمار کشت مخلوط ۵۰ درصد جو + ۵۰ درصد ماشک با تراکم ۲۰۰ بوته در مترمربع بیشترین عملکرد علوفه خشک (۹۵۲۰ کیلوگرم در هکتار) را به خود اختصاص داد (Shakour Zadeh et al., 2012).

پروتئین خام علوفه

براساس نتایج تجزیه واریانس، بین الگوهای مختلف کشت از نظر میزان پروتئین خام علوفه اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۲). بیشترین و کمترین میزان پروتئین خام به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۷/۲۷ و ۹/۸۹ درصد در کشت‌های خالص ماشک و جو به دست آمد. نتایج بیانگر این موضوع بود که با افزایش سهم ماشک و کاهش سهم جو در کشت مخلوط، میزان پروتئین خام افزایش یافت. به‌طوری که میزان پروتئین خام علوفه در تیمار یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) نسبت به تیمار سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳)، ۲۲ درصد افزایش نشان داد (شکل ۲). محققان در بررسی عملکرد کمّی و کیفی علوفه در کشت مخلوط جو و ماشک گزارش کردند که بیشترین میزان پروتئین خام علوفه به‌ترتیب در کشت خالص ماشک (۲۵/۱۸ درصد) و تیمار ۲۰ درصد جو + ۸۰ درصد ماشک (۲۴/۰۷ درصد) به دست آمد. نتایج آن‌ها نشان داد که در کلیه نسبت‌های کشت مخلوط با افزایش نسبت ماشک، بر میزان پروتئین خام افزوده شد (Khraryan et al., 2024). خردمند و همکاران (Kheradmand et al., 2014) در کشت مخلوط خلر (*Lathyrus sativa*) و جو گزارش کردند که هرچه از سهم خلر کاسته شد و به سهم جو افزوده شد، میزان پروتئین خام علوفه کاهش یافت، به‌طوری که بیشترین و کمترین میزان آن به‌ترتیب در کشت‌های خالص خلر و جو به دست آمد. همبستگی خطی و مثبت بین میزان پروتئین خام علوفه و نسبت لگوم‌ها در کشت مخلوط، در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Lithourgidis et al., 2011; Contreras Paco et al., 2020).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر الگوی کشت بر پروتئین خام علوفه طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۴۰۲

Fig. 2- Mean comparison for the effect of planting pattern on forage crude protein (2023-2025).

میانگین‌های که اختلاف آن‌ها از مقدار LSD در سطح پنج درصد بیشتر باشد، دارای اختلاف معنی‌داری هستند.

Means differing by more than the LSD (5%) are statistically significant.

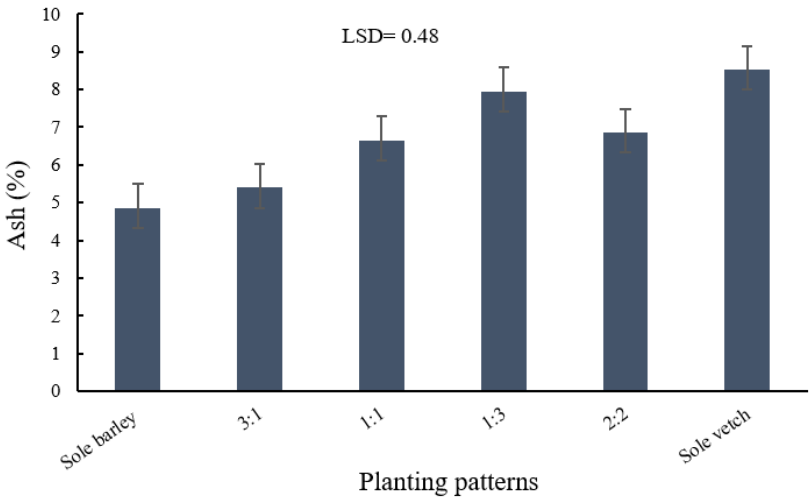
عملکرد پروتئین

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر سال و الگوی کشت بر عملکرد پروتئین علوفه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که سال اول آزمایش با میانگین ۱۳۱۳ کیلوگرم در هکتار نسبت به سال دوم با میانگین ۱۱۹۰ کیلوگرم در هکتار، از عملکرد پروتئین بیشتری برخوردار بود (جدول ۳). با توجه به اینکه عملکرد علوفه خشک و عملکرد پروتئین دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با یکدیگر هستند، لذا برتری عملکرد پروتئین در سال اول به‌دلیل عملکرد علوفه خشک بیشتر، منطقی و توجیه‌پذیر به نظر می‌رسد. در بین الگوهای مختلف کشت،

بیشترین عملکرد پروتئین (۱۵۴۸ کیلوگرم در هکتار) به تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) و کمترین میزان آن به کشت خالص جو (۹۵۷ کیلوگرم در هکتار) تعلق داشت. میانگین افزایش عملکرد پروتئین علوفه در تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) نسبت به کشت‌های خالص جو و ماشک به‌ترتیب ۳۸ و ۲۱ درصد بود (جدول ۳). کم بودن عملکرد پروتئین در کشت خالص جو را می‌توان به کمتر بودن میزان پروتئین خام و در کشت خالص ماشک، به کمتر بودن عملکرد علوفه خشک نسبت داد. محققان گزارش کردند که عملکرد پروتئین علوفه در کلیه نسبت‌های کشت مخلوط جو و ماشک بیشتر از کشت خالص دو گونه بود، به‌طوری که بیشترین میزان آن در کشت مخلوط ۴۰ درصد جو + ۶۰ درصد ماشک به دست آمد (Khraryan et al., 2024). در آزمایشی دیگر، جیلانی و همکاران (Jeylani et al., 2015) گزارش کردند که کلیه تیمارهای کشت مخلوط جو و ماشک از نظر عملکرد پروتئین نسبت به کشت خالص دو گونه دارای برتری معنی‌داری بودند.

خاکستر علوفه

در گیاهان علوفه‌ای، خاکستر هیچ نوع انرژی برای دام تأمین نمی‌کند، امّا به‌عنوان یک جزء حیاتی خوراک دام، انواع املاح و مواد معدنی مورد نیاز دام اعم از عناصر پُرمصرف و عناصر کم‌مصرف را شامل می‌شود. این مواد جهت ادامه فعالیت‌های متابولیک و سلامت دام لازم هستند. بنابراین، درصد خاکستر به‌طور مستقیم با کیفیت علوفه مرتبط است (Lithourgidis et al., 2011). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین الگوهای مختلف کشت از نظر میزان خاکستر علوفه اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین، کشت خالص ماشک با میانگین ۸/۵۸ درصد بیشترین خاکستر علوفه را به خود اختصاص داد. کمترین میزان خاکستر نیز به‌ترتیب با میانگین‌های ۴/۹۱ و ۵/۴۴ درصد به کشت خالص جو و تیمار سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳) اختصاص داشت. نتایج بیانگر این موضوع بود که با افزایش سهم ماشک در کشت مخلوط، میزان خاکستر علوفه افزایش یافت، به‌طوری که میزان آن در تیمار یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) نسبت به تیمار سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳)، ۳۲ درصد افزایش نشان داد (شکل ۳). نتایج بررسی عملکرد و صفات کیفی علوفه در کشت مخلوط تریتیکاله با لگوم‌های یک‌ساله نشان داد که افزودن لگوم‌ها به کشت مخلوط موجب افزایش خاکستر علوفه شد، به‌طوری که بیشترین (۱۰ درصد) و کمترین (۵/۳ درصد) میزان خاکستر به‌ترتیب در نسبت یک ردیف تریتیکاله + یک ردیف ماشک و کشت خالص تریتیکاله حاصل شد (Salehi et al., 2018).



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر الگوی کشت بر خاکستر علوفه طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۴۰۲

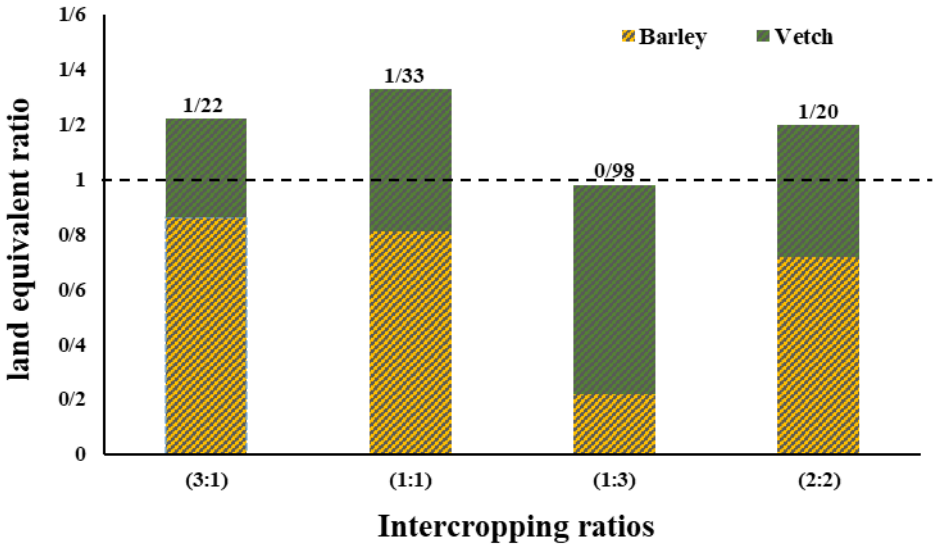
Fig. 3- Mean comparison for the effect of planting pattern on forage ash (2023-2025).

میانگین‌های که اختلاف آن‌ها از مقدار LSD در سطح پنج درصد بیشتر باشد، دارای اختلاف معنی‌داری هستند.

Means differing by more than the LSD (5%) are statistically significant.

نسبت برابری زمین (LER)

نسبت برابری زمین (LER) به‌عنوان متداول‌ترین شاخص ارزیابی مزیت زراعی کشت مخلوط نسبت به کشت خالص شناخته می‌شود. این شاخص براساس سطح زیرکشت محاسبه می‌گردد و به‌وسیله آن مشخص می‌گردد که برای به دست آوردن محصول حاصل از یک هکتار کشت مخلوط، چه مقدار زمین به‌صورت خالص مورد نیاز است تا همان مقدار محصول برداشت شود (Lithourgidis et al., 2011). مقدار نسبت برابری زمین از ۱/۳۳ در تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) تا ۰/۹۸ در تیمار یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) متغیر بود (شکل ۴). مقدار نسبت برابری زمین بیشتر از یک در نسبت‌های (۱:۳)، (۱:۱) و (۲:۲) جو: ماشک نشان‌دهنده سودمندی این نسبت‌های کشت در مقایسه با کشت خالص دو گونه و به عبارتی دیگر، برتری تسهیل بین‌گونه‌ای به رقابت بین‌گونه‌ای بود. نسبت برابری زمین برابر با ۱/۳۳ در تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) بیانگر آن است که این نظام کشت مخلوط موجب افزایش ۳۳ درصدی بهره‌وری استفاده از زمین نسبت به کشت خالص شده است و به عبارتی دیگر، برای دستیابی به عملکرد معادل کشت مخلوط به ۰/۳۳ واحد زمین بیشتری در کشت خالص نیاز است. همچنین مقایسه نسبت برابری زمین جزئی دو گونه نشان داد که این شاخص برای جو بیشتر از ماشک بود. بنابراین، چنین استنباط می‌شود که جو در کشت مخلوط تأثیر مثبت بیشتری از همراهی با ماشک پذیرفته است. به نظر می‌رسد که ماشک به‌عنوان یک گیاه لگوم همراه توانسته است با تثبیت بیولوژیکی نیتروژن و افزایش حاصلخیزی خاک، شرایط مطلوبی برای رشد و حصول عملکرد بالای گیاه اصلی (جو) فراهم کند. ویژگی‌های ساختاری و زیست‌شناسی متفاوت بین بقولات و غلات از عوامل تأثیرگذار بر رقابت بین این گونه‌ها بر سر جذب منابع طبیعی در کشت مخلوط است که موجب بروز روابط همزیستی دوجانبه مثبت شده و در نتیجه آن، کارآیی استفاده از زمین در این سیستم کشت افزایش می‌یابد (Akbari et al., 2025). محققان با بررسی عملکرد کمّی و کیفی علوفه در کشت مخلوط جو و ماشک گزارش کردند که میزان نسبت برابری زمین در کلیه تیمارهای کشت مخلوط بیشتر از یک بود، به‌طوری که بالاترین مقدار آن (۲/۶) در نسبت ۵۰ درصد جو + ۵۰ درصد ماشک به دست آمد (Zeiditoolabi et al., 2021).



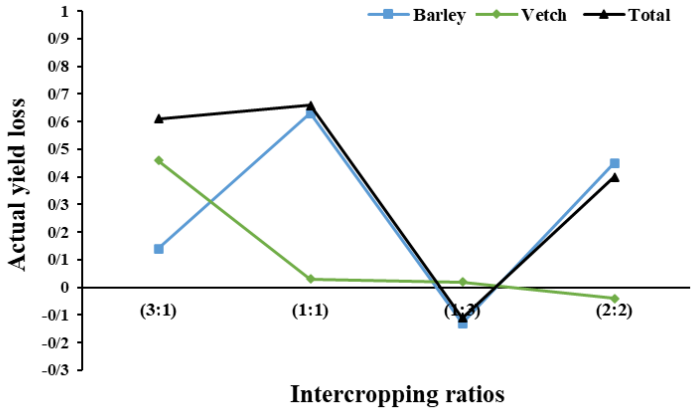
شکل ٤- نسبت برابری زمین در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط جو و ماشک طی سال‌های ١٤٠٤-١٤٠٢

Fig. 4- Land equivalent ratio in different ratios of barley- vetch intercropping (2023-2025).

کاهش واقعی عملکرد (AYL)

کاهش واقعی عملکرد (AYL)، کاهش عملکرد یا سودمندی هر گیاه را در کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص نشان می‌دهد. این شاخص می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری را نسبت به سایر شاخص‌ها در

خصوص رقابت درون‌گونه‌ای و بین‌گونه‌ای و رفتار اجزای تشکیل‌دهنده کشت مخلوط در اختیار ما قرار دهد. مقادیر مثبت AYL نشان‌دهنده افزایش و مقادیر منفی نشان‌دهنده کاهش عملکرد گونه در کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص است (Zhang et al., 2015). نتایج نشان داد که AYL جزئی جو در نسبت‌های (۱:۳)، (۱:۱) و (۲:۲) جو: ماشک مثبت بود. به‌عبارت دیگر، محصول واقعی جو در این نسبت‌های کشت بیش از محصول پیش‌بینی شده بود که از دلایل آن می‌توان به استقرار سریع، بالا بودن سرعت رشد نسبی در مراحل اولیه رشد و در نتیجه استفاده بهتر از منابع اشاره کرد. بیشترین مقدار AYL جزئی جو در تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۰/۶۳) حاصل شد. بیشترین AYL جزئی ماشک نیز در تیمار سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۰/۴۶) به دست آمد. منفی بودن AYL جزئی ماشک در تیمار دو ردیف جو + دو ردیف ماشک (۲:۲) و AYL جزئی جو در تیمار یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) حاکی از افت عملکرد این دو گونه بود. نتایج حاصل از AYL کل نشان داد که به‌جز نسبت یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱)، در بقیه نسبت‌های کشت مخلوط مقدار عددی این شاخص مثبت بود که بیانگر عدم افت عملکرد و مزیت این نسبت‌های کشت در مقایسه با کشت خالص دو گونه می‌باشد. بر این اساس، بیشترین میزان AYL کل (۰/۶۶) در تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) حاصل شد (شکل ۳). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کشت مخلوط جو و ماشک با نسبت‌های (۱:۳)، (۱:۱) و (۲:۲) دارای رعایت اصل تولید حمایتی بود و به عبارت دیگر، مساعدت در آن‌ها وجود داشت. محققان در کشت مخلوط تریتیکاله و ماشک گل‌خوشه‌ای گزارش کردند که مقادیر AYL کل در تمامی الگوهای کشت مخلوط مثبت بود که بیانگر تأثیر مفید دو گونه روی همدیگر و سودمندی کشت مخلوط نسبت به کشت خالص بود (Javanmard et al., 2015).



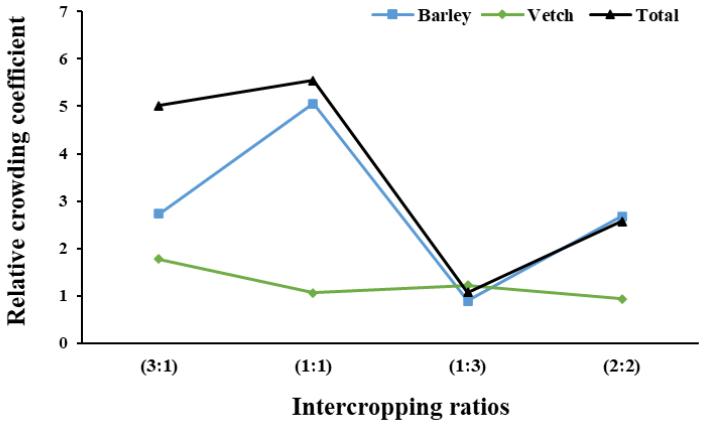
شکل ۵- کاهش واقعی عملکرد در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط جو و ماشک طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۴۰۲

Fig. 5- Actual yield loss in different ratios of barley- vetch intercropping (2023-2025).

ضریب ازدحام نسبی (K)

ضریب ازدحام نسبی (K)، قدرت رقابت یک گونه را نسبت به گونه دیگر نشان می‌دهد. چنانچه مقدار ضریب ازدحام نسبی برای هر دو گونه برابر واحد باشد، بیانگر برقراری تعادل یا موازنه در کشت مخلوط است؛ امّا اگر این ضریب برای هر دو گونه برابر واحد نباشد، گیاه با ضریب بیشتر، گیاه غالب خواهد بود. هرچه مقدار ضریب ازدحام نسبی کل بزرگ‌تر باشد، بدان معنی است که هر دو جزء در کشت مخلوط اثرات رقابتی کمتری بر یکدیگر دارند و در نتیجه کارآیی کشت مخلوط افزایش خواهد یافت (Lithourgidis et al., 2011). مقدار ضریب ازدحام نسبی برای جو در کلیه تیمارهای کشت مخلوط به‌جز تیمار یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) بیشتر از ماشک بود (شکل ۶). نتایج بیانگر این واقعیت می‌باشد که سهم جو در افزایش ضریب ازدحام نسبی کل بیشتر از ماشک بود که دلیل آن را می‌توان به تیپ رشدی متفاوت دو گیاه نسبت داد. بیشترین و کمترین مقدار ضریب ازدحام نسبی کل به‌ترتیب با میانگین‌های ۵/۵۵ و ۱/۰۸ در تیمارهای یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) و یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) حاصل شد (شکل ۶). بیشتر بودن ضریب ازدحام نسبی کل در تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک

(۱:۱) نشان‌دهنده این است که علی‌رغم ظرفیت رشدی بهتر جو در این نسبت کشت، این برتری به‌گونه‌ای تعدیل شده که هر دو گونه اثرات رقابتی کمتری بر یکدیگر داشته و از منابع در دسترس به‌شکل بهتری استفاده کرده‌اند. لامعی هروانی (Lameie-Harvani, 2013) با بررسی کشت مخلوط بقولات علوفه‌ای یک‌ساله با جو گزارش کرد که بیشتر بودن مقدار ضریب ازدحام نسبی برای جو در تمامی تیمارهای کشت مخلوط نسبت به بقولات علوفه‌ای بیانگر غالب بودن این گیاه در رقابت برون‌گونه‌ای بود. در آزمایشی دیگر گزارش شد که بیشترین مقدار ضریب ازدحام نسبی کل در کشت مخلوط تریتیکاله و ماشک گل‌خوشه‌ای در نسبت ۵۰ درصد تریتیکاله + ۵۰ درصد ماشک گل‌خوشه‌ای حاصل شد (Sadra & Hamzei, 2021).



شکل ٦- ضریب ازدحام نسبی در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط جو و ماشک طی سال‌های ١٤٠٤-١٤٠٢

Fig. 6- Relative crowding coefficient in different ratios of barley- vetch intercropping (2023-2025).

سودمندی کشت مخلوط (IA)

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر سودمندی کشت مخلوط برای نسبت‌های سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳)، یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) و دو ردیف جو + دو ردیف ماشک (۲:۲) مثبت بود که نشان‌دهنده سودمندی و مزیت اقتصادی این نسبت‌های کشت و استفاده بهتر از منابع در دسترس توسط دو گونه در مقایسه با کشت خالص آن‌ها می‌باشد. همچنین منفی بودن این شاخص برای نسبت یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) بیانگر افزایش رقابت برون‌گونه‌ای، کاهش اثرات تسهیل کنندگی و تکمیل‌کنندگی دو گونه و در نتیجه، عدم سودمندی اقتصادی می‌باشد. در بین نسبت‌های مختلف کشت مخلوط، بیشترین مقدار سودمندی کشت مخلوط (۷۵۵۴) به تیمار سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳) اختصاص داشت که احتمالاً ناشی از تشکیل اشکوب‌های مختلف جهت بهره‌برداری بهتر از منابع محیطی از قبیل نور، آب و عناصر غذایی بود (Sadra & Hamzei, 2021). در آزمایشی روی کشت مخلوط جو و ماشک گل‌خوشه‌ای گزارش شد که بیشترین میزان سودمندی کشت مخلوط به تیمار افزایشی ۱۰۰:۱۵ ماشک گل‌خوشه‌ای: جو اختصاص داشت. کمترین میزان این شاخص نیز به تیمار افزایشی ۱۰۰:۴۵ ماشک گل‌خوشه‌ای : جو تعلق داشت که دلیل این امر به رقابت برون‌گونه‌ای بیشتر دو گونه نسبت داده شد (Ahmadi et al., 2009). در آزمایشی دیگر گزارش شد که مقادیر شاخص سودمندی کشت مخلوط در کلیه نسبت‌های کشت مخلوط تریتیکاله و ماشک گل‌خوشه‌ای مثبت بود و بیشترین مقدار آن به نسبت ۵۰ درصد تریتیکاله + ۵۰ درصد ماشک گل‌خوشه‌ای اختصاص داشت (Sadra & Hamzei, 2021).

مزیت پولی (MAI)

بررسی شاخص مزیت پولی (MAI) نشان داد که همسو با نتایج سودمندی کشت مخلوط، مقادیر این شاخص در نسبت‌های (۱:۳)، (۱:۱) و (۲:۲) جو: ماشک مثبت بود. با توجه به نحوه محاسبه شاخص مزیت پولی، تیمارهای کشت مخلوط تنها زمانی به کشت خالص دو گونه مزیت دارند که دارای مزیت اکولوژیک (LER>1) نیز باشند.

جدول ٤- سودمندی کشت مخلوط، شاخص مزیت پولی و شاخص بهره‌وری سیستم در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط جو و ماشک طی سال‌های ١٤٠٢-١٤٠٤

Table 4- Intercropping advantage, monetary advantage index and system productivity index in different ratios of barley-vetch intercropping (2023-2025)

تیمار Treatment	سودمندی کشت مخلوط Intercropping advantage	شاخص مزیت پولی Monetary advantage index	شاخص بهره‌وری سیستم System productivity index
۳ ردیف جو : ۱ ردیف ماشک 3 row of barley : 1 row of vetch	7554	20246333	1511
۱ ردیف جو : ۱ ردیف ماشک 1 row of barley : 1 row of vetch	6230	29449141	1579
۱ ردیف جو : ۳ ردیف ماشک 1 row of barley : 3 row of vetch	-931	-1765798	1037
۲ ردیف جو : ۲ ردیف ماشک 2 row of barley : 2 row of vetch	3446	17755433	1426

ازاین‌رو، منفی بودن شاخص مزیت پولی و در نتیجه عدم سودمندی اقتصادی در تیمار یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) را می‌توان به نسبت برابری زمین کمتر از یک در این تیمار نسبت داد. به عبارت دیگر، علی‌رغم افزایش میزان پروتئین و بهبود کیفیت علوفه در این نسبت کشت، رقابت جو آن‌قدر شدید بوده که عملاً صرفه اقتصادی را از بین برده است. بیشترین مقدار شاخص مزیت پولی در تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۲۹۴۴۹۱۴۱) به دست آمد. تیمار سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱۹۱۷۵۰۴۸) نیز در رتبه بعدی قرار داشت (جدول ۴). بیشتر بودن شاخص مزیت پولی در تیمارهای یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) و سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳) را می‌توان به افزایش LER و ضریب ازدحام نسبی کل در این تیمارها نسبت داد (Lithourgidis et al., 2011). در نسبت‌های یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) و سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳)، گیاه جو از ظرفیت رشد بیشتری برخوردار بود، امّا در نسبت ۱:۱، این برتری به‌گونه‌ای تعدیل شد که هر دو گونه به سودمندی قابل قبولی (شاخص مزیت پولی) رسیدند. این موضوع نشان می‌دهد که برای دستیابی به تعادل بین کمیت و کیفیت (پروتئین)، نسبت یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) انتخاب بهتری بوده، هرچند که جو رقیب قوی‌تری می‌باشد. محققان در آزمایشی گزارش کردند که مقادیر شاخص مزیت پولی در الگوهای کشت مخلوط جایگزینی گندم (*Triticum aestivum* L.) و نخود (*Cicer arietnium* L.) مثبت بود و بیشترین میزان آن (۶۹۴۳۱) به الگوی کشت یک ردیف گندم + یک ردیف نخود تعلق داشت که دلیل آن به استفاده بهتر از منابع در دسترس توسط دو گونه در مقایسه با کشت خالص آن‌ها نسبت داده شد (Javanmard et al., 2015). اکبری و همکاران (Akbari et al., 2025) در کشت مخلوط ذرت (*Zea mays* L.) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) گزارش کردند که نتایج شاخص مزیت پولی با نتایج شاخص‌های نسبت برابری زمین و ضریب ازدحام نسبی کل مطابقت داشت، به‌طوری که تیمارهای دارای نسبت برابری زمین و ضریب ازدحام نسبی کل بیشتر، از لحاظ اقتصادی نیز سودمندتر بودند.

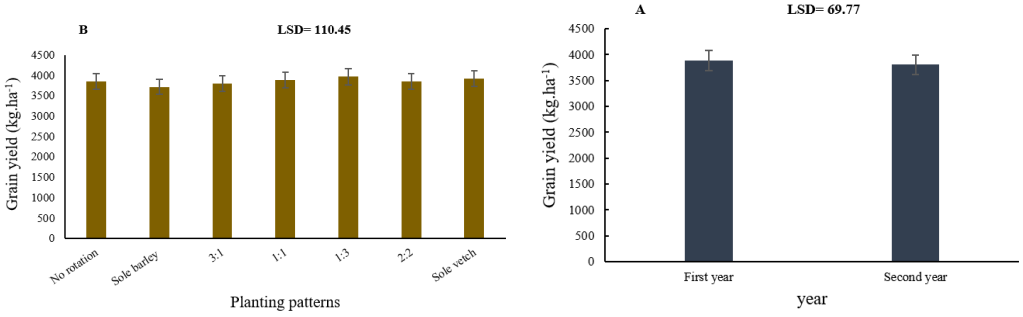
بهره‌وری سیستم (SPI)

نتایج شاخص بهره‌وری سیستم (SPI) در جدول ۴ ارائه شده است. بالا بودن این شاخص بیانگر افزایش کارآیی سیستم کشت مخلوط می‌باشد. مقادیر شاخص بهره‌وری سیستم در کلیه نسبت‌های کشت مخلوط مثبت بود که نشان‌دهنده سودمندی و مزیت اقتصادی کشت مخلوط جو و ماشک در مقایسه با کشت خالص دو گونه می باشد. براساس نتایج، تیمارهای یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱)، سه ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۳) و دو ردیف جو + دو ردیف ماشک (۲:۲) به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۵۷۹، ۱۵۱۱ و ۱۴۲۶ از نظر شاخص بهره‌وری سیستم در رتبه‌های اول تا سوم قرار داشتند. مقدار شاخص بهره‌وری سیستم در تیمار یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۱:۱) نسبت به تیمار یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱)، ۳۴/۳ درصد افزایش نشان داد. در مجموع، بررسی روند نتایج بیانگر نقش مؤثر جو در افزایش بهره‌وری سیستم کشت مخلوط بود. نتایج بررسی عملکرد و شاخص‌های سودمندی کشت مخلوط گیاهان علوفه‌ای یک‌ساله با جو نشان داد که بیشترین مقدار شاخص بهره‌وری

سیستم در تیمار کشت مخلوط ۷۵ درصد نخود علوفه‌ای + ۲۵ درصد جو به دست آمد (Lameie-Harvani, 2013). در آزمایشی دیگر گزارش شد که مقادیر شاخص بهره‌وری سیستم در تمامی الگوهای کشت مخلوط جو و نخود مثبت بود و بیشترین مقدار آن در الگوی کشت ۷۵ درصد جو + ۲۵ درصد نخود حاصل شد (Javanmard et al., 2018).

عملکرد دانه برنج

نتایج نشان داد که عملکرد دانه برنج تحت تأثیر سال و الگوی کشت قرار گرفت. بر این اساس، عملکرد دانه برنج در سال اول آزمایش (۳۸۸۰ کیلوگرم در هکتار) بیشتر از سال دوم (۳۸۰۵ کیلوگرم در هکتار) بود (شکل ۷). بیشترین عملکرد دانه برنج با میانگین ۳۹۶۸ کیلوگرم در هکتار در تناوب با کشت یک ردیف جو + سه ردیف ماشک (۳:۱) حاصل شد. هرچند با تیمارهای کشت خالص ماشک (۳۹۱۵ کیلوگرم در هکتار) و یک ردیف جو + یک ردیف ماشک (۳۸۸۲ کیلوگرم در هکتار) اختلاف معنی‌داری نداشت. کمترین میزان عملکرد دانه برنج (۳۷۱۴ کیلوگرم در هکتار) نیز در تناوب با کشت خالص جو به دست آمد (شکل ۷). اگرچه عملکرد دانه برنج در تناوب با تیمارهای کشت خالص جو و کشت مخلوط سه ردیف جو + یک ردیف ماشک نسبت به شاهد (بدون تناوب) کاهش یافت، امّا سود حاصل از فروش علوفه در این تیمارها، این ضرر را جبران کرد. در مجموع، نتایج بیانگر این موضوع بود که کشت و برداشت برنج در هر دو سال مورد آزمایش در تناوب با کشت مخلوط جو و ماشک با موفقیت صورت پذیرفت.



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر سال (A) و الگوی کشت (B) بر عملکرد دانه برنج

Fig. 7- Mean comparison for the effects of year (A) and planting pattern (B) on rice grain yield.

میانگین‌های که اختلاف آن‌ها از مقدار LSD در سطح پنج درصد بیشتر باشد، دارای اختلاف معنی‌داری هستند.

Means differing by more than the LSD (5%) are statistically significant.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد کمّی و کیفی علوفه تحت تأثیر الگوی کشت قرار گرفت. بیشترین عملکرد علوفه خشک (۱۱۵۵۰ کیلوگرم در هکتار) در کشت مخلوط ۱:۱ جو: ماشک حاصل شد که نسبت به کشت‌های خالص جو و ماشک به‌ترتیب ۱۶ و ۳۹ درصد افزایش نشان داد. افزایش نسبت ماشک در کشت مخلوط از طریق افزایش میزان پروتئین خام و خاکستر علوفه منجر به بهبود کیفیت علوفه شد. نسبت برابری زمین بیشتر از یک و همچنین مثبت بودن کاهش واقعی عملکرد کل در نسبت‌های ۱:۳، ۱:۱ و ۲:۲ جو: ماشک، بیانگر رعایت اصل تولید حمایتی و سودمندی این الگوهای کشت نسبت به کشت خالص دو گونه بود. نتایج ضریب ازدحام نسبی کل بیانگر غالبیت جو نسبت به ماشک بود، به‌طوری که با افزایش نسبت جو در کشت مخلوط، قدرت تهاجمی آن به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. بیشترین سودمندی کشت مخلوط (۷۵۵۴) به تیمار ۱:۳ جو : ماشک اختصاص داشت. همچنین بیشترین مزیت پولی و بهره‌وری سیستم نیز به‌ترتیب با میانگین‌های ۲۹۴۴۹۱۴۱ و ۱۵۷۹ در تیمار ۱:۱ جو : ماشک حاصل شد. براساس نتایج دو ساله این پژوهش و در شرایط آب‌وهوایی مشابه، کشت مخلوط جو و ماشک با نسبت‌های ۱:۱ و ۱:۳ علاوه‌بر تولید علوفه با کمیت و کیفیت بالا، می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مناسب برای ایجاد تنوع در بوم‌نظام شالیزار، افزایش درآمد شالیکاران و پایداری تولید برنج در منطقه گیلان مورد توجه قرار گیرد. ال، جهت ارائه یک الگوی قطعی،

مطالعات بلندمدت‌تر (حداقل چهار سال) بـرای ارزیـابی پایـداری ایـن نظام‌ها در برابر نوسانات اقلیمی ضروری است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله برخود لازم می‌دانند که از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و مؤسسه تحقیقات بـرنج کشـور، بـه‌جهت حمایت‌های مالی از اجرای این تحقیق تشکر نمایند.

References

1. Ahmadi, A., Dabbagh Mohammdi Nasab, A., Zehtab Salmasi, S., Amini, R., & Janmohammadi, H. (2009). Evaluation of yield and advantage indices in barley and vetch intercropping. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 20*(4), 77-87. (In Persian).
2. Akbari, F., Dahmardeh, M., Morshedi, A., Ghanbari, A., & Khoramdel, S. (2025). Evaluation of the competitive indices and economical advantage of corn (*Zea mays* L.)- bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropping under the influence of tillage levels, crop residues, and planting patterns. *Iranian Journal of Field Crops Research, 23*(3), 341-357. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.90594.1358
3. Benintende, M. C., Sterren, M. A., & Battista, J. J. D. (2008). Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotation system. *Ecological Indicators, 8*(5), 704-708. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.12.004
4. Contreras Paco, J. L., Ramírez Rivera, H., Tunque Quispe, M., Aroni Quintanilla, Y. R., & Curasma Ccente, J. (2020). Productive and nutritional aspects of forages oats and barley alone and consociated to vetch in high Andean conditions. *MOJ Food Processing and Technology, 8*(2), 56-65. https://doi.org/10.15406/mojfpt.2020.08.00243
5. Cuartero, J., Pascual, J. A., Vivo, J. M., Özbolat, O., Sánchez-Navarro, V., Egea-Cortines, M., Zornoza, R., Mena, M. M., Garcia, E., & Ros, M. (2022). A first-year melon/cowpea intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 328*, 107856. https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107856
6. Darabi, A. (2025). The effects of planting patterns and density on yield and monetary benefits in intercropping of onion and lettuce. *Journal of Crop Production and Processing, 15*(1), 71-87. (In Persian). https://doi.org/10.47176/jcpp.15.1.22317
7. Esmaeilian, Y., Eshghizadeh, M., & Tavassoli. A. (2022). Agronomic and economic evaluation of intercropping systems of barley (*Hordeum vulgare*) with two medicinal plants, fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) and garlic (*Allium sativum*). *Journal of Agroecology, 14*(3), 467-484. (In Persian).
8. Javanmard, A., Rostami, A., Nouraein, M., & Gharekhany, G. (2015). Agronomical, ecological and economical evaluation of wheat- chickpea intercropping under rainfed condition of Maragheh. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 26*(1), 19-37. (In Persian).
9. Javanmard, A., Amani Machiani, M., & Mousavi, S. B. (2018). Evaluation of competition and advantage in barley (*Hordeum vulgare* L.) and forage pea (*Pisum sativum* L.) intercropping under rainfed condition. *Journal of Agricultural Science and Sustainable, 28*(3), 1-17. (In Persian).
10. Javanmard, A., Amani Machiani, M., & Eskandari, H. (2019). Evaluation of forage quantity and quality of barley (*Hordeum vulgare* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) intercropping system in Maragheh rainfed conditions. *Journal of Agroecology, 11*(2), 435-452. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.65105
11. Jeylani, M., Ajam Norouzi, H., & Rabiee, M. (2015). Effect of planting bed on quantity and quality of hay in different mixing ratio of barley and vetch in rainfed condition of Rasht area. *Research in Crop Ecosystems, 2*(3), 23-35. (In Persian).
12. Kheradmand, S., Mahmodib, S., & Ahmadi, E. (2014). Quantitative and qualitative performance evaluation of green pea and barley forage intercropping. *Applied Field Crops Research, 27*(105), 111-118. https://doi.org/10.22092/aj.2014.103358
13. Khraryan, B., Farahvash, F., Mohammadi, S., Mirshekari, B., & Rashidi, V. (2024). Evaluation of quantitative and qualitative of forage yield in intercropping of barley (*Hordeum vulgare* L.) with vetch (*Vicia villosa* Roth). *Crop Physiology Journal*, *16*(63), 59-77. (In Persian).

14. Kugbe, X. J., Yaro, R. N., Soyel, J. K., Kofi, E. S., & Ghaney, P. (2018). Role of intercropping in modern agriculture and sustainability: A review. *British Journal of Science, 16*(2), 67-75.
15. Lameie-Harvani, J. (2013). Assessment of dry forage and crude protein yields, competition and advantage indices in mixed cropping of annual forage legume crops with barley in raifed conditions of Zanjan province in Iran. *Seed and Plant Production Journal, 2*(29), 169-183. (In Persian).
16. Lan, Y., ZhangHe, Y., Jiang, C., Yang, M., & Ye, S. (2023). Legume-bacteria-soil interaction networks linked to improved plant productivity and soil fertility in intercropping systems. *Industrial Crops and Products, 196*(3), 116504. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116504
17. Lithourgidis, A. S., Vlachostergios, D. N., Dordas, C. A., & Damalas, C. A. (2011). Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems. *European Journal of Agronomy, 34*(4), 287-294. https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.007
18. Maitra, S., Hossain, A., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., Gitari, H., Brahmachari, K., Shankar, T., Bhadra, P., Palai, J. B., Jena, J., Bhattacharya, U., Duvvada, S. K., Lalichetti, S., & Sairam, M. (2021). Intercropping-a low input agricultural strategy for food and environmental security. *Agronomy, 11*(2), 311-343. https://doi.org/10.3390/agronomy11020343
19. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Mondani, F., Feizi, H., & Amirmoradi, S. (2015). Determination of optimal strip width in strip intercropping of maize (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Northeast Iran. *Journal of Cleaner Production, 106*, 343-350. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.099
20. Rabiee, M., & farahdahr, F. (2020). Evaluation of yield and advantages of forage legumes with cereals intercropping as second crop in paddy fields. *Plant Productions, 43*(3), 363-374. (In Persian). https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27838.1689
21. Rabiee, M., & Shaker Kouhi, S. (2025). Best intercropping systems after rice harvesting in paddy fields of Guilan province. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 10*(1), 33-44. (In Persian). https://doi.org/10.22067/ijpr.2024.89419.1096
22. Rezaei Noupashani, S., & Aminpanah, H. (2018). Effect of different crops rotation with rice, N rate and N split application on crop grain yield. *Journal of Plant Ecophysiology, 9*(31), 95-106. (In Persian).
23. Sadra, T., & Hamzei, J. (2021). Evaluation of the efficiency of triticale (*Triticosecale Wittmack*) intercropping with winter vetch (*Vicia villosa* L.) by competitive indices under different tillage systems. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 31*(3), 1-18. (In Persian). https://doi.org/10.22034/saps.2021.41625.2541
24. Salehi, Z., Amirnia, R., Rezaeichiyaneh, E., & Khalilvandi Behrozyar, H. (2018). Evaluation of yield and some qualitative traits of forage in intercropping of triticale with annual legumes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 28*(4), 59-76. (In Persian).
25. Shafagi, A., Abbas Dokht, H., & Gholipoor, M. (2020). Effect of nitroxin and urea fertilizers on some quantitative and qualitative traits of corn and fenugreek forage based on additive intercropping in south Khorasan. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 30*(1), 257-277. (In Persian).
26. Shakour Zadeh, A., Alizadeh, K., Pour Yousef, M., & Ghaffari, A.A. (2012). Study of density and nixed ratios on forage qualitative and quantitative yield in intercropping of barley and vetch under dryland conditions. *Iranian Journal of Dry Land Farming, 1*, 63-74. (In Persian).
27. Tabatabaei, S. A., & Ranjbar, G. H. (2012). Effect of different levels of nitrogen and potassium on grain yield and protein of triticale. *International Research Applied and Basic Sciences, 3*(2), 390-393.
28. Tzemi, D., Peltonen-Sainio, P., Palosuo, T., Rämö, J., & Lehtonen, H. (2025). Profitability of intercropping legumes with cereals: A farm-level analysis. *Journal of Agriculture and Food Research, 21*, 101804. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101804
29. Ul-Allah, S., Khan, A. A., Fricke, T., Buerkert, A., & Wachendorf, M. (2014). Fertilizer and irrigation effects on forage protein and energy production under semi-arid conditions of Pakistan. *Field Crops Research, 159*, 62-69. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.01.003
30. Wang, Y., Qin, Y., Chai, Q., Feng, F., Zhao, C., & Yu, A. (2018). Interspecies interactions in relation to root distribution across the rooting profile in wheat-maize intercropping under different plant densities. *Frontiers in Plant Science, 9*, 483. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00483
31. Zeiditoolabi, N., Khomri, I., Sirous Mehr, A., Daneshvar, M., Glovy, M., & Dehmordeh, M. (2021). Quantitative and qualitative evaluation of vetch (*Vicia narbonensis*) and barley (*Hordeum vulgar*) intercropping in

Khorramabad rainfed conditions under the influence of aztobarvar-1 biofertilizer and superabsorbent material. *Crop Physiology Journal, 13*(49), 167-185. (In Persian).

32. Zhang, Y., Liu, J., Zhang, J., Liu, H., Liu, S., Zhai, L., Wang, H., Lei, Q., Ren, T., & Yin. C. (2015). Row ratios of intercropping maize and soybean can affect agronomic efficiency of the system and subsequent wheat. *Plos One, 10*(6), e0129245. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129245

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 18, No. 2, 2026, p. 247-269

Evaluation of Yield and Yield Stability of Evolutionary Populations and Dynamic Mixtures of Rainfed Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Iran

Maedeh Salimi[1], Alireza Koocheki[1*], Mehdi Nassiri Mahallati[1], Sayyed Alireza Beheshti[2], Stefania Grando[3] and Salvatore Ceccarelli[3]

1- Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2- Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Khorasan Razavi Province, Mashhad, Iran
3- Independent Consultant, Ascoli Piceno, Italy
(*- Corresponding author's Email: akooch@um.ac.ir)

Received: 03-06-2026
Revised: 29-07-2026
Accepted: 15-08-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:
Salimi, M., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Beheshti, S. A., Grando, S., & Ceccarelli, S. (2026). Evaluation of yield and yield stability of evolutionary populations and dynamic mixtures of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) in Iran. *Journal of Agroecology*, *18*(2), 247-269. (In Persian)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.99067.1273

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important staple crops worldwide and plays a crucial role in food security in Iran. A large proportion of wheat production in the country occurs under rainfed conditions, where yields are highly sensitive to drought, climatic variability, and limited genetic diversity among cultivated varieties. In semi-arid regions, the increasing frequency of dry years associated with climate change has further intensified yield instability and production risks in rainfed wheat systems. Under such conditions, reliance on genetically uniform improved cultivars typically developed under relatively stable environments may limit the adaptive capacity of cropping systems. Increasing intraspecific genetic diversity through heterogeneous populations has therefore been proposed as an alternative strategy to enhance resilience in variable environments. Evolutionary populations and dynamic mixtures represent practical approaches within the framework of evolutionary plant breeding, in which genetically diverse populations are cultivated in farmers' fields and allowed to evolve over time under natural selection and local environmental conditions. The high level of genetic diversity maintained in these populations can enhance buffering capacity against environmental stresses and contribute to improved yield stability across environments. However, evaluating their performance requires analytical approaches that consider not only mean yield but also yield variability and production risk. Among the available stability measures, the reliability index combines mean performance with environmental variance and provides an estimate of the minimum yield expected under unfavorable conditions. The objective of this study was to evaluate the agronomic performance, yield stability, and reliability of wheat evolutionary populations and dynamic mixtures compared with landraces and improved varities under rainfed conditions in Iran.

Materials and Methods

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.99067.1273

This study was conducted over three consecutive cropping seasons (2019–2021) at four rainfed locations in Iran: Ravansar–Moradabad in Kermanshah province, Firoozabad and Naqsh-e Rostam in Fars province, and Faruj in North Khorasan province, Iran. These sites represent a range of environmental conditions typical of rainfed wheat production systems in Iran. Sixteen wheat genotypes were evaluated, including twelve evolutionary populations and dynamic mixtures, two landraces (Sardari and Kal Heydari), and two improved cultivars (Azar 2 and Chamran 2). The experiment was arranged in a randomized complete block design with three replications at each location. In each season, part of the harvested seed from each genotype was replanted in the following year to maintain the evolutionary process within the heterogeneous populations. Several agronomic and morphological traits were measured during the growing season, including grain yield, biomass yield, straw yield, harvest index, thousand kernel weight, plant height, and spike length. In addition, selected traits were assessed at the individual plant level to evaluate within-population variability. The data were analysed using a mixed model; the significance of tested effects was assessed using F-tests, and mean comparisons among entries were performed using the Bonferroni test. To assess genotype stability across environments, five stability indices were calculated: cultivar superiority, environmental variance, Wricke's ecovalence, mean ranks, and variance of ranks. In addition, the reliability index was calculated for grain yield, biomass yield, straw yield, and plant height. This index combines mean performance with environmental variance and estimates the minimum yield expected under most environmental conditions, thus providing an indicator of yield risk.

Results and Discussion

The mixed-model analysis showed significant year × location effects for all measured traits, indicating strong environmental heterogeneity across the rainfed testing environments. The main effect of entry was not significant for most plot-level yield traits, including grain yield and biomass yield, while harvest index and some plant-level traits, particularly spike length and kernel number per spike, showed significant entry effects. Mean grain yield and biomass yield of the evolutionary populations and dynamic mixtures were not significantly different from those of the landraces and improved cultivars, indicating that increased within-crop genetic diversity did not reduce average performance. However, several evolutionary populations and dynamic mixtures ranked higher in stability and reliability indices than the reference landraces and improved cultivars. In particular, EP-Sharareh and MIX-4096 showed higher grain-yield reliability than Sardari, while MIX-6097, MIX-Sararood and MIX-6093 outperformed Azar 2 in reliability. These findings suggest that evolutionary populations and dynamic mixtures should be evaluated not only by mean yield, but also by genotype × environment responses, stability and reliability under variable rainfed conditions.

Conclusion

Overall, the results of this study demonstrate that increasing intraspecific genetic diversity through evolutionary populations and dynamic mixtures can enhance yield stability and reduce production risk in rainfed wheat systems. Although the mean yield of these populations was not significantly different from that of landraces and improved cultivars, some populations showed clear advantages in terms of stability and reliability indices. These findings suggest that heterogeneous wheat populations may provide a promising strategy for improving the resilience of rainfed cropping systems under increasing climatic variability.

Keywords: Genetic diversity, Heterogeneous populations, Local adaptation, Reliability

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۶۹-۲۴۷

ارزیابی عملکرد و ثبات عملکرد جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویای گندم (*Triticumaestivum* L.) دیم در ایران

مائده سلیمی[۱]، علیرضا کوچکی[۱*]، مهدی نصیری محلاتی[۱]، سید علیرضا بهشتی[۲]، استفانیا گراندو[۳] و سالواتوره چکرلی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

چکیده

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از محصولات اصلی ایران است و تولید آن به‌ویژه در شرایط دیم، طی سال‌های اخیر تحت تأثیر خشکسالی‌های مکرر، نوسانات اقلیمی و محدودیت تنوع ژنتیکی قرار گرفته است. افزایش تنوع ژنتیکی از طریق به‌کارگیری جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا می‌تواند راهبردی مؤثر برای افزایش تاب‌آوری و ثبات عملکرد در شرایط متغیر محیطی و اقلیمی باشد. در این پژوهش، عملکرد زراعی، ثبات و قابلیت اطمینان ۱۶ ژنوتیپ شامل ۱۲ جمعیت تکاملی و مخلوط پویا (جمعیت تکاملی پرتویی، جمعیت تکاملی سیفی، جمعیت تکاملی رستمی، جمعیت تکاملی شراره، مخلوط پویا نیک‌فرجام، مخلوط پویا کشکولی، مخلوط پویا ۶۰۹۷، ۶۰۹۳ مخلوط پویا، مخلوط پویا ۱۰۰۹۶، مخلوط پویا ۴۰۹۶، مخلوط پویا سرارود و مخلوط پویا دوروم) به‌همراه دو رقم بومی (سرداری و کل حیدری) و دو رقم اصلاح‌شده (آذر ۲ و چمران) طی سه سال زراعی (۱۴۰۱-۱۳۹۹) در چهار منطقه دیم شامل روانسر در استان کرمانشاه، فیروزآباد و نقش‌رستم در استان فارس و فاروج در استان خراسان شمالی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بررسی شد. در هر سال و مکان، بخشی از بذر برداشت‌شده از هر ژنوتیپ برای کشت سال بعد مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های صفات زراعی و ریخت‌شناسی با استفاده از مدل آمیخته تحلیل شدند و ثبات ژنوتیپ‌ها با پنج شاخص ثبات و شاخص قابلیت اطمینان در سطح ۸۵ درصد ارزیابی گردید. برهم‌کنش سال × مکان برای همه صفات معنی‌دار بود، درحالی‌که اثر اصلی ژنوتیپ بر عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه معنی‌دار نشد. میانگین عملکرد دانه چهار جمعیت تکاملی در محدوده‌ای قابل مقایسه با ارقام بومی و اصلاح‌شده قرار داشت. با وجود این، توده‌های ناهمگن هفت رتبه نخست ثبات کلی را به خود اختصاص دادند و مخلوط پویا ۶۰۹۷، مخلوط پویا دوروم و جمعیت تکاملی شراره به‌ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. جمعیت تکاملی شراره با شاخص قابلیت اطمینان عملکرد دانه حدود ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، بالاترین مقدار را در بین ژنوتیپ‌ها داشت و مخلوط پویا ۴۰۹۶ با مقدار ۳۷۳ کیلوگرم در هکتار در رتبه دوم قرار گرفت؛ مقادیر هر دو ژنوتیپ از ارقام شاهد بیشتر بود. میانگین عملکرد شراره از نظر عددی از ارقام آذر ۲ و کل حیدری بیشتر و به رقم سرداری نزدیک بود. عملکرد، ثبات و قابلیت اطمینان مطلوب شراره، که از تنوع ژنتیکی اولیه بالایی برخوردار بود و پیش از آغاز آزمایش در محیط دیگری کشت نشده بود، در کنار نتایج به‌دست‌آمده از جمعیت‌های تکاملی پرتویی، سیفی و رستمی نشان داد که پاسخ جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا احتمالاً افزون‌بر میزان تنوع ژنتیکی اولیه، تحت تأثیر تاریخچه کشت، سازگاری محلی و فشارهای انتخابی پیش قرار دارد. پاسخ مواد ناهمگن علاوه‌بر تنوع ژنتیکی اولیه، احتمالاً تحت تأثیر تاریخچه کشت و فشارهای انتخابی پیشین نیز قرار دارد. بنابراین جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا می‌توانند ضمن حفظ میانگین عملکردی قابل مقایسه، ثبات بیشتر و ریسک افت عملکرد کمتری را فراهم کنند و به‌عنوان یکی از رویکردهای اگرواکولوژیک برای تقویت پایداری تولید در کشاورزی دیم مورد توجه قرار گیرند.

۱- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، مشهد، ایران
۳- مشاور مستقل، آسکولی پیچنو، ایتالیا
(*- نویسنده مسئول: Email: akooch@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.99067.1273

واژه‌های کلیدی: تنوع ژنتیکی، جمعیت‌های ناهمگن، سازگاری محلی، قابلیت اطمینان

مقدمه

جهان امروز با چالش‌هایی همچون تغییر اقلیم، افـزایش شـدت و گسترش خشکسالی‌ها، تخریب بوم‌نظـام‌هـا و کـاهش تنـوع زیسـتی روبه‌رو است. تغییر اقلیم، افزون‌بر دگرگون کردن الگوهای بارش و دما موجب تغییر در نوع، پـراکنش و شـیوه گسـترش آفـات، بیماری‌هـا و علف‌های هرز نیز می‌شود. از سوی دیگر، اتکای کشاورزی مـدرن بـه کشت تعداد محدودی از گونه‌ها و ارقام زراعی و گسـترش یکنـواختی ژنتیکی، به فرسایش تنوع گونه‌ای و ژنتیکی انجامیده است. مجموعـه این چالش‌ها، پایداری بوم‌نظام‌های زراعی را تحـت تـأثیر قـرار داده و امنیـت غـذایی را تهدیـد می‌کنـد (FAO, 2025; IPPC, 2023; Isbell et al., 2015).

ایران نیز به‌عنوان کشوری گرم و خشک، به‌شدت تحت تأثیر این چالش‌ها قرار دارد و در برابر تغییر اقلیم و خشکسالی بسیار آسیب‌پذیر است. پژوهش‌های مختلف، کاهشِ معنادار بارندگی و افـزایش دمـا را در مناطق مختلف گزارش کرده و پیش‌بینی‌ها از تشدید این روندها در دهه‌های آینده حکایـت دارد (Derakhshandeh et al., 2024). در این بین، بخش کشـاورزی بـه‌ویژه کشـاورزی دیـم، کـه وابسـته بـه بارش‌های طبیعی است و در برابر نوسانات اقلیمـی آسـیب‌پذیر اسـت، به‌شدت بیشتری تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Akbari et al., 2022).

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌تـرین محصـولات زراعی ایران محسوب می‌شود و براساس آخـرین آمـار رسـمی وزارت جهاد کشاورزی، در حدود ۵۸ درصد از اراضی زراعی کشور تحت نظام دیم و آبی کشت می‌شود. ایـن محصـول بـا اختصـاص ۷۳ درصـد از اراضی دیم (حدود ۴/۸ میلیون هکتار)، حدود ۷/۷ میلیـون تـن تولیـد داشته و متوسط عملکرد آن ۱/۶ تن در هکتار بـوده اسـت. در بخـش آبی نیز گندم با تولید حدود ۱۰/۸۳ میلیون تن، سهمی معـادل ۱۳/۵۷ درصد از کل تولید محصولات آبی کشور داشته و متوسط عملکـرد آن ۳/۸ تن در هکتار گزارش شـده اسـت (Ministry of Agriculture Jihad, 2023). با وجود افزایش عملکرد گندم در ایران طی دهه‌های اخیر، ثبات عملکـرد آن بـه رونـد رو بـه کـاهش همـراه بـوده اسـت (Nassiri Mahallati & Koocheki, 2014). افزون‌بر این، عملکرد گندم دیم به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از پتانسـیل واقعـی آن اسـت و انتظار می‌رود که تغییر اقلیم، این شکاف عملکرد موجود را تشدید کند (Amirifar et al., 2011).

در ایران، دو برنامه مستقل به‌نژادی گندم برای مناطق آبی و دیـم وجود دارد. مطالعات مختلف بین‌المللی نشان می‌دهد که توجه بیشـتر به رویکرد انتخاب غیرمتمرکز، بهره‌گیـری مـؤثر از تعامـل ژنوتیـپ × محیط، افـزایش تنـوع ژنتیکـی و توسـعه ارقـام جدیـد بـا سـازگاری اختصاصی کارآیی برنامه‌های به‌نژادی را به‌ویژه در شرایط دیم بهبـود می‌بخشد (Ceccarelli & Grando, 2007). به همین دلیل، تقویـت هم‌زمان بهره‌وری، ثبات، تاب‌آوری و تنوع زیستی کشاورزی بـه‌عنوان یک ضرورت راهبردی مهم مطرح می‌شود (Krug et al., 2023).

در پاسـخ بـه ایـن چالش‌هـا، برنامـه‌های بـه‌نژادی غیرمتمرکـز و مشارکتی که در آن کشاورزان به‌طور فعال در فرآینـد انتخـاب شـرکت می‌کنند، راه‌حل‌هایی نویدبخش به شمار می‌رونـد. ایـن رویکردهـا بـا تأکید بر همکاری نزدیک با کشاورزان، افزایش تنوع ژنتیکی در سطح مزارع و انتخاب در محیط واقعی مزرعه، به‌ویژه در نظام‌های کم‌نهـاده و حاشـیه‌ای ماننـد کشـاورزی دیـم مـؤثر اسـت (Ceccarelli & Grando, 2007). افـزایش تنـوع ژنتیکـی بـا اسـتفاده از روش‌هـای مختلف مانند کشـت مخلـوط ارقـام و بـه‌نژادی تکـاملی گیاهـان (EPB[1]) می‌تواند ضمن ارتقای ثبات، به بهبود عملکرد در محیط‌های کم‌نهـاده و پـرتنش کمـک نمایـد (Döring et al., 2015; Krug et al., 2023).

در روش به‌نژادی تکاملی گیاهان زراعی از جمعیت‌هـای تکـاملی (EPs[2]) و مخلوط‌هـای تکـاملی/ پویـا (MIXs[3]) اسـتفاده می‌شـود. جمعیت‌های تکاملی از تلاقی چندین ژنوتیـپ مختلـف از یـک گونـه زراعـی و ترکیـب بـذر نسـل‌های اولیـه (F_1 یـا F_2) ایجـاد می‌شـوند (Suneson, 1956)؛ درحالی‌کـه مخلوط‌هـای تکـاملی و یـا پویـا از ترکیب ارقام و یا لاین‌های اصلاحی مختلـف تشـکیل می‌شـوند و در آن‌ها بخشی از بذر برداشت‌شده برای کشت سال بعد استفاده می‌شود[4]

1- Evolutionary plant breeding
2- Evolutionary populations
3- Dynamic mixtures
۴- مخلوط‌ها از ترکیب ارقام و لاین‌های اصلاحی مختلف تشکیل می‌شوند و بسته به شیوه مدیریت، دو نوع ایستا و پویا هستند. در مخلوط‌های ایستا، هرساله مقـدار مشخصی از بذرها با یکدیگر مخلوط شده و کشت می‌شوند، ولـی در مخلوط‌هـای پویا، بخشی از بذر برداشت‌شده برای کشت سال بعد استفاده می‌شود (Salimi et al., 2023).

(Salimi et al., 2023). جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های تکاملی / پویا (که در این پژوهش به‌طورکلی با عنوان جمعیت‌های تکاملی از آن‌ها یاد می‌شود) با اصطلاحاتی چون جمعیت‌های توده‌ای[1] و مخلوط‌های تلاقی مرکب[2] هم‌معنی بوده و در مقالات علمی از هر سه واژه استفاده می‌شود (Ceccarelli & Grando, 2020).

انتخاب طبیعی، نقش مهمی در سازگاری تدریجی این جمعیت‌ها با شرایط اقلیمی، محیطی و مدیریتی ایفا می‌کند (Suneson, 1956). این جمعیت‌ها از قابلیت سازگاری پویا برخوردارند و می‌توانند به‌تدریج ویژگی‌های فنولوژیک و عملکردی خود را در پاسخ به شرایط محیطی تطبیق دهند (Goldringer et al., 2006). نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که جمعیت‌های تکاملی در نظام‌های کم‌نهاده و پُرتنش مانند کشت دیم، عملکرد و ثبات قابل قبولی نشان می‌دهند (Murphy et al., 2004; Raggi et al., 2017). در به‌نژادی تکاملی، فرآیند سازگاری در بستر انتخاب طبیعی و در تعامل با شرایط محیطی، اقلیمی و مدیریتی محل کشت رخ می‌دهد و در صورت تداوم کشت در یک محیط مشخص می‌تواند به غلبه انتخاب جهت‌دار و شکل‌گیری سازگاری محلی یا اختصاصی منجر شود؛ فرآیندی که طی آن، جمعیت به‌تدریج برای شرایط محیطی غالب بهینه می‌شود. ازاین‌رو، در چارچوب این روش، عملکرد و ثبات جمعیت‌های تکاملی حاصل برهم‌کنش بین تنوع ژنتیکی، پیشینه ژنتیکی والدین، انتخاب طبیعی و تاریخچه کشت آن‌ها در محیط‌های مختلف است (Ceccarelli & Grando, 2020).

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در خصوص استفاده از روش به‌نژادی تکاملی گیاهان زراعی در محصولات مختلف از جمله گندم، جو (*Hordeum vulgare* L.)، برنج (*Oryza sativa* L.) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L) شده است (Ceccarelli & Grando, 2024). نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از این روش و بهره‌گیری از تنوع ژنتیکی می‌تواند نقش کلیدی در افزایش و ثبات عملکرد (Raggi et al., 2017)، مقاومت به آفات و بیماری‌ها (Neupane et al., 2025) و مهار علف‌های هرز (Ceccarelli & Grando, 2024) داشته باشد و روشی مورد اطمینان برای شرایط کم‌نهاده و دیم محسوب می‌شود (Murphy et al., 2004).

در ایران، فعالیت‌های مرتبط با به‌نژادی تکاملی، ابتدا با آغاز کشت جمعیت جو تکاملی در سال ۱۳۸۷ شروع شد و سپس به گندم (در سال ۱۳۸۸) و برنج (در سال ۱۳۹۲) گسترش یافت (Ceccarelli et al., 2022). با وجود استفاده از این روش به مدت نسبتاً طولانی در سطح مزارع کشاورزان، ارزیابی علمی جمعیت‌های تکاملی در ایران از سال ۱۳۸۹ آغاز شده و تاکنون شامل بررسی پایداری صفات زراعی جمعیت‌های تکاملی جو در شرایط دیم (Salimi et al., 2023)، ارزیابی عملکرد دو جمعیت تکاملی جو تحت تنش شوری آب و خاک (Pirasteh et al., 2023) و بررسی صفات زراعی مخلوط‌های پویا در ارقام بومی برنج ایران (Nasiri et al., 2024) بوده است.

با وجود اهمیت راهبردی گندم در نظام‌های زراعی کشور، مطالعات مربوط به ارزیابی جمعیت‌های تکاملی این محصول در شرایط دیم ایران هنوز بسیار محدود است. ازاین‌رو هدف این پژوهش، ارزیابی عملکرد زراعی و ثبات عملکرد گندم در جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا تحت شرایط دیم ایران بود. برای این منظور، چهار جمعیت تکاملی، هشت مخلوط پویا، دو رقم بومی و دو رقم اصلاح‌شده در چهار منطقه و طی سه سال مورد ارزیابی قرار گرفتند. این مطالعه با هدف بررسی نقش تنوع ژنتیکی در بهبود ثبات عملکرد و کاهش ریسک تولید در نظام‌های دیم انجام شد.

مواد و روش‌ها

مناطق اجرای آزمایش و داده‌های هواشناسی

این پژوهش طی سه سال زراعی متوالی (۱۳۹۸-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۰) در چهار منطقه با شرایط محیطی متفاوت در استان‌های کرمانشاه، فارس و خراسان شمالی اجرا گردید. آزمایش‌ها در شرایط واقعی مزرعه کشاورزان انجام شدند. مزارع منتخب، از جمله مزارعی بودند که به‌طور متداول برای اجرای پژوهش‌های مزرعه‌ای[3] توسط مراکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان‌های مربوطه مورد استفاده قرار می‌گرفتند. مناطق اجرای آزمایش شامل روستای مرادآباد در شهرستان روانسر از استان کرمانشاه، روستای حسین‌آباد در شهرستان مرودشت (نقش‌رستم) در استان فارس، روستای مهکویه بالا در شهرستان فیروزآباد در استان فارس و روستای نجف‌آباد در شهرستان فاروج از استان خراسان شمالی بودند.

1- Bulk populations
2- Composite crosses populations
3- On-farm

جدول ۱- بارندگی ماهانه در مکان‌های آزمایش طی سال‌های اجرای آزمایش (مهر تا تیر)

Table 1- Monthly rainfall at the experimental sites during the experimental seasons (October–June)

مکان Location	سال زراعی Crop season	متغیر Variable	مهر Oct.	آبان Nov.	آذر Dec.	دی Jan.	بهمن Feb.	اسفند Mar.	فروردین Apr.	اردیبهشت May	خرداد Jun.
روانسر Ravansar	2019–2020	بارش Rainfall (mm)	53	13	58	30	119	114	67	3	0
	2020–2021		0	150	36	30	72	27	2	4	0
	2021–2022		3	49	24	74	89	42	44	19	0
نقش‌رستم Naghshe Rostam	2019–2020	بارش Rainfall (mm)	6	36	56	117	6	84	76	1	0
	2020–2021		0	59	51	0	33	8	4	1	0
	2021–2022		0	4	34	89	15	3	4	1	0
فیروزآباد Firuzabad	2019–2020	بارش Rainfall (mm)	7	1	92	111	27	84	87	0	0
	2020–2021		0	47	107	1	48	4	6	0	0
	2021–2022		0	1	58	150	22	7	5	0	0
فاروج Farouj	2019–2020	بارش Rainfall (mm)	11	13	16	15	31	56	150	22	0
	2020–2021		0	47	107	0	5	35	17	56	0
	2021–2022		16	10	7	11	40	47	20	53	3

میانگین ده‌ساله بارندگی سالانه و متوسط دماهای حداقل و حداکثر، براساس داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به هر مکان آزمایش، شامل ایستگاه روانسر برای روستای مرادآباد، ایستگاه تخت‌جمشید برای حسین‌آباد مرودشت (نقش‌رستم)، ایستگاه فیروزآباد برای مهکویه بالا و ایستگاه فاروج برای نجف‌آباد، نشان می‌دهد که میانگین بارندگی سالانه در مناطق مورد مطالعه بین ۲۶۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر متغیر بوده است. به‌طوری که بیشترین میانگین بارندگی سالانه در روانسر با ۵۰۰ میلی‌متر، و کمترین آن در نقش‌رستم با ۲۶۰ میلی‌متر ثبت شده است. همچنین متوسط دمای حداکثر از ۲۱ درجه سانتی‌گراد در فاروج تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد در فیروزآباد و متوسط دمای حداقل از ۵/۷ درجه سانتی‌گراد در فاروج تا ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد در فیروزآباد متغیر بوده است.

داده‌های بارندگی دوره مهر تا خرداد، منطبق با فصل رشد گندم، نیز از همان ایستگاه‌های هواشناسی استخراج شد و جزئیات آن در جدول ۱ ارائه شده است. براساس این داده‌ها، سال زراعی ۱۳۹۹–۱۳۹۸ در بیشتر مناطق مرطوب‌ترین و سال زراعی ۱۴۰۰–۱۳۹۹ خشک‌ترین سال دوره اجرای آزمایش بود، همچنین در نقش‌رستم بارندگی طی دو سال پایانی آزمایش پایین بود.

مواد گیاهی

مواد ژنتیکی مورد استفاده در این پژوهش، انواعی از جمعیت‌های ناهمگن (جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا) به همراه ارقام بومی و اصلاح‌شده گندم بودند که در ادامه از آن‌ها با عنوان ژنوتیپ نام برده می‌شود. در مجموع، ۱۶ ژنوتیپ در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت که شامل چهار جمعیت تکاملی (پرتویی، سیفی، رستمی و شراره)، هشت مخلوط پویا (نیک‌فرجام، کشکولی، ۶۰۹۷، ۶۰۹۳، ۱۰۰۹۶، ۴۰۹۶، سرارود و دوروم)، دو رقم بومی (سرداری و کل حیدری) و دو رقم اصلاح‌شده (آذر۲ و چمران۲) بود. جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا مورد استفاده در این پژوهش، پیش از آغاز آزمایش حاضر، در دیم‌زارهای مناطق مختلف کشور سابقه کشت داشته‌اند و مدت کشت آن‌ها بین یک تا چند دهه متغیر بوده است. مشخصات کامل این جمعیت‌ها، به‌همراه ارقام اصلاح‌شده و ارقام بومی که به‌عنوان شاهد در این آزمایش استفاده شدند، در جدول ۲ ارائه شده است. ارقام بومی و اصلاح‌شده مورد استفاده در این پژوهش دارای سابقه کشت طولانی در مناطق مختلف کشور هستند و از مناطق اصلی کشت آن‌ها تهیه شدند.

جدول ۲- مشخصات ۱۶ ژنوتیپ مورد استفاده در پژوهش

Table 2- Specifications of the 16 genotypes used in the study

ژنوتیپ‌های گندم Wheat genotypes	مشخصات Description
جمعیت تکاملی پرتویی EP-Partoee	این جمعیت منشأ گرفته از نخستین جمعیت پایه گندم تکاملی ایران (۱۳۸۸) است که پس از کشت مداوم در کرندغرب (۱۳۹۲–۱۳۸۸)، به روستای مرادآباد در روانسر منتقل شد و تحت شرایط دیم در مزرعه کشاورز کشت شد (۱۳۹۲–۱۳۹۷). This population originated from Iran's first base evolutionary wheat population (2009), which, after continuous cultivation in Kerend-e Gharb (in 2009–2013), was transferred to Moradabad village in Ravansar and cultivated under rainfed conditions in a farmer's field (in 2013–2018).
جمعیت تکاملی رستمی EP-Rostami	این جمعیت منشأ گرفته از نخستین جمعیت پایه گندم تکاملی ایران (۱۳۸۸) است که طی سال‌های ۱۳۹۲–۱۳۸۸ در کرندغرب، طی سال‌های ۱۳۹۳–۱۳۹۲ در روانسر و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ در مسجدسلیمان تحت شرایط دیم بسیار گرم و پُرتنش کشت شد. This population originated from Iran's first base evolutionary wheat population (2009) and was cultivated in Kerend-e Gharb in 2009–2013, Ravansar in 2013–2014, and under hot and stress-prone rainfed conditions in Masjed Soleyman in 2014–2018.
جمعیت تکاملی سیفی EP-Seyfi	این جمعیت منشأ گرفته از نخستین جمعیت پایه گندم تکاملی ایران (۱۳۸۸) است که طی سال‌های ۱۳۸۸–۱۳۹۲ در کرندغرب، طی سال‌های ۱۳۹۳–۱۳۹۲ در روانسر و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ در مراغه تحت شرایط دیم سرد و نیمه‌مرطوب کشت شد. This population originated from Iran's first base evolutionary wheat population (2009) and was cultivated in Kerend-e Gharb in 2009–2013, in Ravansar in 2013–2014, and in Maragheh,in 2014–2018 under cold, semi-humid and rainfed conditions.
جمعیت تکاملی شراره EP-Sharareh	این جمعیت در سال ۱۳۹۷ از ترکیب مقادیر مساوی بذر تمامی جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا استفاده‌شده در این پژوهش و توسط محقق ایجاد شد و تخمین زده می‌شود که شامل حدود ۴۰۰ ژنوتیپ باشد. This population was created by the researcher in 2018 by combining equal amounts of seed from all evolutionary populations and dynamic mixtures used in this study and is estimated to include approximately 400 genotypes.

مخلوط پویا نیک‌فرجام MIX-Nikfarjam	این مخلوط پویا در سال ۱۳۹۱ از ترکیب ۱۵ ژنوتیپ برتر گندم در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد و طی سال‌های ۱۳۹۳–۱۳۹۱ در دالاهو و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ در مرودشت تحت شرایط دیم همراه با یک تا دو نوبت آبیاری تکمیلی کشت گردید. This dynamic mixture was developed in 2012 by combining 15 superior wheat genotypes at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and was cultivated in Dalahoo in 2012–2014 and in Marvdasht in 2014–2018 under rainfed conditions with one to two supplemental irrigations.
مخلوط پویا کشکولی MIX-Kashkooli	این مخلوط پویا در سال ۱۳۹۱ از ترکیب ۱۵ ژنوتیپ برتر گندم در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد و طی سال‌های ۱۳۹۳–۱۳۹۱ در دالاهو و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ در فیروزآباد استان فارس به‌صورت دیم کشت گردید. This dynamic mixture was developed in 2012 by combining 15 superior wheat genotypes at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and was cultivated in Dalahoo in 2012–2014 and in Firouzabad, Fars Province in 2014–2018 under rainfed conditions.
مخلوط پویا ۶۰۹۳ MIX-6093	این مخلوط در سال ۱۳۹۳ از ترکیب ۶۰ ژنوتیپ برتر گندم با همکاری مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود و کشاورزان بومی ایجاد شد و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ به‌صورت دیم در روستای مرادآباد روانسر کشت گردید. This mixture was created in 2014 by combining 60 superior wheat genotypes in collaboration with the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and local farmers and was cultivated under rainfed conditions in Moradabad village, Ravansar in 2014–2018.
مخلوط پویا ۶۰۹۷ MIX-6097	این مخلوط از ترکیب ۶۰ ژنوتیپ برتر گندم در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود و با مشارکت یکی از کشاورزان پیشرو در سال ۱۳۹۷ تهیه شد. This mixture was prepared by combining 60 superior wheat genotypes at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute, with the participation of a leading farmer in 2018.
مخلوط پویا سرارود MIX - Sararood	این مخلوط در سال ۱۳۹۳ توسط یک کشاورز پیشرو از طریق برداشت مستقیم از سنبله مستقیم از ۲۰ کرت آزمایشی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد و به‌مدت چهار سال پیاپی در روانسر کشت گردید. This mixture was created in 2014 by a leading farmer through direct spike selection from 20 experimental plots at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute, and was cultivated in Ravansar for four consecutive years.
مخلوط پویا ۴۰۹۶ MIX-4096	این مخلوط در سال ۱۳۹۶ برپایه نتایج آزمایش‌های آن‌فارم مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود و با مشارکت کشاورزان بومی از ۴۰ ژنوتیپ برتر گندم تهیه شد و در سال زراعی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ به‌صورت دیم در روستای مرادآباد روانسر کشت گردید. This mixture was prepared in 2017 from 40 superior wheat genotypes based on the results of on-farm trials conducted by the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and with the participation of local farmers and was cultivated under rainfed conditions in Moradabad village, Ravansar, in the 2017–2018 cropping season.
مخلوط پویا ۱۰۰۹۶ MIX-10096	این مخلوط از ترکیب ۱۰۰ رقم و لاین گندم در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد و در سال زراعی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ به‌صورت دیم در روانسر (استان کرمانشاه) کشت گردید. This mixture was prepared from 100 wheat cultivars and lines at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and was cultivated under rainfed conditions in Ravansar (Kermanshah Province) in the 2017–2018 cropping season.
مخلوط پویا دوروم MIX-Durum	این مخلوط در سال ۱۳۹۴ با استفاده از تمامی ارقام موجود گندم دوروم در منطقه کرمانشاه تهیه شد. پس از آن، به‌مدت سه سال پیاپی (۱۳۹۴–۱۳۹۷) در مزارع استان کرمانشاه تحت شرایط دیم کشت گردید. This mixture was prepared in 2015 from all available durum wheat cultivars in the Kermanshah region. Then it was subsequently cultivated for three consecutive years (2015–2018) under rainfed conditions across Kermanshah Province.
رقم بومی سرداری Sardari	یکی از لاین‌های بومی شاخص گندم ایران، متحمل به خشکی و سرما و رایج در مناطق دیم غرب و شمال‌غرب کشور است و سطح زیرکشت آن حدود دو میلیون هکتار برآورد می‌شود (Soofi et al., 2017; Haghparast et al., 2013). This prominent Iranian wheat landrace is drought- and cold-tolerant and widely cultivated in rainfed western and northwestern Iran, with an estimated area of ~2 million ha (Soofi et al., 2017; Haghparast et al., 2013).
رقم بومی کل حیدری Kal Heydari	رقم بومی پابلند، متحمل به خشکی و سازگار با شرایط دیم استان فارس است که حساسیت قابل توجهی به زنگ زرد دارد و بیش از ۷۰ سال است که در این منطقه کشت می‌شود (Pouryousefi et al., 2022). This tall local landrace is drought-tolerant, adapted to rainfed conditions in Fars Province, but highly susceptible to yellow rust, with over 70 years of cultivation (Pouryousefi et al., 2022).
رقم اصلاح شده آذر۲ Azar 2	رقم دیم مناسب مناطق سرد و معتدل است که از تلاقی «سرداری» با یک ژنوتیپ خارجی در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر ایجاد شده، و دارای عملکرد متوسط ۲۱۴۳ کیلوگرم در هکتار و سطح زیرکشت حدود یک میلیون هکتار در کشور می‌باشد (Jasemi et al., 2017). This rainfed cultivar, adapted to cold and temperate regions, was developed from a "Sardari" × international genotype cross, with an average yield of 2,143 kg.ha^{-1} and ~1 million ha under cultivation (Jasemi et al., 2017).
رقم اصلاح‌شده چمران۲ Chamran2	رقم اصلاحی مناسب شرایط آبی است که از تلاقی «چمران» با Attila/Bacanora در برنامه ملی اصلاح گندم به دست آمده و با وجود آبی بودن، به‌دلیل پیش‌بینی آبیاری تکمیلی، به‌عنوان شاهد در این پژوهش استفاده شد. This improved irrigated variety ("Chamran" × Attila/Bacanora), developed under the national wheat breeding program, was used as a check due to the planned supplemental irrigation at some experimental sites.

طراحی و اجرای آزمایش

این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد و اندازه هر کرت در تمام مکان‌ها و سال‌ها برابر با ۲۰ مترمربع (۴ ×۵ متر) در نظر گرفته شد. تصادفی‌سازی تیمارها برای هر ترکیب سال و مکان به‌طور مستقل انجام شد و برای این منظور از نرم‌افزارDiGGer استفاده گردید؛ نرم‌افزاری که برای تولید طرح‌های کارآمد آزمایش‌های غیرعاملی با آرایش کرت‌ها در ردیف‌ها و ستون‌ها به کار می‌رود (Coombes, 2009). به‌دلیل وقوع خشکسالی شدید در سال دوم آزمایش (جدول ۱) در منطقه نقش‌رستم و کاهش مقدار بذر در دسترس برای برخی ژنوتیپ‌ها، در سال سوم اجرای آزمایش در این مکان امکان اجرای سه تکرار برای همه ژنوتیپ‌ها وجود نداشت؛ بنابراین در آن سال و در آن مکان از طرح با تکرار ناقص[1] استفاده شد.

کاشت به‌صورت دستی و هم‌زمان با آغاز بارندگی‌های پاییزه در هر سال انجام شد. مقدار بذر مصرفی در همه تیمارها ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و یکسان برای تمامی ژنوتیپ‌ها در نظر گرفته شد. مدیریت زراعی شامل وجین و کوددهی، مطابق با شیوه‌های مرسوم کشاورزان هر منطقه انجام شد. در طول اجرای آزمایش، هیچ نهاده‌ای استفاده نگردید، جز در منطقه روانسر که به‌صورت حداقلی و مطابق با عرف محلی، پس از کاشت، حدود ۲۴ کیلوگرم در هکتار کود فسفات (سوپر فسفات تریپل) و ۱۲ کیلوگرم در هکتار کود نیترات (نیترات آمونیوم) به کار رفت. تمام آزمایش‌ها در شرایط دیم و بدون آبیاری تکمیلی انجام شد. در هر منطقه و سال، بخشی از بذر برداشت‌شده برای کشت در سال بعد مورد استفاده قرار گرفت. ناهم‌زمانی رسیدگی در جمعیت‌های تکاملی از طریق برداشت کل جمعیت در زمان متناسب با شرایط و هدف تولید هر منطقه مدیریت شد؛ به‌گونه‌ای که تکرار این شیوه برداشت، همراه با انتخاب طبیعی و مدیریت کشاورز، به‌تدریج فراوانی ژنوتیپ‌های دارای زمان رسیدگی سازگار با محیط را افزایش می‌دهد.

صفات مورد ارزیابی شامل عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، عملکرد کاه، شاخص برداشت، وزن هزار دانه، تعداد پنجه بارور، ارتفاع بوته، طول سنبله، تعداد دانه در سنبله بودند. به‌منظور برآورد میزان تنوع فنوتیپی گیاهان در داخل هر کرت، انحراف معیار ارتفاع بوته و انحراف معیار طول سنبله محاسبه شد، زیرا این صفات در سطح بوته اندازه‌گیری شده و امکان ارزیابی پراکنش فنوتیپی گیاهان در داخل هر کرت را فراهم می‌کنند.

برای اندازه‌گیری صفات عملکردی، در هر کرت سه نمونه یک مترمربعی برداشت شد. در هر نمونه، ابتدا وزن کل زیست‌توده اندازه‌گیری شد، سپس دانه‌ها از کاه جدا شدند و وزن دانه تعیین گردید. عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه براساس وزن زیست‌توده و وزن دانه در هر نمونه محاسبه شدند و عملکرد کاه از تفاضل این دو مقدار به دست آمد. مقدار نهایی این سه صفت به‌صورت میانگین سه نمونه در هر کرت گزارش شد. شاخص برداشت نیز به‌صورت نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیست‌توده و ضرب آن در ۱۰۰ محاسبه گردید.

وزن هزار دانه با استفاده از دانه‌های به‌دست‌آمده از نمونه‌های برداشت عملکرد و به‌صورت میانگین سه نمونه، هر یک شامل ۲۵۰ دانه، اندازه‌گیری شد. تعداد پنجه بارور در مترمربع تنها در سال‌های اول و دوم آزمایش و در یکی از نمونه‌های یک مترمربعی مورد استفاده برای اندازه‌گیری عملکرد دانه و زیست‌توده شمارش گردید.

برای اندازه‌گیری صفات سطح بوته، در هر کرت ۲۰ بوته به‌صورت تصادفی انتخاب شد. ارتفاع بوته از سطح خاک تا محل اتصال سنبله به ساقه اندازه‌گیری گردید و طول سنبله از ابتدای سنبله تا انتهای آن، بدون در نظر گرفتن ریشک‌ها، تعیین شد. تعداد دانه در سنبله نیز با شمارش دانه‌های همان ۲۰ سنبله انتخاب‌شده و تنها در سال‌های اول و دوم آزمایش اندازه‌گیری شد. داده‌های مربوط به ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله در سطح بوته ثبت شدند و برای تحلیل این صفات، ساختار نمونه‌برداری بوته‌ها در مدل آماری لحاظ گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها و مدل‌های آماری مورد استفاده

در این پژوهش، داده‌های نامتوازن با استفاده از مدل آمیخته[2] در نرم‌افزار GenStat نسخه ۲۴ (VSN International, 2022) تحلیل شدند و معنی‌داری اثرات مورد بررسی با استفاده از آزمون F ارزیابی شد. با توجه به تفاوت در مقیاس اندازه‌گیری صفات، برای صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح کرت و صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح بوته،

1- Partially replicated design

2- Mixed effects model

دو ساختار متفاوت از مدل آمیخته به کار رفت. این رویکرد با ساختار پیشنهادی برای تحلیل آزمایش‌های ترکیبی چندساله و چندمکانی هم خوان است؛ ساختاری که در آن اثرهای سال، مکان، برهم‌کنش سال × مکان، تکرار درون ترکیب سال × مکان، ژنوتیپ و برهم‌کنش‌های ژنوتیپ با عوامل محیطی در مدل لحاظ می‌شوند (Moore & Dixon, 2015). در این تحلیل، ژنوتیپ به‌عنوان اثر ثابت در نظر گرفته شد. در مدل مربوط به صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح کرت، سال، مکان و تکرار درون ترکیب سال × مکان به‌عنوان اثرات تصادفی وارد مدل شدند. در مدل مربوط به صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح بوته، علاوه بر اثرات تصادفی یادشده، اثر بوته درون ژنوتیپ نیز به‌عنوان یک اثر تصادفی در مدل لحاظ شد. منظور از ژنوتیپ، هر یک از مواد ژنتیکی مورد ارزیابی شامل ارقام، جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا بود که در بازه سه‌ساله آزمایش به‌عنوان واحدهای مشخص و قابل مقایسه تحلیل شدند؛ رویکردی که با ارزیابی چندمحیطی و چندساله مواد حاصل از به‌نژادی تکاملی هم‌خوانی دارد (Raggi et al., 2017).

برای صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح کرت شامل عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، عملکرد کاه، شاخص برداشت، وزن هزار دانه، تعداد پنجه بارور در مترمربع و شاخص‌های تنوع فنوتیپی گیاهان در داخل کرت از معادله ۱ استفاده شد.

معادله (۱)
$$Y_{ijkr} = \mu + Y_i + L_j + (YL)_{ij} + R_{r(ij)} + G_k + (YG)_{ik} + (LG)_{jk} + (YLG)_{ijk} + \varepsilon_{ijkr}$$

که در آن، Y_{ijkr}: مقدار مشاهده‌شده صفت برای ژنوتیپ k در سال i، مکان j و تکرار r است. μ: میانگین کل، Y_i: اثر سال، L_j: اثر مکان، $(YL)_{ij}$: اثر سال × مکان، $R_{r(ij)}$: اثر تکرار درون ترکیب سال × مکان، G_k: اثر ژنوتیپ، $(YG)_{ik}$: اثر سال × ژنوتیپ، $(LG)_{jk}$: اثر مکان × ژنوتیپ، $(YLG)_{ijk}$: اثر سال × مکان × ژنوتیپ و ε_{ijkr}: خطای باقی‌مانده مدل است.

برای صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح بوته شامل ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله از معادله ۲ استفاده شد. در این ساختار، اثر بوته درون ژنوتیپ به مدل افزوده شد تا تغییرات ناشی از نمونه‌برداری بوته‌ها درون هر ژنوتیپ در تحلیل لحاظ شود.

معادله (۲)
$$Y_{ijkrm} = \mu + Y_i + L_j + (YL)_{ij} + R_{r(ij)} + G_k + P_{m(k)} + (YG)_{ik} + (LG)_{jk} + (YP)_{im(k)} + (LP)_{jm(k)} + (YLG)_{ijk} + \varepsilon_{ijkrm}$$

که در آن، مقدار مشاهده‌شده صفت برای بوته m از ژنوتیپ k در سال i، مکان j و تکرار r است. $P_{m(k)}$: اثر بوته m درون ژنوتیپ k، $(YP)_{im(k)}$: اثر برهم‌کنش سال با بوته درون ژنوتیپ و $(LP)_{jm(k)}$: اثر برهم‌کنش مکان با بوته درون ژنوتیپ را نشان می‌دهد. سایر اجزای مدل مشابه معادله ۱ تعریف می‌شوند.

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها با استفاده از آزمون بونفرونی برای مقایسه‌های چندگانه و در نسخه ۲۴ نرم افزار GenStat انجام شد (VSN International, 2022) تا خطای نوع اول در مقایسه‌های چندگانه کنترل شود. در این تحلیل، صفات عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه، شاخص برداشت، وزن هزاردانه، تعداد پنجه بارور در مترمربع، ارتفاع بوته، طول سنبله، تعداد دانه در سنبله و انحراف معیار ارتفاع و طول سنبله مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

ثبات عملکرد، یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های ارزیابی سازگاری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های متغیر است، امّا ازآنجاکه مفهومی چندبعدی دارد، نمی‌توان آن را تنها با یک شاخص منفرد توصیف کرد. هر یک از شاخص‌های ثبات برمبنای مدل آماری و دیدگاه مفهومی خاصی تعریف شده‌اند و جنبه متفاوتی از رفتار ژنوتیپ را نسبت به تغییرات محیطی منعکس می‌کنند (Becker & Léon, 1988). ازاین‌رو، برای دستیابی به درکی جامع‌تر از ثبات عملکرد ژنوتیپ‌ها، در این پژوهش از مجموعه‌ای از شاخص‌های مکمل استفاده شد که هریک بیانگر یکی از جنبه‌های ثبات ایستا یا پویا هستند و در کنار آن از شاخص قابلیت اطمینان عملکرد نیز برای ارزیابی ریسک شکست عملکرد استفاده گردید (Döring et al., 2015).

در این پژوهش برای ارزیابی ثبات عملکرد از چهار شاخص آماری شامل برتری رقم (CS[1])، واریانس محیطی (EV[2])، شاخص اکوالانس ریک (W_i[3]) و واریانس رتبه‌های ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف[4] استفاده شد. علاوه‌بر این شاخص‌ها، شاخص قابلیت اطمینان عملکرد (Ij[5]) نیز به‌عنوان شاخص مکمل برای ارزیابی ریسک شکست عملکرد محاسبه گردید. منظور از محیط در این پژوهش، ترکیب سال و مکان آزمایش بود که در مجموع شامل ۱۲ محیط مختلف است.

شاخص **برتری رقم** (Lin & Binns, 1988) بیانگر نزدیکی عملکرد یک ژنوتیپ به بیشترین عملکرد در هر محیط است. این

1- Cultivar superiority
2- Environmental variance
3- Wricke's Ecovalence
4- Variance of entry ranks across environments
5- Kataoka reliability index

شاخص براساس مجموع مربعات اختلاف عملکرد هر ژنوتیپ با بیشترین عملکرد مشاهده‌شده در هر محیط و تقسیم آن بر دو برابر تعداد محیط‌ها محاسبه می‌شود. ژنوتیپ‌هایی با مقدار کمتر این شاخص، عملکردی نزدیک به بیشینه محیط‌ها دارند (Döring et al., 2015). شاخص واریانس محیطی عملکرد ژنوتیپ‌ها (Römer, 1917) معیاری از پایداری ایستا است و ژنوتیپ‌هایی را مشخص می‌کند که عملکردی یکنواخت‌تر در محیط‌های مختلف دارند. این شاخص به‌دلیل استقلال از سایر ژنوتیپ‌ها، تعمیم‌پذیری بالایی دارد (Döring et al., 2015). شاخص اکوالانس ریک (Wricke, 1962) سهم هر ژنوتیپ را در مجموع مربعات اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نشان می‌دهد؛ مقادیر پایین‌تر بیانگر واکنش یکنواخت‌تر ژنوتیپ‌ها به تغییرات محیطی هستند. شاخص واریانس رتبه‌ای (Nassar & Hühn, 1987)، واریانس رتبه عملکرد ژنوتیپ‌ها در میان محیط‌های مختلف را اندازه‌گیری می‌کند؛ مقدار صفر نشان‌دهنده بیشترین ثبات و نوسان کمتر در رتبه‌ها است.

این چهار شاخص ثبات تنها برای صفاتی محاسبه شدند که داده‌های آن‌ها در همه ۱۲ ترکیب سال و مکان موجود بود؛ بنابراین صفات تعداد پنجه بارور در مترمربع و تعداد دانه در سنبله به‌دلیل کامل نبودن داده‌ها در همه محیط‌ها از این بخش از تحلیل حذف شدند. برای هر یک از هفت صفت باقی‌مانده، ژنوتیپ‌ها براساس مقدار هر شاخص از رتبه ۱ (باثبات‌ترین) تا رتبه ۱۶ (بی‌ثبات‌ترین) مرتب شدند و میانگین رتبه‌های حاصل از این چهار شاخص به‌عنوان معیار کلی ثبات برای هر صفت در نظر گرفته شد.

شاخص قابلیت اطمینان عملکرد نیز با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد. این شاخص براساس میانگین و واریانس محیطی عملکرد در محیط‌های مختلف محاسبه می‌شود و کمترین عملکرد مورد انتظار هر ژنوتیپ را در یک سطح احتمال مشخص برآورد می‌کند (Kataoka, 1963). این شاخص، ترکیبی از میانگین عملکرد و واریانس محیطی است و ژنوتیپ‌هایی را شناسایی می‌کند که علاوه‌بر میانگین عملکرد بالا، احتمال شکست عملکرد کمتری دارند. در نتیجه، این شاخص، امکان ارزیابی هم‌زمان سطح عملکرد و قابلیت اطمینان آن را فراهم کرده و ابزاری کارآمد برای انتخاب ژنوتیپ‌هایی است که علاوه‌بر میانگین عملکرد بالا، خطر شکست عملکرد کمتری را در محیط‌های متغیر دارند (Döring et al., 2015).

معادله (۳)
$$I_i = m_j - Z_{(P)}\sqrt{EV_j}$$

که در آن، m_j: میانگین عملکرد ژنوتیپ j، EV_j: واریانس محیطی ژنوتیپ j و $Z_{(P)}$: صدک توزیع نرمال استاندارد در سطح احتمال P است که بیانگر احتمال پایین‌ترین عملکرد است. در این پژوهش، مقدار P برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته شد و مقدار متناظر آن در توزیع نرمال استاندارد، یعنی مقدار Z، برابر با ۱/۰۳۶۴۳ است. بدین ترتیب، مقدار I_i نشان‌دهنده کمترین عملکرد مورد انتظار هر ژنوتیپ در ۸۵ درصد شرایط محیطی است. این مقدار، امکان تمایز میان شرایط شکست محصول (برای برخی ژنوتیپ‌ها با عملکرد مورد انتظار منفی) و شرایط دارای عملکرد مثبت را فراهم می‌کند.

این شاخص برای صفات عملکردی شامل عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه و همچنین ارتفاع بوته محاسبه و گزارش شد. ارتفاع بوته نیز به‌عنوان یکی از صفات مهم در برداشت مکانیکی در نظر گرفته شد، زیرا کاهش آن در سال‌های خشک می‌تواند عملیات برداشت را دشوار کرده و میزان اتلاف محصول را افزایش دهد (Ceccarelli et al., 1996). در این بخش، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس مقدار این شاخص انجام شد؛ به‌طوری که ژنوتیپ با بیشترین مقدار این شاخص رتبه ۱ و ژنوتیپ با کمترین مقدار آن رتبه ۱۶ را دریافت کرد.

محاسبه تمامی شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی ثبات عملکرد با استفاده از دستور GEstability در نسخه ۲۴ نرم‌افزار GenStat انجام شد (VSN International, 2022). این نرم‌افزار به‌دلیل توانایی بالا در تحلیل‌های چندمحیطی و محاسبه شاخص‌های مختلف ثبات و قابلیت اطمینان عملکرد انتخاب گردید و مقادیر هر شاخص برای تمامی ژنوتیپ‌ها در ۱۲ محیط آزمایشی محاسبه شد.

نتایج و بحث

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، سه سال اجرای آزمایش با نوسانات قابل توجه بارندگی همراه بود. سال نخست، با مجموع بارندگی ۳۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر در چهار مکان، نسبت به دو سال بعد شرایط مرطوب‌تری داشت، درحالی‌که دو سال پایانی خشک‌تر بودند. اگرچه دوره آزمایش کوتاه بود، امّا همین بازه توانست بخشی از نوسانات اقلیمی کوتاه‌مدتی را بازتاب دهد که زراعت گندم دیم در ایران با آن مواجه است. این موضوع به‌ویژه برای نظام‌های کشاورزی دیم اهمیت دارد، زیرا پیش‌بینی‌های اقلیمی از افزایش

فراوانی سال‌های خشک و تشدید نوسانات بارندگی حکایت دارند (Lobell et al., 2011)و مطالعات شبیه‌سازی عملکرد نیز کاهش قابل توجه عملکرد محصولات زراعی را در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم گزارش کرده‌اند (Rezaei et al., 2023).

نتایج آزمون F حاصل از مدل آمیخته خطی نشان داد که در هر دو مقیاس اندازه‌گیری یعنی صفات سطح کرت (جدول ۳) و صفات سطح بوته (جدول ۴)، برهم‌کنش سال × مکان برای همه صفات معنی‌دار بود؛ بنابراین ترکیب‌های مختلف سال و مکان، محیط‌های آزمون متفاوتی را برای رشد، عملکرد و بیان صفات مورفولوژیک گندم ایجاد کردند. در صفات سطح کرت، اثر اصلی ژنوتیپ برای بیشتر صفات عملکردی از جمله عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، عملکرد کاه، وزن هزار دانه و تعداد پنجه بارور معنی‌دار نشد و تنها شاخص برداشت تفاوت معنی‌دار ژنوتیپی نشان داد. بااین‌حال، معنی‌داری برهم‌کنش مکان × ژنوتیپ برای عملکرد دانه و برهم‌کنش سه‌گانه سال × مکان × ژنوتیپ برای بیشتر صفات سطح کرت نشان می‌دهد که تفاوت میان ژنوتیپ‌ها در قالب یک اثر ثابت و یکنواخت در همه محیط‌ها ظاهر نشده، بلکه به شرایط خاص هر محیط وابسته بوده است. در صفات سطح بوته نیز اثر سال بر ارتفاع بوته و تعداد دانه در سنبله، و اثر مکان بر طول سنبله و تعداد دانه در سنبله معنی‌دار شد. همچنین اثر ژنوتیپ بر طول سنبله و تعداد دانه در سنبله بسیار معنی‌دار بود، امّا بر ارتفاع بوته معنی‌دار نشد. برهم‌کنش‌های سال × ژنوتیپ و مکان × ژنوتیپ برای طول سنبله و تعداد دانه در سنبله معنی‌دار شدند، درحالی‌که برهم‌کنش سه‌گانه سال × مکان × ژنوتیپ فقط برای ارتفاع بوته معنی‌دار بود.

معنی‌دار نشدن اثر اصلی ژنوتیپ برای بیشتر صفات عملکردی سطح کرت، هم‌زمان با معنی‌داری برهم‌کنش مکان × ژنوتیپ برای عملکرد دانه و برهم‌کنش سال × مکان × ژنوتیپ برای بیشتر صفات سطح کرت نشان می‌دهد که تفاوت میان ژنوتیپ‌ها بیش از آنکه به‌صورت برتری ثابت و یکنواخت در همه محیط‌ها ظاهر شود، در پاسخ متفاوت آن‌ها به ترکیب‌های خاص سال–مکان و محیط‌های انتخابی متغیر بروز کرده است. این الگو برای تفسیر جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این مواد برخلاف ارقام یکنواخت، از اجزای ژنتیکی متفاوت تشکیل شده‌اند و ارزش آن‌ها تنها در برتری میانگین عملکرد در همه محیط‌ها خلاصه نمی‌شود، بلکه در توان پاسخ به فشارهای انتخابی متغیر، حفظ تنوع درون‌جمعیتی، کاهش ریسک عملکرد و سازگاری تدریجی با محیط‌های محلی معنا پیدا می‌کند (Ceccarelli & Grando, 2007; Raggi et al., 2017). در چنین موادی، تنوع درون‌جمعیتی می‌تواند از طریق ظرفیت بافری ژنتیکی، بخشی از نوسانات عملکرد را تعدیل کند؛ به این معنا که افت عملکرد برخی اجزای حساس‌تر در یک محیط خاص، ممکن است تا حدی با عملکرد بهتر اجزای سازگارتر همان جمعیت جبران شود و در نتیجه تفاوت‌های عملکردی در سطح کرت ممکن است کمتر از تفاوت‌های موجود در صفات ساختاری، زایشی یا اجزای عملکرد آشکار گردد (Allard & Bradshaw, 1964; Allard & Hansche, 1964).

بررسی نتایج میانگین صفات زراعی و ریخت‌شناسی ژنوتیپ‌های مورد استفاده در این آزمایش (جدول ۵) نشان می‌دهد که میانگین عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه بین ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌دار نداشت، امّا دامنه تفاوت بین بیشترین و کمترین مقادیر مشاهده‌شده به‌ترتیب حدود ۴۰ درصد برای عملکرد دانه، ۳۲ درصد برای زیست‌توده و ۳۳ درصد برای کاه بود. بالاترین میانگین عملکرد دانه مربوط به جمعیت تکاملی پرتویی بود و آذر۲ در بین ارقام اصلاح‌شده بالاترین میانگین را داشت؛ عملکرد دانه جمعیت تکاملی پرتویی نیز حدود ۲۸ درصد بیشتر از آذر ۲ بود. از نظر شاخص برداشت، بین ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌دار مشاهده شد، هرچند مقادیر این شاخص به‌طور کلی پایین بود که احتمالاً ناشی از خشکسالی شدید در دو سال پایانی آزمایش است. در بین ژنوتیپ‌ها، مخلوط پویا ۴۰۹۶ بالاترین شاخص برداشت را داشت که تنها نسبت به مخلوط پویا دوروم به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. مقادیر وزن هزار دانه در این آزمایش پایین بود که احتمالاً بازتاب تنش خشکی، به‌ویژه در دوره پُرشدن دانه است. در بین ژنوتیپ‌ها، مخلوط پویا ۴۰۹۶ بیشترین وزن هزار دانه را به خود اختصاص داد و با بیشتر جمعیت‌های تکاملی و ارقام بومی و اصلاح‌شده تفاوت معنی‌داری نشان نداد؛ بااین‌حال وزن هزار دانه آن به‌طور معنی‌داری بیشتر از جمعیت تکاملی رستمی، مخلوط پویا ۱۰۰۹۶ و مخلوط پویا دوروم بود. بااین‌حال، تفاوت معنی‌داری بین جمعیت تکاملی سیفی و جمعیت تکاملی پرتویی از یک سو و جمعیت تکاملی رستمی (با منشأء مشابه امّا محیط متفاوت) از سوی دیگر مشاهده شد.

جدول ۳- نتایج آزمون F حاصل از مدل آمیخته برای صفات اندازه‌گیری‌شده ژنوتیپ‌های دیم در سطح کرت

Table 3- F-test results from the mixed model for wheat genotypes in plot-level traits

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biomass yield	عملکرد کاه Straw yield	شاخص برداشت Harvest index	وزن هزار دانه Thousand-kernel weight	تعداد پنجه بارور Fertile tillers	انحراف معیار ارتفاع بوته Standard deviation of plant height	انحراف معیار طول سنبله Standard deviation of spike length
سال Year	2	0.75	6.44*	17.30**	0.98	0.30	2.66	2.84	4.41
مکان Location	3	1.12	0.93	1.67	1.92	0.72	0.84	1.27^{x}	4.77*^{x}
مکان×سال Year × location	6	104.73***	65.53***	23.29***	31.55***	29.18***	45.92***	20.39***	5.22**
تکرار درون ترکیب سال × مکان REP (year, location)	25	2.39***	2.42***	3.98***	1.99**	—	—	—	—
ژنوتیپ Entry (genotype)	15	1.92	1.08	1.26	2.63*	1.81	1.34	1.30	0.89
ژنوتیپ×سال Year × entry	30	0.95	1.02	0.94	1.02	0.78	1.00	1.27	1.14
ژنوتیپ×مکان Location × entry	45	1.52*	0.75	1.12	0.87	0.92	1.08	1.10	1.39
ژنوتیپ × مکان×سال Year × location × entry	90	1.84***	1.34*	1.50**	2.06***	3.70***	4.10***	1.47**	1.28

علامت‌های *، ** و ***: به‌ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطوح $P < 0.05$، $P < 0.01$ و $P < 0.001$ هستند.

*: P <0.05; **: P <0.01; ***: P <0.001

جدول ٤- نتایج آزمون F حاصل از مدل آمیخته برای صفات اندازه‌گیری‌شده ژنوتیپ‌های گندم در سطح بوته

Table 4- F-test results from the mixed model for wheat genotypes in plant-level traits

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	طول سنبله Spike length	تعداد دانه در سنبله Kernel number per spike
سال Year	2	6.42*	2.71	8.11*
مکان Location	3	2.19	4.83*	5.10*
مکان×سال Year × location	6	94.44***	46.60***	42.55***
تکرار درون ترکیب سال × مکان REP (year, location)	25	–	–	–
ژنوتیپ Entry (genotype)	15	1.23	5.69***	6.00***
بوته درون ژنوتیپ Plant (entry)	304	–	–	–
ژنوتیپ×سال Year × entry	30	1.44	2.39***	7.04***
ژنوتیپ×مکان Location × entry	45	1.19	2.59***	4.71***
بوته درون ژنوتیپ×سال Year × plant (entry)	608	1.33***	–	–
بوته درون ژنوتیپ×مکان Location × plant (entry)	912	1.51***	–	–
ژنوتیپ × مکان×سال Year × location × entry	90	4.64***	1.11	1.24

علامت‌های *، ** و ***: به‌ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطوح P < 0.05، P < 0.01 و P < 0.001 هستند.

*: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001.

برای صفات ارتفاع بوته و طول سنبله نیز بین ژنوتیپ‌ها تفاوت‌های معنی‌داری وجود داشت (جدول ۵)، هرچند دامنه اختلاف زیاد نبود. دو جمعیت تکاملی شراره و جمعیت تکاملی رستمی و مخلوط پویا ۴۰۹۶ به‌طور معنی‌داری بلندتر از دو رقم بومی سرداری و کل حیدری، دو رقم اصلاح‌شده آذر۲ و چمران ۲ و مخلوط پویا کشکولی بودند. در بین ژنوتیپ‌ها، رقم کل حیدری بیشترین طول سنبله را داشت که به‌طور معنی‌دار از چمران۲، سرداری، جمعیت تکاملی پرتویی و مخلوط پویا دوروم بلندتر بود. با وجود طول زیاد سنبله در کل حیدری؛ تعداد دانه در آن کمتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود و این تفاوت احتمالاً به‌دلیل سنبله‌های باز و کم‌تراکم این رقم است. دو مخلوط با منشأ مشابه، یعنی مخلوط پویا کشکولی و نیک‌فرجام نیز از نظر تعداد دانه در سنبله تفاوت معنی‌داری نشان دادند. در این بین، مخلوط پویا ۱۰۰۹۶ بیشترین تعداد دانه در سنبله را داشت و از نظر آماری به‌طور معناداری بیشتر از آذر۲ و سرداری بود. در بین دو شاخص مربوط به تنوع فنوتیپی درون کرت (براساس انحراف معیار ارتفاع بوته و انحراف معیار طول سنبله)، تنها شاخص مبتنی بر ارتفاع بوته بین ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌دار نشان داد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، دو رقم اصلاحی (آذر۲ و چمران ۲) یکنواخت‌ترین جمعیت‌ها بودند، هرچند با برخی از جمعیت‌های تکاملی و مخلوط تفاوت معنی‌دار نداشتند. در مقابل، جمعیت و مخلوط‌هایی مانند جمعیت تکاملی رستمی، مخلوط پویا ۱۰۰۹۶، مخلوط پویا سرارود، مخلوط پویا ۶۰۹۷ و مخلوط پویا ۶۰۹۳ دارای تنوع فنوتیپی درون کرت بیشتری بودند.

در مجموع، اگرچه میانگین عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه میان ژنوتیپ‌ها تفاوت معنی‌داری نشان نداد، نتایج جدول ۵ بیانگر آن است که ارزیابی جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا نباید فقط بر میانگین عملکرد متکی باشد. در چارچوب به‌نژادی تکاملی، موفقیت یک جمعیت بیش از آنکه صرفاً با بیشینه‌سازی عملکرد تعریف شود، با توان آن در حفظ عملکرد پایدار، پاسخ به شرایط متغیر، کاهش ریسک و حفظ تنوع ژنتیکی درون‌جمعیتی سنجیده می‌شود (Merrick et

al., 2020; Ceccarelli & Grando, 2020) و پذیرش یا رد یک جمعیت زراعی ناهمگن معمولاً برپایه مجموعه‌ای از معیارها و فراتر از میانگین عملکرد صورت می‌گیرد (Salimi et al., 2023). بنابراین رسیدن عملکرد یک جمعیت تکاملی یا مخلوط پویا به سطح ارقام اصلاح‌شده، حتی در نبود تفاوت معنی‌دار، می‌تواند از نظر اصلاحی و اگرواکولوژیک مهم باشد؛ زیرا چنین موادی علاوه‌بر عملکرد قابل مقایسه، می‌توانند از مزایای تنوع ژنتیکی از جمله ثبات عملکرد (Borg et al., 2018)، مقاومت بهتر به آفات و بیماری‌ها (Murphy et al., 2004)، سازگاری بیشتر با تغییر اقلیم (Ceccarelli & Grando, 2020) و توانایی بالاتر در رقابت با علف‌های هرز (Ceccarelli & Grando, 2024) نیز برخوردار باشند.

تحلیل شاخص‌های چندگانه ثبات (جدول ۶) برای هفت صفت زراعی در طول سه سال آزمایش و در بین ۱۶ ژنوتیپ نشان داد که ثبات ژنوتیپ‌ها به صفت مورد ارزیابی وابسته است، به‌گونه‌ای که هر ژنوتیپ می‌تواند برای یک صفت بسیار باثبات و برای صفتی دیگر بی‌ثبات باشد. لازم به ذکر است که در این جدول، رتبه‌ها براساس مقادیر نسبی صفات و شاخص‌های ثبات محاسبه شده‌اند و وابسته به معنی‌داری آماری تفاوت میانگین‌ها نیستند. ازاین‌رو حتی در مواردی که اختلاف معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها مشاهده نشده است، رتبه‌ها برای امکان مقایسه نسبی ژنوتیپ‌ها و ترکیب چند شاخص در رتبه‌بندی نهایی محاسبه شده‌اند (Nassar & Hühn, 1987).

بر همین اساس، مخلوط پویا ۶۰۹۷ برای عملکرد دانه رتبه نخست ثبات را داشت، امّا برای طول سنبله در رتبه پایین‌تری قرار گرفت. بااین‌حال، ارزیابی کلی برپایه میانگین رتبه‌ها نشان داد که هفت ژنوتیپ شامل مخلوط پویا ۶۰۹۷، مخلوط پویا دوروم، جمعیت تکاملی شراره، مخلوط پویا کشکولی، مخلوط پویا نیک‌فرجام، مخلوط پویا سرارود و مخلوط پویا ۶۰۹۳، در مقایسه با ارقام شاهد بومی و اصلاح‌شده، ثبات بالاتری را در مجموعه صفات زراعی مورد بررسی نشان دادند. این نتیجه با شواهد گسترده‌ای که تنوع ژنتیکی درون محصولی را یکی از مؤثرترین راهبردها برای تثبیت عملکرد در شرایط پُرتنش معرفی می‌کند، هم‌خوانی دارد (Döring et al., 2015). آلارد و برادشاو (Allard & Bradshaw, 1964) و آلارد و هانش (Allard & Hansche, 1964) از نخستین پژوهشگرانی بودند که نشان دادند جمعیت‌های ناهمگن، به‌واسطه ظرفیت بافری بالاتر، واکنش باثبات‌تری نسبت به تغییرات محیطی از خود نشان می‌دهند.

در مقابل، سه جمعیت تکاملی پرتویی، سیفی و رستمی که همگی از یک جمعیت پایه واحد منشأ گرفته بودند، در رتبه‌بندی کلی شاخص‌های ثبات در زمره ژنوتیپ‌های بی‌ثبات قرار گرفتند. تبیین این الگو مستلزم توجه دقیق به تاریخچه کشت و پیشینه تکاملی این جمعیت‌ها است (جدول ۲). این جمعیت‌های تکاملی طی حدود یک دهه در مزارع و محیط‌های مشخص، تحت فشار انتخاب طبیعی مداوم و شرایط اقلیمی و محیطی متفاوتی قرار داشته‌اند. چنین فرآیندی می‌تواند به شکل‌گیری سازگاری محلی و اختصاصی منجر شود؛ به‌گونه‌ای که جمعیت‌ها به‌تدریج برای شرایط محیطی محل کشت اولیه خود بهینه شده و دامنه پاسخ ژنتیکی آن‌ها در مواجهه با محیط‌های جدید یا متفاوت محدود گردد. در نتیجه، این جمعیت‌ها علی‌رغم برخورداری از تنوع درون‌گونه‌ای، در محیط‌های آزمایشی حاضر نتوانسته‌اند که الگوی ثبات مطلوبی از خود نشان دهند. هم‌سویی این الگو با نتایج شاخص قابلیت اطمینان (جدول ۷)، که برای برخی از این ژنوتیپ‌ها حداقل عملکرد تضمین‌شده پایین‌تری را نشان می‌دهد، از این تفسیر پشتیبانی می‌کند. در این زمینه، چکرلی و گراندو (Ceccarelli & Grando, 2020) بیان می‌کنند که جمعیت‌های تکاملی در اثر انتخاب طبیعی مداوم در محل کشت، به‌صورت تدریجی به شرایط همان محیط خاص پاسخ داده و مسیر تکاملی آن‌ها به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر فشارهای انتخابی محلی قرار می‌گیرد. همچنین مریک و همکاران (Merrick et al., 2020) نشان دادند که در توده‌های دارای تنوع درون‌گونه‌ای، عواملی نظیر سابقه کشت طولانی‌مدت در یک محیط مشخص و غلبه انتخاب جهت‌دار در یک دامنه تنش معین، می‌تواند منجر به کاهش دامنه پاسخ ژنتیکی به محیط‌های جدید شده و در نهایت به ثبات کلی پایین‌تر در مقیاس چند مکانی بینجامد.

مقایسه نتایج جدول ۵ و جدول ۷ نشان می‌دهد که رتبه‌بندی براساس میانگین عملکرد لزوماً با رتبه‌بندی براساس ریسک عملکرد هم‌راستا نیست و برخی ژنوتیپ‌ها با وجود میانگین‌های نسبتاً بالا، در برخی محیط‌ها عملکرد پایین‌تری نشان می‌دهند. شاخص قابلیت اطمینان (جدول ۷) که ریسک عملکرد ژنوتیپ‌ها را براساس سطح عملکردی که در ۸۵ درصد محیط‌ها قابل دستیابی است برآورد می‌کند، تمایز روشنی میان ژنوتیپ‌ها از نظر ریسک عملکرد نشان می‌دهد.

جدول ۵- میانگین صفات زراعی و ریخت‌شناسی در ۱۶ ژنوتیپ گندم در سال‌ها و مکان‌های مختلف

Table 5- Averaged over years and locations of agronomic and morphological traits in sixteen wheat genotypes

نام ژنوتیپ Name of entry	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})	عملکرد زیست‌توده Biomass yield (kg.ha^{-1})	عملکرد کاه Straw yield (kg.ha^{-1})	شاخص برداشت Harvest index (%)	وزن هزار دانه Thousand- kernel weight (g)	تعداد پنجه بارور Number of fertile tillers (number m^{-2})	ارتفاع بوته Plant height (cm)	طول سنبله Spike length (cm)	تعداد دانه در سنبله Kernel number per spike (number m^{-2})	انحراف معیار ارتفاع بوته Standard deviation of plant height	انحراف معیار طول سنبله Standard deviation of spike length
مخلوط پویا-۶۰۹۷ MIX-6097	1156	4340	3183	28 ab*	39.4 abc	431	72.2 ab	7.2 abc	19.3 abcd	8.959 ab	1.860
مخلوط پویا-۶۰۹۳ MIX-6093	1201	4570	3368	28 ab	39.3 abc	422	72.4 ab	7.2 abc	20.8 ab	8.808 ab	1.392
مخلوط پویا-سرارود Mix-Sararood	1027	4384	3357	23 ab	37.4 abcd	444	72.0 abc	7.2 abc	20.0 abc	8.977 ab	1.892
مخلوط پویا-۴۰۹۶ MIX-4096	1238	4296	3058	31 a	40.9 a	439	73.0 a	7.1 abc	19.4 abcd	8.303 ab	1.448
جمعیت تکاملی پرتویی EP-Partoee	1412	5288	3875	26 ab	40.0 ab	418	71.7 abc	6.9 c	19.6 abcd	8.126 ab	1.259
مخلوط پویا کشکولی MIX-Kashkooli	1094	4000	2907	27 ab	39.7 ab	486	70.0 cd	7.2 abc	16.7 ef	8.415 ab	1.415
مخلوط پویا نیک‌فرجام MIX-Nikfarjam	1396	4677	3278	26 ab	39.3 abcd	474	72.0 abc	7.1 abc	18.1 de	8.689 ab	1.328
جمعیت تکاملی رستمی EP-Rostami	1160	4549	3412	24 ab	35.0 d	417	72.7 a	7.3 ab	19.4 abcd	9.367 a	1.552
جمعیت تکاملی سیفی EP-Seyfi	1127	4630	3502	24 ab	40.0 ab	474	71.6 abc	7.1 abc	18.3 cde	8.193 ab	1.699
کل حیدری Kal Heydari	1092	4264	3170	26 ab	39.7 ab	489	68.8 d	7.4 a	15.4 f	7.916 ab	1.442
سرداری Sardari	1217	4487	3268	29 ab	39.8 ab	458	70.5 bcd	6.9 bc	18.4 cde	8.126 ab	1.363
آذر ۲ Azar 2	1099	4183	3107	27 ab	39.7 ab	435	70.2 bcd	7.0 abc	19.2 bcd	7.323 b	1.523
چمران ۲ Chamran2	1014	4011	2997	27 ab	39.1 abcd	421	68.8 d	6.9 bc	19.8 abcd	7.575 ab	1.308
مخلوط پویا-۱۰۰۹۶ MIX-10096	1071	4200	3128	25 ab	35.3 cd	371	71.9 abc	7.2 abc	21.2 a	9.362 a	1.565
مخلوط پویا-دروم MIX-Durum	1008	4401	3392	23 b	36.4 bcd	414	72.4 ab	6.3 d	19.6 abcd	7.931 ab	1.450
جمعیت تکاملی شراره EP-Sharareh	1186	4298	3111	28 ab	39.35 abc	377	72.9 a	7.3 ab	20.6 ab	7.931 ab	1.429
ضریب تغییرات C.V. (%)	66.56	40.6	47.74	35.56	12.88	34.01	15.13	29.95	41.36	28.17	90.55

* میانگین‌هایی که دارای حرف(های) مشترک هستند، براساس آزمون چندگانه بونفرونی در سطح احتمال ۰/۰۵ از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

* Means followed by the same letter(s) are not significantly different based on Bonferroni test for multiple comparisons at p = 0.05.

جدول ٦- طبقه‌بندی ١٦ ژنوتیپ گندم (شامل ١٢ جمعیت تکاملی و مخلوط پویا، دو رقم بومی و دو رقم اصلاح‌شده) براساس میانگین رتبه در پنج شاخص ثبات (شاخص برتری رقم، واریانس محیطی، ضریب اکوالانس ریک، میانگین رتبه‌ها و واریانس رتبه‌ها) برای برخی صفات زراعی گندم

Table 6- Classification of 16 entries (twelve evolutionary populations, two landraces and two improved varieties) according to the mean ranking for five stability indices (cultivar superiority, environmental variance, Wricke's ecovalence, mean ranks and variance of ranks), calculated for some agronomic traits of wheat

نام ژنوتیپ Name of entry	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد زیست‌توده Biomass yield	عملکرد کاه Straw yield (SY)	شاخص برداشت Harvest index	وزن هزار دانه Thousand kernel weight	ارتفاع بوته Plant height	طول سنبله Spike length	میانگین Average	رتبه‌بندی کلی Overall ranking
مخلوط پویا-۶۰۹۷ MIX-6097	1	2	6	2	2	3	14	4.29	1
مخلوط پویا-۶۰۹۳ MIX-6093	4	13	12	3	3	14	7	8.00	7
مخلوط پویا-سرارود Mix-Sararood	10	4	7	10	8	7	8	7.71	6
مخلوط پویا-۴۰۹۶ MIX-4096	14	16	14	5	5	6	6	9.43	12
جمعیت تکاملی پرتویی EP-Partoee	13	10	9	8	13	10	11	10.57	15
مخلوط پویا کشکولی MIX-Kashkooli	7	14	11	1	4	11	5	7.57	4
مخلوط پویا نیک‌فرجام MIX-Nikfarjam	11	5	3	4	10	5	15	7.57	5
جمعیت تکاملی رستمی EP-Rostami	16	11	1	14	16	4	3	9.29	11
جمعیت تکاملی سیفی EP-Seyfi	6	6	8	15	14	15	4	9.71	13
کل حیدری Kal Heydari	12	8	10	11	15	8	1	9.29	10
سرداری Sardari	3	7	5	9	12	13	12	8.71	9
آذر ۲ Azar 2	15	3	2	6	1	16	13	8.00	8
چمران ۲ Chamran2	9	15	15	16	11	9	16	13.00	16
مخلوط پویا-۱۰۰۹۶ MIX-10096	5	9	16	13	6	12	10	10.14	14
مخلوط پویا-دوروم MIX-Durum	8	1	4	12	7	2	9	6.14	2
جمعیت تکاملی شراره EP-Sharareh	2	12	13	7	9	1	2	6.57	3

براساس نتایج این جدول، شاخص قابلیت اطمینان عملکرد دانه در جمعیت تکاملی شراره و مخلوط پویا ۴۰۹۶ بالاتر از رقم بومی سرداری بوده و مخلوط‌های پویا ۶۰۹۷، سرارود و ۶۰۹۳ نیز مقادیر بالاتری نسبت به رقم اصلاح‌شده آذر۲ نشان دادند. این نتیجه نشان می‌دهد که برخی مواد ناهمگن، حتی در صورت نداشتن برتری معنی‌دار در میانگین عملکرد، از نظر کاهش ریسک عملکرد نسبت به شاهدهای رایج وضعیت مطلوب‌تری داشتند.

جمعیت تکاملی شراره در اغلب صفات بررسی‌شده از حداقل عملکرد تضمین‌شده بالاتری نسبت به ارقام شاهد بومی و اصلاح‌شده برخوردار بوده و در نتیجه، ریسک شکست عملکرد آن در دامنه نوسانات محیطی کمتر است، الگویی که با مفهوم کاهش ریسک عملکرد از طریق افزایش حداقل عملکرد تضمین‌شده در توده‌های متنوع ژنتیکی هم‌خوانی دارد (Döring et al., 2015). این جمعیت از نظر قابلیت اطمینان عملکرد دانه و ارتفاع بوته بالاترین مقادیر را به خود اختصاص داد و از نظر قابلیت اطمینان عملکرد بیولوژیک نیز بهتر از تمامی ارقام شاهد عمل کرد؛ همچنین از نظر عملکرد کاه در سطح قابل قبولی قرار داشت. در صفت ارتفاع بوته، که در شرایط دیم و به‌ویژه در سال‌های خشک اهمیت کاربردی دارد، جمعیت تکاملی شراره بیشترین قابلیت اطمینان را نشان داد، درحالی‌که ارقام اصلاح‌شده آذر۲ و چمران۲ کمترین مقادیر این شاخص را به خود اختصاص دادند. افزون‌بر این، مخلوط‌های پویا سرارود، ۶۰۹۷ و دوروم نیز در اغلب صفات، سطوح مناسبی از قابلیت اطمینان عملکرد را نشان دادند.

در مقابل، مخلوط پویا نیک‌فرجام و جمعیت‌های تکاملی پرتویی و رستمی کمترین مقادیر شاخص قابلیت اطمینان عملکرد دانه را به خود اختصاص دادند؛ به‌گونه‌ای که در جمعیت تکاملی رستمی، در سطح احتمال انتخاب‌شده، حتی احتمال بروز عملکرد بسیار پایین و شکست محصول نیز وجود دارد. این الگو می‌تواند ناشی از سابقه کشت طولانی‌مدت این جمعیت در یک محیط خاص و پُرتنش و غلبه انتخاب جهت‌دار باشد که به تقویت سازگاری خصوصی و کاهش توان پاسخ در محیط‌های جدید منجر شده است (Ceccarelli & Grando,2020).

بررسی ژنوتیپ‌هایی با منشأ مشترک نشان داد که این مواد از نظر قابلیت اطمینان عملکرد رفتار یکنواختی ندارند؛ به‌طوری که شاخص قابلیت اطمینان عملکرد دانه در مخلوط پویا کشکولی تقریباً چهار برابر بیشتر از مخلوط پویا نیک‌فرجام بود. همچنین در بین جمعیت‌های تکاملی هم‌منشأ، جمعیت تکاملی پرتویی از نظر قابلیت اطمینان عملکرد کاه ضعیف‌تر از جمعیت‌های تکاملی رستمی و سیفی ظاهر شد، درحالی‌که جمعیت تکاملی سیفی از نظر قابلیت اطمینان عملکرد دانه وضعیت بهتری نسبت به دو جمعیت دیگر نشان داد. بروز این تفاوت‌ها، علی‌رغم منشأ ژنتیکی مشابه، می‌تواند بازتاب شرایط اقلیمی، محیطی و مدیریتی متفاوتی باشد که این جمعیت‌ها و مخلوط‌ها پیش از آغاز این مطالعه در آن‌ها تکامل یافته‌اند، این نتیجه‌گیری با اطلاعات منشأ و تاریخچه کشت ژنوتیپ‌ها (جدول ۲) هم‌خوانی دارد و با نقش فشارهای انتخابی محلی در شکل‌دهی سازگاری خصوصی و محدود شدن دامنه پاسخ در محیط‌های جدید قابل تبیین است (Ceccarelli & Grando,2020; Merrick et al., 2020).

در چارچوب تفسیر نتایج به‌دست‌آمده، این الگو نشان می‌دهد که به‌نژادی تکاملی نه یک مسیر خطی به‌سوی بیشینه‌سازی عملکرد، بلکه نوعی راهبرد پویا برای مدیریت ریسک، حفظ عملکرد حداقلی و افزایش تاب‌آوری در شرایط عدم قطعیت اقلیمی است. هم‌زمان، هم‌گرایی الگوی حاصل از شاخص‌های چندگانه ثبات و شاخص قابلیت اطمینان عملکرد نشان داد که شماری از ژنوتیپ‌های ناهمگن، به‌ویژه جمعیت تکاملی شراره و مخلوط‌های پویا ۶۰۹۷ و ۴۰۹۶، در مقایسه با توده شاهد بومی و ارقام اصلاح‌شده، عملکرد باثبات‌تر و ریسک شکست کمتری را در دامنه نوسانات محیطی نشان دادند. این برتری نسبی نه به‌معنای افزایش یکنواخت میانگین عملکرد، بلکه بیانگر توان بالاتر این مواد ژنتیکی در حفظ حداقل عملکرد قابل اتکا و پاسخ انعطاف‌پذیر به تغییرپذیری محیطی است. از منظر تاریخچه تکاملی نیز عملکرد مطلوب‌تر این جمعیت‌ها/مخلوط‌ها می‌تواند تا حدی با این واقعیت تبیین شود که هرچند این جمعیت‌ها/مخلوط‌ها پیش از آغاز آزمایش حاضر ایجاد شده بودند، امّا برخلاف برخی جمعیت‌های هم‌منشأ که برای دوره‌های طولانی در محیط‌های خاص و تحت فشار انتخاب طبیعی مداوم قرار داشته‌اند، کمتر در معرض مسیرهای تکاملی محدودکننده ناشی از سازگاری اختصاصی و غلبه انتخاب جهت‌دار بوده‌اند؛ در نتیجه، ظرفیت پاسخ تطبیقی آن‌ها در مواجهه با مجموعه‌ای متنوع از شرایط محیطی حفظ شده و به بروز الگوی ثبات و قابلیت اطمینان بالاتر در مقیاس چند مکانی منجر شده است.

جدول ۷- شاخص قابلیت اطمینان عملکرد برای صفات عملکردی و ارتفاع بوته در ۱۶ ژنوتیپ گندم

Table 7- Yield reliability index for yield-related traits and plant height in sixteen wheat genotypes

نام ژنوتیپ Name of entry	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد زیست‌توده Biomass yield	عملکرد کاه Straw yield	ارتفاع بوته Plant height
مخلوط پویا-۶۰۹۷ MIX-6097	316.80 (6)	1380.17 (7)	755.76 (10)	46.36 (4)
مخلوط پویا-۶۰۹۳ MIX-6093	323.59 (5)	1257.06 (12)	668.37 (11)	45.00 (12)
مخلوط پویا-سرارود Mix-Sararood	337.89 (4)	1852.92 (1)	775.43 (8)	46.33 (5)
مخلوط پویا-۴۰۹۶ MIX-4096	373.00 (2)	1183.56 (14)	646.40 (12)	45.56 (9)
جمعیت تکاملی پرتویی EP-Partoee	0.69 (15)	699.75 (16)	622.90 (15)	45.73 (7)
مخلوط پویا کشکولی MIX-Kashkooli	289.36 (9)	1518.41 (4)	570.99 (16)	45.95 (6)
مخلوط پویا نیک‌فرجام MIX-Nikfarjam	65.38 (14)	1316.00 (10)	763.34 (9)	45.24 (10)
جمعیت تکاملی رستمی EP-Rostami	-38.99 (16)	1320.09 (8)	847.08 (2)	46.49 (3)
جمعیت تکاملی سیفی EP-Seyfi	249.85 (11)	1289.63 (11)	810.52 (6)	44.50 (13)
کل حیدری Kal Heydari	294.45 (8)	1125.84 (15)	641.73 (14)	44.47 (14)
سرداری Sardari	371.08 (3)	1319.98 (9)	837.22 (3)	45.04 (11)
آذر ۲ Azar 2	297.56 (7)	1223.91 (13)	777.94 (7)	43.36 (15)
چمران ۲ Chamran2	279.21 (10)	1408.25 (6)	893.49 (1)	42.87 (16)
مخلوط پویا-۱۰۰۹۶ MIX-10096	247.67 (12)	1848.20 (2)	643.06 (13)	45.59 (8)
مخلوط پویا-دوروم MIX-Durum	205.15 (13)	1792.67 (3)	813.83 (5)	47.35 (2)
جمعیت تکاملی شراره EP-Sharareh	400.53 (1)	1458.17 (5)	814.28 (4)	48.38 (1)

* اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده رتبه ژنوتیپ‌ها براساس شاخص قابلیت اطمینان هستند و رتبه کمتر بیانگر قابلیت اطمینان بیشتر است. اعداد خارج از پرانتز مقدار شاخص قابلیت اطمینان را نشان می‌دهند؛ این مقادیر برای صفات عملکردی با واحد کیلوگرم در هکتار و برای ارتفاع بوته با واحد سانتی‌متر بیان شده‌اند.

*** Numbers in parentheses indicate the ranking of genotypes based on the reliability index, where a lower rank represents higher reliability. Values outside the parentheses represent the reliability index values; these are expressed in kilograms per hectare for yield traits and in centimeters for plant height.**

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که برخی از جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا، به‌واسطه تنوع ژنتیکی درون‌گونه‌ای، می‌توانند از ظرفیت مناسبی برای حفظ عملکرد، کاهش ریسک شکست محصول و بروز ثبات نسبی در شرایط دیم و پُرتنش برخوردار باشند. مقایسه این مواد ژنتیکی با ارقام یکنواخت اصلاح‌شده و برخی ارقام بومی نشان داد که مزیت اصلی آن‌ها الزاماً در افزایش میانگین عملکرد ظاهر نمی‌شود، بلکه بیشتر در ثبات عملکرد و بهبود حداقل عملکرد قابل اتکا در دامنه نوسانات محیطی نمود پیدا می‌کند. در بین ژنوتیپ‌ها، جمعیت تکاملی پرتویی با میانگین ۱۴۱۲ کیلوگرم در هکتار

بیشترین میانگین عددی عملکرد دانه و همچنین بیشترین عملکرد زیست‌توده و کاه را داشت، هرچند اختلاف عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها معنی‌دار نبود. مخلوط پویا ۴۰۹۶ نیز بیشترین شاخص برداشت و وزن هزار دانه و مخلوط پویا ۱۰۰۹۶ بیشترین تعداد دانه در سنبله را به خود اختصاص دادند. براساس میانگین رتبه حاصل از پنج شاخص ثبات، مخلوط پویا ۶۰۹۷ رتبه نخست ثبات عملکرد دانه و ثبات کلی صفات را به دست آورد و جمعیت تکاملی شراره از نظر ثبات عملکرد دانه در رتبه دوم قرار گرفت. همچنین براساس شاخص قابلیت اطمینان در سطح احتمال ۸۵ درصد، شراره با مقدار ۴۰۰/۵۳ کیلوگرم در هکتار بالاترین حداقل عملکرد قابل اتکای دانه و مخلوط پویا ۴۰۹۶ با مقدار ۳۷۳ کیلوگرم در هکتار رتبه دوم را داشت. این نتایج نشان داد که بیشترین میانگین عملکرد الزاماً با بیشترین ثبات و قابلیت اطمینان همراه نیست. نتایج همچنین نشان داد که ثبات و دامنه سازگاری جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا تحت تأثیر ساختار ژنتیکی درونی و تاریخچه فشارهای انتخاب (طبیعی و مدیریتی) قرار می‌گیرد. ازاین‌رو نمی‌توان انتظار داشت که هر جمعیت تکاملی یا مخلوط پویا در تمامی شرایط اقلیمی، محیطی و مدیریتی عملکردی مشابه نشان دهد. جمعیت‌های پرتویی، سیفی و رستمی هر یک برای چندین سال در یک محیط مشخص، امّا متفاوت از دیگری و تحت شرایط مدیریتی متفاوت کشت شده بودند، درحالی‌که جمعیت شراره در آغاز پژوهش از اختلاط همه جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا مورد استفاده در این آزمایش ایجاد شد و بدون سابقه کشت و انتخاب در یک محیط خاص، به صورت مستقیم در مکان‌های آزمایشی ارزیابی گردید. این جمعیت، علاوه‌بر کسب رتبه دوم ثبات عملکرد دانه و رتبه نخست قابلیت اطمینان عملکرد دانه، با میانگین عملکرد ۱۱۸۶ کیلوگرم در هکتار، از نظر عددی عملکرد بیشتری نسبت به ارقام شاهد آذر ۲ و کل حیدری نشان داد و عملکرد آن تنها اندکی کمتر از رقم بومی سرداری بود؛ هرچند تفاوت عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود. بنابراین، وضعیت مطلوب شراره از نظر عملکرد نسبی، ثبات و قابلیت اطمینان می‌تواند با تنوع ژنتیکی اولیه گسترده و نبود سابقه انتخاب جهت‌دار در یک محیط خاص مرتبط باشد. براساس نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد که معرفی و گسترش این توده‌های ناهمگن به مناطق جدید مستلزم رویکردی هدفمند باشد. جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویای تازه تشکیل‌شده می‌توانند از مراحل ابتدایی در محیط هدف مستقر شوند تا مسیر تکامل و سازگاری خود را در همان منطقه طی کنند. همچنین در صورت تبادل این مواد میان مناطق، انجام تبادل در نسل‌های ابتدایی‌تر و میان نواحی دارای شرایط اقلیمی، محیطی و مدیریتی مشابه می‌تواند احتمال سازگاری موفق آن‌ها را افزایش دهد. علاوه‌بر این کشاورزان هر منطقه نیز می‌توانند به‌صورت مشارکتی مخلوط پویا متناسب با منطقه خود را ایجاد کرده و به کشت آن بپردازند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌نژادی تکاملی صرفاً مسیری برای بیشینه‌سازی عملکرد نیست، بلکه راهبردی پویا برای مدیریت ریسک، حفظ عملکرد قابل اتکا و افزایش تاب‌آوری در شرایط عدم قطعیت اقلیمی و تنش‌های محیطی محسوب می‌شود. بدین ترتیب، جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا، در صورت به‌کارگیری هدف‌مند، می‌توانند به‌عنوان یکی از رویکردهای اگرواکولوژیک، از طریق افزایش تنوع ژنتیکی و تقویت ظرفیت سازگاری، در افزایش ثبات تولید در کشاورزی دیم و تقویت به امنیت غذایی ایفای نقش کنند.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی مؤسسه توسعه پایدار و محیط‌زیست (سنستا)، صندوق بین‌المللی توسعه کشاورزی (IFAD[1]) و اتحاد بیوورسیتی اینترنشنال[2] و مرکز بین‌المللی کشاورزی گرمسیری (CIAT[3])انجام شده است. از همکاری و همراهی همکاران اجرایی در فعالیت‌های میدانی، به‌ویژه مبینا نورمحمودیان امیری، مهدی اسماعیلی، هانیه مغانی و سهیل حسین‌زاده صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین از مریم رحمانیان و دکتر رضا حق‌پرست برای حمایت‌های علمی و فنی در مراحل طراحی، اجرا و تحلیل آزمایش‌ها سپاسگزاری می‌شود. سپاس ویژه از کشاورزان همکار، بابک کشکولی، امیر کشکولی، ناصر پرتویی، فرزاد استخری و حسین نعمتی که با در اختیار گذاشتن زمین و امکانات، اجرای این پژوهش را ممکن ساختند، ابراز می‌گردد. در پایان، این اثر به یاد و احترام زنده‌یاد دکتر خدیجه کاترین رضوی، مدیرعامل فقید سازمان توسعه پایدار و محیط‌زیست تقدیم می‌شود.

1- International Fund for Agricultural Development
2- Bioversity international
3- International Center for Tropical Agriculture

References

1. Akbari, M., Rezaee, A., Shirani Bidabadi, F., & Eshraghi, F. (2022). Investigating the relationship between climate change and total factor productivity growth of rainfed barley in Iran. *Agricultural Economics, 16*(1), 81-97. (In Persian) https://doi.org/10.22034/IAES.2022.540042.1877
2. Allard, R. W., & Bradshaw, A. D. (1964). Implications of genotype–environmental interactions in applied plant breeding. *Crop Science, 4*(5), 503–508. https://doi.org/10.2135/cropsci1964.0011183X000400050021x
3. Allard, R. W., Hansche, P. E. (1964). Some parameters of population variability and their implications in plant breeding. *Advances in Agronomy, 16*, 281–325. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60027-9
4. Amirifar, E., Aghaee Sarbarze, M., Haghparast, R., & Khosroushahli, M. (2011). Yield stability, bread-making quality, and drought tolerance in bread wheat genotypes. *Seed and Plant Improvement Journal, 27*(1–2), 233–255. (In Persian). https://doi.org/10.22092/spij.2017.111061
5. Becker, H.C., & Léon, J. (1988), Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding, 101*: 1-23. https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1988.tb00261.x
6. Borg**,** J., Kiær, L. P., Lecarpentier, C., Goldringer, I., Gauffreteau, A., Saint-Jean, S., Barot, S., & Enjalbert, J. (2018). Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps. *Field Crops Research, 221***,** 298–313. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.006
7. Ceccarelli, S., Grando, S., & Booth, R. H. (1996). International breeding programmes and resource-poor farmers: Crop improvement in difficult environments. In P. Eyzaguirre & M. Iwanaga (Eds.), *Participatory Plant Breeding: Proceedings of A Workshop on Participatory Plant Breeding*, 26–29 July 1995, Wageningen, The Netherlands. pp. 99–116. IPGRI.
8. Ceccarelli, S., & Grando, S. (2007). Decentralized-participatory plant breeding: An example of demand-driven research**.** *Euphytica, 155***,** 349–360. https://doi.org/10.1007/s10681-006-9336-8
9. Ceccarelli, S., & Grando, S. (2020). Evolutionary plant breeding as a response to the complexity of climate change**.** *iScience, 23*(12), 101815. https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101815
10. Ceccarelli, S., Grando, S., Salimi, M., & Razavi, K. (2022). Evolutionary populations for sustainable food security and food sovereignty. In Y. Nishikawa & M. Pimbert (Eds.), *Seeds for diversity and inclusion: Agroecology and Endogenous Development* (pp. 121–136). Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89405-4_8
11. Ceccarelli, S., & Grando, S. (2024). Diversity as a plant breeding objective. *Agronomy, 14*(3)**,** 550. https://doi.org/10.3390/agronomy14030550
12. Coombes, N. E. (2009). DiGGer design search tool in R. Retrieved May 16, 2021, from http://nswdpibiom.org/austatgen/software
13. Derakhshandeh, A., Khoorani, A., & Rezazadeh, M. (2024). Projecting spatiotemporal changes of precipitation over Iran using CORDEX regional climate models until 2100. *Journal of Earth System Science, 133*(7). https://doi.org/10.1007/s12040-023-02212-z
14. Döring, T. F., Annicchiarico, P., Clarke, S., Haigh, Z., Jones, H. E., Pearce, H., Snape, J., Zhang, J., & Wolfe, M. S. (2015). Comparative analysis of performance and stability among composite cross populations, variety mixtures, and pure lines of winter wheat in organic and conventional cropping systems. *Field Crops Research, 183*, 235–245. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.08.009
15. FAO. (2025). *Global Report on Food Crises*. FAO. https://www.fsinplatform.org/grfc2025
16. Goldringer**,** I., Prouin, C., Rousset, M., Galic, N., & Bonnin, I. (2006). Rapid differentiation of experimental populations of wheat for heading time in response to local climatic conditions. *Annals of Botany, 98***,** 805–817. https://doi.org/10.1093/aob/mcl160
17. Haghparast, R., Ceccarelli, S., Pourdad, S. S., Rahmanian, M., Taheri, A., Rajabi, R., Razavi, K. K., Salimi, M., Mohammadi, R.& Moradi, J. (2013). Importance of evolutionary breeding of rainfed cereals in tackling with climate change. In Proceedings of the Second National Conference on Climate Change and Its Impact on Agriculture and Environment. Urmia, Iran. (In Persian).
18. IPCC. (2023). Food, Fibre and Other Ecosystem Products. In Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 713–906). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844.007

19. Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T. M., Bonin, C., Bruelheide, H., de Luca, E., Ebeling, A., Griffin, J. N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., Meyer, S. T., Mori, A. S., Naeem, S., Niklaus, P. A., Polley, H. W., Reich, P. B., Roscher, C., Seabloom, E. W., Smith, M. D., Thakur, M. P., Tilman, D., Tracy, B. F., van der Putten, W. H., van Ruijven, J., Weigelt, A., Weisser, W. W., Wilsey, B., & Eisenhauer, N (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature, 526*(7574), 574–577. https://doi.org/10.1038/nature15374
20. Jasemi, S. Sh., Naghipoor, F., Sanjani, S., Esfandyari-Pour, E., Khorsandi, H., & Najafian, G. (2017). Evaluation of grain quality characteristics of four bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in wheat-producing provinces of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences, 19*(2), 102-115. (In Persian). http://agrobreedjournal.ir/article-1-755-en.html.
21. Kataoka, S. (1963). A stochastic programming model. *Econometrica, 31*(2), 181–196. https://doi.org/10.2307/1910956
22. Krug, A. S., Drummond, E. B. M., Van Tassel, D. L., & Warschefsky, E. J. (2023). The next era of crop domestication starts now. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 120*(14), e2205769120. https://doi.org/10.1073/pnas.2205769120
23. Lin, C. S., & Binns, M. R. (1988). **A** superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Canadian Journal of Plant Science, 68*(1), 193–198. https://doi.org/10.4141/cjps88-018
24. Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J., (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science, 333*(6042), 616-620. doi: 10.1126/*Science*.1204531
25. Merrick, R. F., Carter, A. H., Jones, S. S., & Anderson, J. A. (2020). Utilization of evolutionary plant breeding increases wheat yield stability under drought stress. *Sustainability, 12*(15), 6036.
26. Ministry of Agriculture Jihad. (2023). Agricultural Satistics: Field Crops. Vol 1. p. 10-28. Retrieved August 2025, from https://dpe.maj.ir
27. Moore, K. J., & Dixon, P. M. (2015). Analysis of combined experiments revisited. *Agronomy Journal, 107*(2), 763–771. https://doi.org/10.2134/agronj13.0485
28. Murphy, K., Lammer, D., Lyon, S., Carter, B., & Jones, S. S. (2004). Breeding for organic and low-input farming systems: An evolutionary-participatory breeding method for inbred cereal grains. *Renewable Agriculture and Food Systems, 20*(1), 48–55. https://doi.org/10.1079/raf200486
29. Neupane, S. P., Joshi, B. K., Ayer, D., Karkee, A., Ghimire, K. H., Gauchan, D., Mengistu, D. K., Ceccarelli, S., & Grando, S. (2025). Dynamic mixtures reduce the severity of a number of diseases in rice and bean in low-input mountain farming systems of Nepal. *Euphytica, 221*, 91. https://doi.org/10.1007/s10681-025-03488-6
30. Nasiri, M., Salimi, M., Agha Maleki, M. T., Khosravi, V., Amoogholi Tabari, M., Fathi, N., Kheiri, N., Erfanimoghaddam, R., Mohammadpour, H., Alinajad, E., & Ehsani Ameli, B. (2024). Final report of the research project: Agronomic and quality assessment of Iranian local rice genotypes and establishment of evolutionary populations for biodiversity conservation and adaptation to climate change. Ministry of Agriculture Jihad, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Rice Research Institute of Iran – Deputy of Mazandran. Amol, Iran. (In Persian).
31. Nassar, R., & Hühn, M. (1987). Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics, 43*(1), 45–53. https://doi.org/10.2307/2531947
32. Nassiri Mahallati, M., & Koocheki, A. (2014). Long Term Evaluation of Yield Stability Trend for Cereal Crops in Iran. *Journal of Agroecology, 6*(3), 607–621. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jag.v6i3.26802
33. Pirasteh A. H., Ranjbar, G., Tabatabaei, S. A., Shiran Tafteh, M., Salimi, M., Parvizi, H., & Parnian, A. (2023). Final report of the research project: Comparison of the yield stability of two evolutionary barley populations with check genotypes under saline conditions. Ministry of Agriculture Jihad, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), National Salinity Research Center, Yazd, Iran. (In Persian).
34. Pouryousefi, K., Pourtabrizi, S., Mohamadi-Nejad, G., Ghaderi, M. G., Nakhoda, B., & Abdolshahi, R. (2022). Transferring four yellow rust resistance genes to wheat cv. Kalhaydari using marker assisted backcrossing. *Iranian Journal of Plant Pathology, 57*(4), 291–301. (In Persian). https://doi.org/ 10.22034/ijpp.2022.545750.377
35. Raggi, L., Ciancaleoni, S., Torricelli, R., Terzi, V., Ceccarelli, S., & Negri, V. (2017). Evolutionary breeding for sustainable agriculture: Selection and multi-environment evaluation of barley populations and lines. *Field Crops*

Research, *204*, 76–88. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.011
36. Rezaei, E.E., Webber, H., Asseng, S., Boote, K., Durand, J. L., Ewert, F., Martre, P., & MacCarthy, D. S., (2023), Climate change impacts on crop yields. *Nature Reviews Earth & Environmen*, *4*(12), 831-846. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0
37. Römer, T. (1917). Sind die ertragdreichen Sorten ertragssicherer? *Mitteilungen der Deutschen Landwirtschafts Gesellschaft*, *32*, 87–89.
38. Salimi, M., Razavi, K. C., Amiri, M. N., Esmaeili, M., Khorramdel, S., Moghani, H., Grando, S., & Ceccarelli, S. (2023). Stability of agronomic traits of barley evolutionary populations under drought conditions in Iran. *Agronomy*, *13*(7), 1931. https://doi.org/10.3390/agronomy13071931
39. Soofi, L., Heidari, G., Siosemardeh, A., & Hosseinpanahi, F. (2017). The effect of zinc sulfate foliar spray on yield and yield components of Sardari wheat ecotypes. *Plant Production Technology*, *16*(2), 69–86. (In Persian)
40. Suneson, C. A. (1956). An evolutionary plant breeding method. *Agronomy Journal*, *48*(4), 188–191. https://doi.org/10.2134/agronj1956.00021962004800040012x
41. VSN International. (2022). GenStat for Windows (24th Ed.). VSN International. https://www.genstat.co.uk
42. Wricke, G. (1962). Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*, *47*, 92–96.

Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 18, No. 2, 2026, p. 271-286

The Effect of Planting Date on the Growth and Yield of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Different Tillage Systems

Shahram Choobtashani[1], Hassan Heidari[1*] and Mohammadeghbal Ghobadi[1]

1- Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agricultural Science and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding author's Email: h.heidari@razi.ac.ir)

Received: 23-07-2026
Revised: 15-08-2026
Accepted: 24-08-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:
Choobtashani, S., Heidari, H., & Ghobadi, M. E. (2026). The effect of planting date on the growth and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in different tillage systems. *Journal of Agroecology*, *18*(2), 271-286. (In Persian)
https://doi.org/10.22067/AGRY. 2026.100023.1278

Introduction

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is a self-pollinating, diploid, annual plant with a small genome and is the most important legume crop, ranking third globally and first among South Asian countries (Gaur et al., 2010). Shifting the chickpea sowing date from spring to autumn is a key strategy for increasing yield (Sadeghipour & Aghaei, 2012). Tillage is a crucial agricultural operation due to its impact on soil properties, the environment, and crop growth (Sharma et al., 2011). In a study examining the effects of various tillage systems and seed pre-treatments on rainfed chickpea, KhanPayeh and Jalilian (2013) found that the highest and lowest grain and biological yields were obtained under reduced tillage and no-tillage systems, respectively.

Materials and Methods

In order to investigate the effect of planting date on the growth and yield of rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.) in different tillage systems, an experiment was conducted in the 2021-2022 crop year in the organic farm of the Agricultural and Natural Resources Campus of Razi University of Kermanshah, in a split-plot design in a randomized complete block design with three replications. Three planting dates (including the first planting date (D1) 2021/12/18, the second planting date (D2) 2022/1/9, and the third planting date (D3) 2022/1/25) as subplots and different tillage systems as main plots (including three levels: 1- No-till treatment (T1): No-till plots that were carried out without any tillage operations; 2- Reducted tillage (T2): Reduced tillage plots included a protective plowing stage with a compound plow; 3- Conventional tillage (T3): Conventional tillage plots included a plowing stage with a rotary plow and a disk stage).

Results and Discussion

The results of this study showed that the highest plant height was related to T2×D1 (29.24 cm), and the lowest value of this trait was assigned to the T1×D2 and T1×D3 treatments, with values of 16 and 16 cm,

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.22067/AGRY. 2026.100023.1278

respectively. Treatment T2×D2 had the highest number of pods in the main branch (3.67). Also, the lowest number of pods in the main branch was assigned to treatment T1×D2 (2.33). The highest percentage of green cover was assigned to treatment combinations T2×D1 and T2×D2, with values of 63 and 61.67 percent, respectively, and no significant difference was observed between these two treatments in terms of this trait. On the other hand, the lowest values of this trait were also observed in treatments T1×D1, T1×D2, and T1×D3 (44, 43.67, and 44.33 percent). On the other hand, the highest number of seeds in pods was related to the effect of the low tillage treatment (1.67), and the lowest value of this trait was observed in the conventional tillage treatment unit. The highest average number of seeds per plant was observed in the combined treatment T2×D1 (27.77), and there was no significant difference between this treatment and the treatment combinations T2×D2 and T3×D1 (with values of 17.24 and 53.23, respectively). The lowest number of seeds per plant was also related to the treatment combination T1×D3 (17.12). The best treatment combination in terms of biological yield was related to T2×D1 and T2×D2 (2400 and 2233.33 $kg.ha^{-1}$), and there was no significant difference between these two treatment combinations in terms of biological yield, but the worst treatment combination for biological yield was attributed to the treatments T1×D1, T1×D2 and T1×D3 (with values of 1743.33, 1680 and 1690 $kg.ha^{-1}$, respectively). The highest grain yield values were observed in the T2×D1 and T2×D2 treatment combinations (67.984 and 33.974), which were reported as the best treatments in terms of grain yield. The lowest grain yield was observed in the T1×D1, T1×D2, and T1×D3 treatment combinations, with values of 696, 33.665, and 67.656 $kg.ha^{-1}$, respectively, which were considered the worst treatment combinations in terms of yield in the present study.

Conclusion

Based on the present findings, it can be said that the best treatment combination was the first planting date in the reduced tillage system. On this date, along with the reduced tillage treatment, more green cover is produced, which is equal to increased amounts of yield components and yield, and the results of this study confirm this claim.

Keywords: Conventional tillage, No-tillage, Planting time, Reduced tillage

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۸۶-۲۷۱

تأثیر تاریخ کاشت بر رشد و عملکرد نخود (*Cicer arietinum* L.) در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی

شهرام چوبتاشانی[۱]، حسن حیدری[۱*] و محمداقبال قبادی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

چکیده

در راستای بررسی اثر تاریخ کاشت بر رشد و عملکرد نخود (*Cicer arietinum* L.) دیم اصلاح‌شده (رقم عادل) در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی، آزمایشی طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در مزرعه ارگانیک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه، به‌صورت طرح کرت-های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی به‌عنوان کرت اصلی (شامل سه سطح: ۱- تیمار بی‌خاک‌ورزی (T1)، ۲- خاک‌ورزی کاهشی (T2)، ۳- خاک‌ورزی متداول (T3)) و سه تاریخ کشت (شامل تاریخ کاشت اول ۱۴۰۰/۰۹/۲۷ (D1)، تاریخ کاشت دوم ۱۴۰۰/۱۰/۱۹ (D2) و تاریخ کاشت سوم ۱۴۰۰/۱۱/۰۵ (D3)) به‌عنوان کرت فرعی در نظر گرفته شد. خاک‌ورزی متداول با تاریخ کاشت بهمن ماه شاهد در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که تیمار اثر متقابل خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت دی ماه (T2×D2) بیشترین تعداد نیام در شاخه اصلی (۳/۶۷ عدد) را داشت که نسبت به تیمار بی‌خاک‌ورزی با تاریخ کاشت دی ماه ۵۷ درصد افزایش داشت. همچنین کمترین تعداد نیام در شاخه اصلی نیز به تیمار اثر متقابل بی‌خاک‌ورزی با تاریخ کاشت دی ماه (۲/۳۳ عدد) اختصاص داشت. بالاترین تعداد نیام در شاخه فرعی در تیمار خاکورزی کاهشی با تاریخ کاشت آذر ماه (۲۲/۸۳ عدد) مشاهده شد که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه ۹۶ درصد افزایش داشت. کمترین تعداد نیام در شاخه فرعی نیز مربوط به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه (۱۱/۶۷ عدد) بود. از طرفی، بیشترین تعداد دانه در نیام مربوط به اثر تیمار کم‌خاکورزی (۱/۶۷ عدد) بود و کم‌ترین مقدار این صفت، در تیمار خاکورزی مرسوم (یک عدد) مشاهده گردید که ۶۷ درصد کاهش نشان داد. بیشترین میانگین تعداد دانه در بوته در تیمار اثر متقابل خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت آذر ماه (۲۷/۷۷ عدد) مشاهده شد که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه ۱۲۸ درصد افزایش داشت. بالاترین عملکرد دانه در تیمار خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت آذر ماه (۹۸۴/۶۷ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه ۵۰ درصد افزایش داشت. علاوه‌بر این کم‌ترین عملکرد دانه در تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه (۶۵۶/۶۷ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد. با استناد به یافته‌های پژوهش حاضر می‌توان گفت که بهترین ترکیب تیماری در تاریخ کشت آذر ماه به همراه کم‌خاکورزی بوده است.

واژه‌های کلیدی: بی‌خاک‌ورزی، خاک‌ورزی کاهشی، خاک‌ورزی متداول، زمان کاشت

مقدمه

نخود زراعی (*Cicer arietinum* L.) گیاهی خودگشن، دیپلوئید، یک‌ساله با ژنوم کوچک و مهم‌ترین گیاه متعلق به خانواده حبوبات می‌باشد که به‌عنوان سومین محصول در جهان و اولین محصول در بین کشورهای جنوب آسیا مطرح است (Gaur et al., 2010). نخود منبع بسیار مناسبی از عناصر روی، آهن و پروتئین می‌باشد. انواع نخود به‌طور متوسط دارای ۱۹ درصد پروتئین، ۱۳ درصد چربی و ۶۸ درصد کربوهیدرات است (Fathi et al., 2016). طبق گزارش‌های

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: h.heidari@razi.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/AGRY. 2026.100023.1278

جهانی، ایران از لحاظ سطح زیرکشت نخود رتبه پنجم و از لحاظ تولید رتبه نهم دنیا را به خود اختصاص داده است (FAO, 2023). بیش از یک سوم نخود ایران در استان کرمانشاه تولید شده و مرکز شورای ملی نخود ایران نیز در این استان تأسیس شد. استان کرمانشاه با سطحی معادل ۱۶۰ هزار هکتار و تولید ۱۱۱ هزار تن نخود در سال ۱۴۰۴ رتبه اول کشور را به خود اختصاص داده است (Ministry of Jihad-Agriculture, 2025).

تغییر تاریخ کاشت نخود از بهار به پاییز، یکی از راهکارهای مهم جهت افزایش عملکرد نخود می‌باشد (Sadeghipour & Aghaei, 2012). عملکرد و فرآیندهای تشکیل نخود به ژنتیک، محیط و عوامل زراعی و تداخل بین آن‌ها بستگی دارد. براساس گزارش‌های موجود، انتخاب و بهبود ارقام در توافق با آب‌وهوا و شرایط خاک منطقه از مهم‌ترین عملیات زراعی برای به دست آوردن عملکرد بالا است (Shah et al., 2020). تاریخ کاشت نقش مهمی در افزایش عملکرد گیاهان زراعی دارد. کاشت در تاریخ‌های مختلف سبب برخورد مراحل رویشی و زایشی گیاه با درجه حرارت، تابش خورشید و طول روز متفاوت می‌شود. این موضوع در نخود که معمولاً در شرایط خشک و یا با تکیه بر رطوبت ذخیره‌شده در خاک کشت می‌شود و با درجه حرارت‌های بالا در انتهای فصل رشد مواجه است، حائز اهمیت است. در کاشت زودهنگام بهاره، گیاه به‌سبب داشتن اندام‌های رویشی بزرگ‌تر، می‌تواند مقصد زایشی بزرگ‌تری را تغذیه کرده و به‌میزان کافی ماده خشک به آن اختصاص دهد و در نتیجه عملکرد گیاه افزایش می‌یابد. در مناطق دیم و به‌خصوص در نیمه غربی ایران، نخود به‌دلیل قرار گرفتن در تناوب با گندم (*Triticum aestivum* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.) دیم، نقش بسیار مهمی در حفظ و بقای کشاورزی این مناطق ایفا می‌کند. کاشت نخود عمدتاً در بهار صورت می‌گیرد، ولی تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که کاشت پاییزه یا زمستانه آن موفقیت‌آمیز است، زیرا با این کار به‌نحو مؤثری از نزولات آسمانی استفاده نموده و عملکرد افزایش می‌یابد. در مناطق سردسیر در اوایل کاشت دمای پایین و در اواخر رشد دمای بالا از مسائل محدود کننده رشد و عامل کاهش دهنده عملکرد نخود هستند. بنابراین زمان کاشت و انتخاب رقم سازگار به شرایط محیطی در جهت استفاده بهینه از عوامل اقلیمی و تولید محصول بالاتر از جمله مسائل مهم به زراعی نخود به شمار می‌آید (Mohammadi et al., 2017).

زمان کاشت بر استقرار گیاه زراعی توانایی رقابت‌کنندگی و عملکرد آن تأثیرگذار است. کاشت انتظاری سبب کاهش بنیه اولیه، توانایی رقابت‌کنندگی گیاه زراعی و به‌تبع آن کاهش عملکرد می‌شود (Holding & Bowcher, 2014). البته به تأخیر انداختن کاشت گیاه زراعی، فرصتی برای کنترل مکانیکی پیش از کاشت فراهم می‌آورد. مشکل اصلی کشت زمستانه حبوبات، تداخل علف‌های هرز عنوان شده است. نخود به‌دلیل سرعت رشد کُند و سطح برگ محدود در مراحل اولیه رشد در برابر علف‌های هرز رقیب ضعیفی است، به‌طوری که رشد سریع علف‌های هرز باعث می‌شود که در صورت عدم مهار آن‌ها به‌راحتی بر گیاه زراعی غلبه کنند(Mishra et al., 2016) . تاریخ کشت نخود در مناطقی که در معرض خشکی انتهایی فصل رشد، به‌عنوان محدودیت عمده عملکرد قرار دارند، بر عملکرد این محصول تأثیر قابل توجهی دارد، زیرا بر شرایط و دوره رشد گیاه تأثیر می‌گذارد (Fang et al., 2016). بررسی حمزه‌ای و سیدی (Hamzei & Seyyedi, 2012)در سال ۲۰۱۲ روی واکنش سه رقم نخود به تاریخ‌های مختلف کاشت تحت شرایط دیم در منطقه همدان نشان داد که کاشت پاییز نخود منجر به بهبود رشد گیاه شد، به‌نحوی که دوره رشد رویشی در تاریخ‌های کاشت پاییزه بیش از تاریخ کاشت بهاره بود که این امر منجر به افزایش عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه نخود شد.

ناصری و همکاران (Naseri et al., 2012) در تحقیقی تحت عنوان تأثیر تاریخ کاشت و تراکم بوته بر عملکرد، اجزای عملکرد و پروتئین دانه‌ی سه رقم نخود در شرایط دیم استان ایلام دریافتند که بر هم‌کنش اثرات عوامل فصل کاشت در تراکم گیاهی در ارقام آزمایشی، بر عملکرد دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار شد، به‌طوری که بیشترین عملکرد دانه (۱۹۴۰ کیلوگرم در هکتار) از فصل کاشت پاییزه، تراکم ۲۰ بوته در مترمربع و رقم آزاد به دست آمد. در کشت پاییزه، رقم آزاد ضمن استفاده حداکثر از عوامل خاکی و عوامل محیطی، اجزای عملکرد و عملکرد بیشتری تولید کرد. بیات و همکاران (Bayat et al., 2012) با بررسی اثر تاریخ کاشت و تراکم بوته بر عملکرد و اجزای عملکرد رقم اصلاح‌شده نخود آرمان دریافتند که اثر متقابل تاریخ کشت و تراکم بوته بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در نهایت، بیشترین عملکرد دانه در کشت انتظاری با تراکم ۳۰ بوته در مترمربع حاصل شد و کمترین عملکرد دانه نیز در کشت بهاره دیرهنگام با ۴۰ بوته در مترمربع به

دست آمد. فرنیا و مرادی (Farnia & Moradi, 2015) با بررسی واکنش ارقام نخود دیم به زمان کاشت در شرایط کرمانشاه به این نتیجه رسیدند که در تاریخ کشت اول و دوم رقم هاشم و در تاریخ کشت سوم رقم آزاد دارای بالاترین میزان زیست‌توده و عملکرد دانه بودند. بیشترین عملکرد دانه (۲۴۹۰ کیلوگرم در هکتار) در تیمار تاریخ کاشت دوم در رقم هاشم به دست آمد. کمترین عملکرد دانه (۱۲۶۰ کیلوگرم در هکتار) نیز مربوط به همین رقم در تاریخ کاشت سوم بود که ۴۹/۳ درصد عملکرد دانه کمتری نسبت به تاریخ کاشت دوم داشت. در رقم ILC482 در تاریخ کاشت دوم عملکرد دانه بیشتری به دست آمد، درحالی‌که در تاریخ‌های کاشت زودتر و دیرتر، عملکرد دانه کمتری نسبت به تاریخ کاشت دوم حاصل شد.

خاک‌ورزی در سیستم کشاورزی به‌دلیل تأثیر بر خواص خاک، محیط زیست و رشد محصول یکی از عملیات مهم است (Sharma et al., 2011) و بر خواص فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی خاک تأثیر می‌گذارد. بنابراین، سیستم خاک‌ورزی مناسب می‌تواند از تخریب ساختار خاک اجتناب کند و در نهایت منجر به ایجاد عملکرد مطلوب شود (Aina 2011,). تالبرگ (Tullberg, 2010) در تحقیقی بیان کرد که خاکورزی حفاظتی علاوه‌بر صرفه‌جویی در انرژی، به زمان کمتری نیز برای انجام عملیات نیاز دارد و معمولاً در این سیستم، عملکرد محصول نیز کاهش معنی‌داری پیدا نمی‌کند. چراقی و پزشکپور (Cheraghi & Pezeshkpour, 2013) طی بررسی شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی و محلول‌پاشی نیتروژن بر عملکرد و صفات کمّی ماش (*Vigna radiata* L.)، به این نتیجه رسیدند که برتری عملکرد دانه و تعداد شاخه فرعی در بوته در روش بدون خاک‌ورزی نسبت به روش جوی پشته‌ای بود. در مجموع، روش کاشت بدون خاک‌ورزی همراه با کاه و کلش و محلول‌پاشی در مرحله رشد سریع مرحله گل‌دهی با تولید عملکرد دانه ۷۸۲ کیلوگرم در هکتار به‌عنوان ترکیب تیماری برتر در این تحقیق تعیین شد. چقازردی و همکاران (Chaghazardi et al., 2016a) نشان دادند که سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی کاهشی، بیشترین میزان صفات عملکرد، وزن هزار دانه و ارتفاع گندم را تولید می‌کنند. به‌طورکلی، بیشتر صفات مورد بررسی تحت تأثیر نوع خاک‌ورزی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و برتری‌های هر یک از سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی، می‌توان سامانه خاک‌ورزی کاهشی را به‌جای سامانه خاک‌ورزی متداول به کشاورزان مناطق دیم کرمانشاه پیشنهاد کرد.

خوان‌پایه و جلیلیان (KhanPayeh & Jalilian, 2013) با بررسی اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی و پیش‌تیمار بذر بر برخی خصوصیات ریخت‌شناسی و عملکرد نخود دیم، به این نتیجه رسیدند که تعداد برگ‌ها، تعداد شاخه‌های اصلی، ارتفاع گیاه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و تعداد گره تحت تأثیر معنی‌دار تیمارهای خاک‌ورزی و پیش تیمار قرار گرفتند. بیشترین و کمترین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب در سیستم شخم کاهش‌یافته و بدون خاک‌ورزی به دست آمد. به‌طورکلی تیمار شخم کاهش‌یافته بیشترین اثر مفید را بر صفات مورد بررسی داشت.

با توجه به اهمیت حفظ منابع تولید به‌ویژه خاک در طول مراحل تولید محصول و جلوگیری از فرسایش بی‌رویه آن و نظر به اهمیت موفقیت‌آمیز بودن به‌کارگیری سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی در زراعت دیم در جهان و دیگر مناطق ایران و نیز اثر تاریخ کاشت بر میزان عملکرد محصول نخود، در مطالعه حاضر به بررسی سه تاریخ کاشت بر رشد و عملکرد نخود زراعی رقم (عادل) در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی در شرایط آب‌وهوایی منطقه کرمانشاه پرداخته شد. با توجه به اینکه کرمانشاه قطب تولید نخود در کشور محسوب می‌شود و اقلیم کشور خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، لازم است که تحقیقات بیشتری در زمینه حفظ رطوبت خاک با روش‌هایی مانند خاکورزی حفاظتی روی نخود اجرا گردد. سؤال‌های تحقیق عبارت بودند از ۱- آیا تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد نخود دیم تأثیر خواهد داشت؟ ۲- آیا به کار بردن روش خاک‌ورزی حفاظتی و کشت مستقیم بر عملکرد نخود دیم پاییزه تأثیر مثبت خواهد داشت؟

یکی از اهداف این تحقیق، تعیین اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی و تاریخ کاشت بر عملکرد و صفات مرتبط با آن در کرمانشاه بود. هدف دیگر نیز تعیین بهترین تاریخ کاشت و روش خاک‌ورزی بود که بالاترین عملکرد دانه نخود را داشته باشد.

مواد و روش‌ها

زمان و مکان اجرای پژوهش

این آزمایش طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در مزرعه ارگانیک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه (مختصات دقیق محل آزمایش: طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی با آب‌وهوای معتدل و مدیترانه‌ای و ارتفاع ۱۲۳۴ متر از سطح دریا) اجرا شد. به‌منظور بررسی

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای این پژوهش، از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک، نمونه‌گیری به عمل آمد و جهت بررسی به آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی منتقل گردید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک این مزرعه در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌های هواشناسی ایستگاه مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی استان کرمانشاه طی ماه‌های مختلف سال ۱۴۰۰ به‌شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Physical and chemical properties of the experimental field soil

عمق Depth (cm)	بافت Texture	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	واکنش pH	کربن آلی Organic carbon (%)	فسفر Phosphorous (mg kg^{-1})	پتاسیم Potassium (mg kg^{-1})
0-30	سیلتی لومی رسی Silty clay loam	1.43	7.70	0.65	6.4	210

عمق Depth (cm)	نیتروژن N (%)	روی Zn (mg kg^{-1})	مس Cu (mg kg^{-1})	آهن Fe (mg kg^{-1})	منگنز Mn (mg kg^{-1})
0-30	0.065	0.3	1.52	9.9	8.76

جدول ۲- داده‌های هواشناسی ایستگاه مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی استان کرمانشاه طی سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱

Table 2- Meteorological data from the Agricultural Meteorology Research Center station in Kermanshah province during the year 2021-2022

شاخص اقلیمی Climatic parameter	مهر Oct.	آبان Nov.	آذر Dec.	دی Jan.	بهمن Feb.	اسفند Mar.	فروردین Apr.	اردیبهشت May.
دما Temperature (°C)	19.5	11.8	8.7	4	3.3	8.7	14.3	21.3
بارش Precipitation (mm)	0	42	34.2	28	28.7	60.9	3.8	8
تعداد روزهای بارانی Number of rainy days	0	4	6	11	11	11	6	6

شرح آزمایش و عملیات زراعی

این آزمایش به‌صورت طرح کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد و از رقم نخود اصلاح شده (عادل) برای این طرح استفاده گردید. سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی به‌عنوان کرت اصلی (شامل سه سطح: ۱- تیمار بی-خاک‌ورزی (T1)، ۲- خاک‌ورزی کاهشی (T2) و ۳- خاک‌ورزی متداول (T3)) و سه تاریخ کشت (شامل تاریخ کاشت اول ۱۴۰۰/۹/۲۷ (D1)، تاریخ کاشت دوم ۱۴۰۰/۱۰/۱۹ (D2) و تاریخ کاشت سوم ۱۴۰۰/۱۱/۵ (D3)) به‌عنوان کرت فرعی در نظر گرفته شد. خاک‌ورزی متداول با تاریخ کاشت بهمن ماه به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. در بی‌خاک ورزی فقط سوراخی در سطح خاک ایجاد شد تا بذر داخل سوراخ قرار گیرد. عملیات خاکورزی دیگری انجام نگردید. در خاکورزی کاهشی که از گاوآهن مرکب استفاده شد با خیش قلمی غیربرگردان، خاک را سست کرده و سپس بذر در خاک کشت گردید. در خاکورزی متداول بعد از شخم با گاوهن سه خیش برگردان‌دار، یک بار دیسک زده شد و سپس بذر در زمین کاشته شد. عملیات خاکورزی در تاریخ ۱۰ آبان ۱۴۰۰ انجام گردید. زمین طی سال قبل آیش گذاشته شد بود. طول هر کرت آزمایشی سه متر و عرض آن ۱/۸ متر بود. بذرهای نخود به‌صورت شش ردیف که فاصله بوته‌های روی ردیف ۸/۵ سانتی متر و فاصله بین ردیف‌ها ۳۰ سانتی-متر کشت شد. در این بررسی، تراکم بذر به‌صورت ۴۰ بوته در مترمربع بود و دو ردیف کناری برای رفع خطا در آزمایش به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و نمونه‌برداری از چهار ردیف باقی‌مانده انجام گرفت. عملیات حذف علف‌های هرز به‌صورت دستی انجام گردید و به‌منظور مبارزه با کرم پیله‌خوار از زنبور براکن (عامل کنترل بیولوژیک کرم پیله‌خوار نخود) استفاده شد.

ارزیابی صفات

شاخصه‌های مورد اندازه‌گیری در این بررسی شامل ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی در بوته، تعداد غلاف در شاخه اصلی و فرعی، تعداد دانه در غلاف، تعداد دانه در هر بوته و درصد پوشش سبز و عملکرد ماده خشک و دانه بود. تاریخ برداشت همه تیمارها ۳۱ خرداد ۱۴۰۱ بود. طول دوره رشد گیاه برای طولانی‌ترین تاریخ کاشت یعنی ۲۷ آذر ماه ۱۴۰۰ برابر ۱۸۶ روز بود. لازم به ذکر است که چون محل اجرای طرح در مزرعه ارگانیک واقع شده، هیچ‌گونه نهاده شیمیایی از طرف مجری طرح به مزرعه اضافه نگردید.

ارتفاع بوته: برای اندازه‌گیری این صفت، ۱۰ بوته از هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی و با رعایت اثر حاشیه انتخاب و متوسط ارتفاع آن‌ها از سطح زمین برحسب سانتی‌متر ثبت شد.

تعداد شاخه فرعی در بوته: متوسط تعداد شاخه فرعی ۱۰ بوته تصادفی از هر واحد آزمایشی یادداشت شد.

تعداد نیام در شاخه اصلی و فرعی: تعداد ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی از هر واحد آزمایشی انتخاب گردید و تعداد نیام در شاخه‌های اصلی و فرعی آن‌ها شمارش شد و سپس میانگین تعداد نیام در شاخه اصلی و فرعی در هر بوته مشخص گردید.

درصد پوشش سبز: جهت اندازه‌گیری پوشش سبز از چهارچوب ۰/۵×۰/۵ متری استفاده شد. چهارچوب با نخ‌کشی به ۱۰۰ خانه بخش بندی گردید و از هر کرت دو نقطه مشخص شد تا به‌صورت هر ۱۰ روز یک بار از آن نقاط مشخص، درصد پوشش سبز اندازه‌گیری شود. با پُر بودن هر خانه از پوشش گیاهی، یک درصد برای پوشش سبز در نظر گرفته شد.

تعداد دانه در نیام و تعداد دانه در بوته: در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، از هرکرت تعداد ۱۰ بوته انتخاب گردید، برای محاسبه دانه در نیام، تعداد کل دانه‌های ۱۰ بوته که در مرحله قبل به‌طور تصادفی انتخاب شده بودند، پس از شمارش و میانگین‌گیری به‌عنوان تعداد دانه در نیام در نظر گرفته شد. همچنین میانگین به‌دست‌آمده بر تعداد نیام‌ها تقسیم گردید و تعداد دانه در نیام محاسبه شد.

عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه: در پایان آزمایش، دو مترمربع از هر واحد آزمایشی با حذف اثر حاشیه برداشت شد. پس از خشک شدن، وزن بخش هوایی برای عملکرد بیولوژیک مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از محاسبه عملکرد بیولوژیک، محصول خرمن‌کوبی شده و عملکرد دانه محاسبه گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری برای صفات مورد بررسی با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.3 انجام شد. علاوه‌بر آن در صورت معنی‌دار بودن اثر عوامل آزمایشی و برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون دانکن سطح احتمال پنج درصد استفاده گردید. جهت ترسیم نمودارها از نرم-افزار Excel 2016 استفاده گردید.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). در بین اثرات متقابل تیمارها، بالاترین ارتفاع بوته مربوط به تاریخ کاشت آذر ماه و کم خاکورزی (۲۹/۲۴ سانتی‌متر) بود که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی و تاریخ کاشت بهمن ماه ۸۳ درصد افزایش داشت. کم‌ترین ارتفاع بوته نیز به تیمار بی‌خاکورزی و تاریخ کاشت بهمن ماه به‌مقدار ۱۶ سانتی‌متر اختصاص پیدا کرد (شکل ۱). به نظر می‌رسد که با تأخیر در تاریخ کاشت به‌دلیل کوتاه شدن طول دوره رشد نخود و کاهش رطوبت قابل دسترس گیاه، ارتفاع بوته افت کرد. محققان دیگری نیز کاهش ارتفاع بوته را در کشت دیرهنگام نخود گزارش کردند که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی داشت (Sekhar et al., 2015). در واقع، شرایط مساعد محیطی در تاریخ کاشت اول و طولانی‌تر بودن دوره رشد گیاه باعث استفاده بیشتر از منابع خاک و افزایش سرعت رشد ارتفاع گیاه شده است. همچنین پژوهشگران دیگری نیز بیان نمودند که کاشت زودهنگام نخود سبب طولانی شدن طول دوره رشد در این گیاه شده و در نتیجه سبب افزایش ارتفاع بوته نخود گردید (Rezvani Moghadam et al., 2009). در بررسی حاضر نیز افزایش میزان خاکورزی در خاکورزی مرسوم سبب کاهش رطوبت در دسترس گیاه می‌شود. در تیمار بی‌خاکورزی، به هم نخوردن خاک و وجود مقادیر بالای بقایای کشت پیشین بر سطح خاک مانع نفوذ صحیح آب به داخل بافت خاک می‌شود، امّا در خاکورزی کاهشی که یکی از سیستم‌های خاکورزی حفاظتی است مقداری از بقایای محصول بر سطح خاک باقی مانده (نه به‌اندازه بی‌خاکورزی) که علاوه‌بر حفظ رطوبت خاک به‌دلیل بالا نبودن حجم بقایا سبب نفوذ بهتر آب به لایه‌های زیرین شده و گیاه دچار تنش نمی‌شود (Issaka

et al., 2019). به‌علاوه محققان بسیاری اثر شخم کاهشی را بر ارتفاع بوته نخود گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی لازم را نشان داد (Javanmard et al., 2022; Armengot et al., 2016; Khanpaye & Jalilian, 2013). با استناد به موارد عنوان شده تیمار ترکیبی تاریخ کشت اول در این بررسی و کم‌خاکورزی، بهترین تیمار بوده که نتایج حاضر نیز مهر تأییدی بر این ادعاست.

تعداد شاخه فرعی در بوته

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر تعداد شاخه فرعی در بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها در ارتباط با این صفت نشان داد که بیشترین تعداد شاخه فرعی در بوته مربوط به تیمار خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت دی ماه (۱۰/۹۷ عدد) بود که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه ۱۵۵ درصد افزایش داشت. از طرفی، کمترین میانگین تعداد شاخه فرعی در بوته نیز به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن (۴/۳ عدد) اختصاص یافت (شکل ۱). در سیستم کم‌خاکورزی به‌سبب تراکم کم علف‌های هرز و تأخیر در تاریخ سبز شدن علف‌های هرز در اثر یک دوره حذف (وجین دستی)، گیاه زراعی (در این بررسی نخود) فرصت رشد و نمو شاخه‌های اصلی و فرعی را پیدا می‌کند (Sardar et al., 2015). نتایج این بررسی با تحقیقات هودیانی و همکاران (Hodiani et al., 2016) و جوانمرد و همکاران (Javanmard et al., 2022) هم‌خوانی لازم را نشان داد. از طرفی، محققان دیگری نیز دریافتند که تأخیر در کاشت نخود موجب خسارت به تعداد شاخه فرعی نخود در بوته می‌شود که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی داشت.

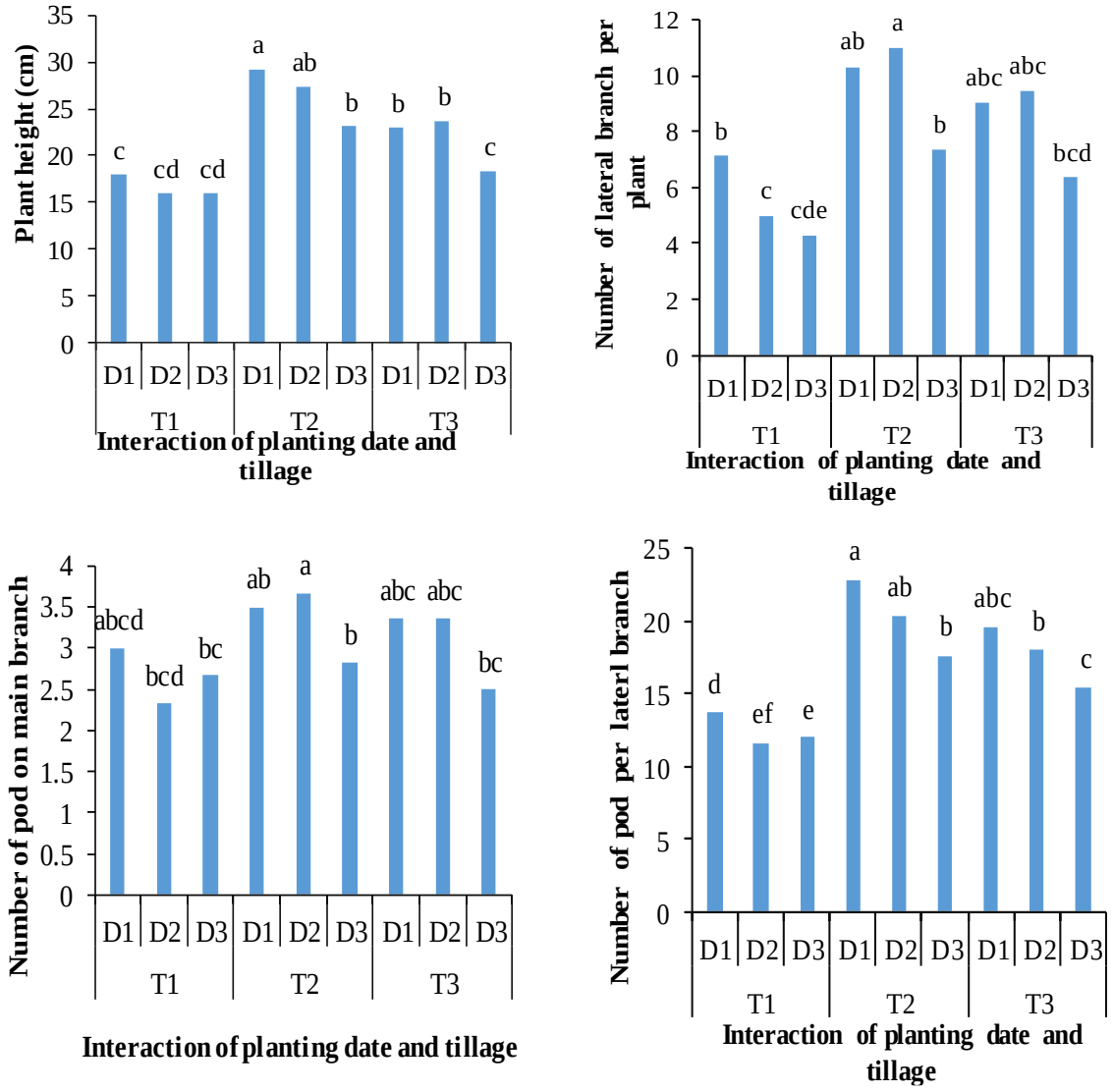
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تاریخ کاشت و سیستم‌های مختلف خاکورزی بر صفات مختلف نخود رقم عادل

Table 3- Analysis of variance for the effect of planting date and various tillage systems on different traits of Adel cultivar chickpea

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares								
		ارتفاع بوته Plant height	تعداد شاخه فرعی در بوته Number of lateral branches per plant	تعداد نیام در شاخه اصلی Number of pods on the main stem	تعداد نیام در شاخه فرعی Number of pods on lateral branches	درصد پوشش سبز Green cover percentage	تعداد دانه در نیام Number of seeds per pod	تعداد دانه در بوته Number of seeds per plant	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield
بلوک Block	2	15**	3.52*	0.98**	11.51**	4.7ns	0.04ns	7.41*	10000.93*	9735.7**
خاکورزی Tillage (T)	2	218.7**	37.8**	1.02**	143.44**	667.15**	1.15**	247.38**	721489.82**	204999.15**
اشتباه (a) Error (a)	4	4.18	1.57	0.25	3.46	1.04	0.037	2.56	25895.37	669.04
تاریخ کاشت Planting date (D)	2	44.43**	23.05**	0.94**	30.39**	25.15**	0.04ns	85.34**	59739.82**	8568.037**
T × D	4	6.82*	2.5*	0.37*	3.2*	13.64*	0.203ns	5.28*	10875.93*	2074.04*
اشتباه (b) Error (b)	12	1.29	0.65	0.08	0.85	3.48	0.148	1.11	2761.11	408.26
ضریب تغییرات C.V. (%)	–	5.24	10.32	9.27	5.49	3.7	29.56	5.52	2.62	2.43

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

ns, * and **: non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively..



شکل ۱- نمودار اثر متقابل تیمارهای تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی در بوته، تعداد نیام در شاخه اصلی و تعداد نیام در شاخه فرعی

Fig. 1- Interaction effects of planting date and tillage method treatments on plant height, number of lateral branches per plant, number of pods on the main stem, and number of pods on lateral branches

T_1:بی‌خاکورزی، T_2: کم‌خاکورزی، T_3: خاکورزی مرسوم، D_1: آذرماه، D_2: دی ماه و D_3: بهمن ماه.

میانگین‌های دارای حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری براساس آزمون دانکن ندارند.

T1: no-tillage, T2: reduced tillage, T3: conventional tillage; D1: December, D2: Januery, and D3: Februery

Means followed by the same letter do not differ significantly at the 5% probability level according to the Duncan test

تعداد نیام در شاخه اصلی و شاخه فرعی

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر تعداد نیام در شاخه اصلی و شاخه فرعی معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تیمار خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت دی ماه، بیشترین تعداد نیام در شاخه اصلی (۳/۶۷ عدد) را داشت که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی با

تاریخ کاشت دی ماه ۵۷ درصد افزایش داشت. همچنین کمترین تعداد نیام در شاخه اصلی نیز به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت دی ماه (۲/۳۳ عدد) اختصاص داشت (شکل ۱). بیشترین تعداد نیام در شاخه فرعی در تیمار خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت آذر ماه (۲۲/۸۳ عدد) مشاهده شد که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه ۹۶ درصد افزایش داشت. کمترین تعداد نیام در شاخه فرعی نیز مربوط به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه (۱۱/۶۷ عدد) بود (شکل ۱). به نظر می‌رسدکه تأخیر در کاشت نخود به‌علت کاهش طول دوره رویشی گیاه و هم‌زمانی مراحل نموی حساس با تنش‌های حرارتی و خشکی و کاهش دوام سطح برگ و فتوسنتز منجر به کاهش تعداد گل‌ها و ریزش بیشتر آن‌ها شد که در نهایت کاهش توان گیاه در تولید غلاف را در پی داشت (Mondani & Jalilian, 2019). محققان دیگری نیز این ادعا را که تعداد غلاف در ساقه متأثر از تاریخ کشت است را بیان کردند، به‌طوری که کاشت دیرهنگام سبب کاهش مقادیر این صفت می‌گردد (Mondani & Jalilian, 2019; Sekhar et al., 2015). بررسی محققان نشان داد که در سیستم کم‌خاکورزی، اجزای عملکرد مانند تعداد غلاف در بوته به بالاترین مقدار خود در قیاس با سیستم خاکورزی مرسوم و بی‌خاکورزی رسید (Javanmard et al., 2022; Kiani et al., 2017). یافته‌های این محققان با نتایج بررسی حاضر همخوانی لازم را نشان داد.

درصد پوشش سبز

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر درصد پوشش سبز معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین میانگین درصد پوشش سبز به تیمار خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت آذر ماه با مقدار ۶۳ درصد اختصاص داشت که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت دی ماه ۱۹ درصد افزایش داشت. از طرفی، کم‌ترین مقادیر این صفت نیز در تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت دی ماه (۴۳/۶۷ درصد) مشاهده شد (شکل ۲). درصد پوشش سبز، معیاری از سطح سبز گیاه می‌باشد و این شاخص، شاخص رشدی مناسبی برای اندازه‌گیری عملکرد گیاه زراعی (در این بررسی نخود) است (Ghassemi-Golezani et al., 2008). با تولید ارقام مقاوم نخود به سرما، کاشت این گیاه در اواخر فصل پاییز در تعدادی از مناطق به‌صورت انتظاری انجام می‌شود. بنابراین کاشت این گیاه در فصل پاییز به افزایش طول دوره رشد و عملکرد گیاه منجر می‌گردد. پاسخ ارقام مختلف نخود به تاریخ‌های مختلف کاشت متفاوت می‌باشد. در کشت پاییزه، فراهم بودن آب کافی، پوشش سبز، دوام سطح برگ و افزایش طول دوره رشد گیاه نخود به افزایش تعداد نیام در بوته، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و در نهایت محصول دانه در واحد سطح منجر می‌گردد (Sadeghipour & Aghaei, 2011). در واقع، در ترکیب تیماری کم‌خاکورزی همراه با طول دوره رشدی بیشتر به‌دلیل آنکه گیاه مدت زمان بیشتری را در معرض رطوبت (نگه‌داشته شده در تیمار کم‌خاکورزی) و مواد غذایی خاک قرار می‌گیرد، به‌تبع این تیمار ترکیبی پوشش سبز بیشتری خواهد داشت.

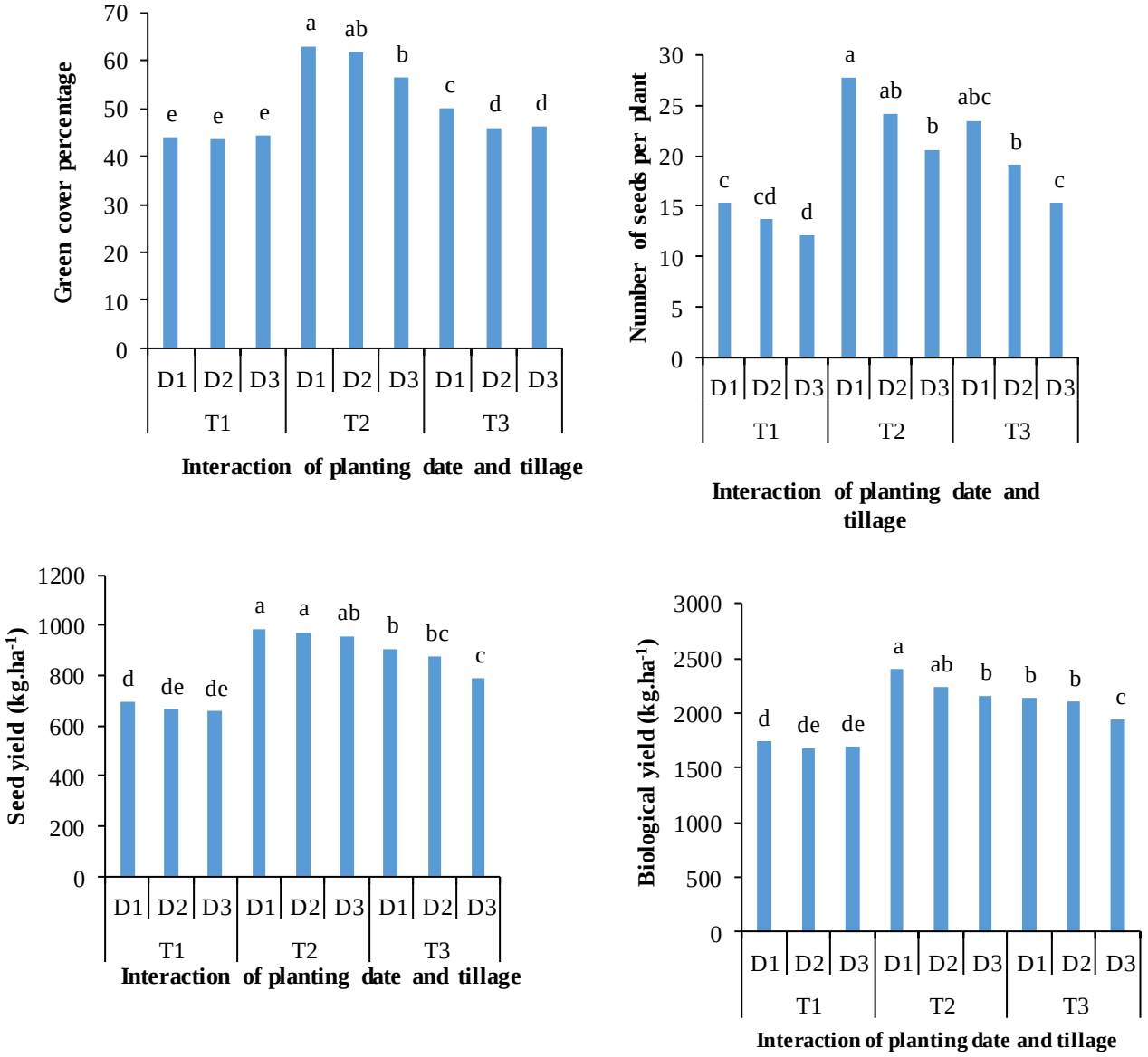
تعداد دانه در نیام

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده نوع خاکورزی بر تعداد دانه در نیام معنی‌دار بود (جدول ۳). با استناد به نمودار مقایسه میانگین اثر ساده تیمارهای مختلف خاکورزی بر تعداد دانه در نیام، بیشترین تعداد دانه در نیام مربوط به اثر تیمار کم‌خاکورزی (۱/۶۷ عدد) بود که نسبت به تیمار خاکورزی مرسوم ۶۷ درصد افزایش داشت و کم‌ترین مقدار این صفت، در تیمار خاکورزی مرسوم (یک عدد) مشاهده گردید (شکل ۳). با توجه به اینکه تعداد دانه در نیام به نظر اکثر محققان تحت تأثیر عوامل وراثتی قرار دارد و با ثبات‌ترین جزء عملکرد در حبوبات می‌باشد، زیرا تعداد سلول‌های تخم در همه تخمدان‌ها برابر است (Mohammadi et al., 2009). بررسی تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر عملکرد برخی از ارقام پاییزه نخود (رقم هاشم و آرمان) نشان داد که عملکرد دانه، بیولوژیک و اجزای عملکردی (مانند تعداد دانه در نیام، تعداد نیام در بوته و وزن هزار دانه) در خاک‌ورزی حداقل در بالاترین مقدار خود نسبت به خاکورزی مرسوم و بی‌خاکورزی قرار گرفت (Kiani et al., 2017) که با یافته‌های بررسی حاضر همسو بود.

تعداد دانه در بوته

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر تعداد دانه در بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین میانگین تعداد دانه در بوته در تیمار خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت آذر ماه (۲۷/۷۷ عدد) مشاهده شد که نسبت به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه ۱۲۸ درصد افزایش داشت. از طرفی، کم‌ترین

تعداد دانه در بوته نیز مربوط به تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه (۱۲/۱۷ عدد) بود (شکل ۲). بررسی برخی از پژوهشگران نشان داد که کم‌خاکورزی به‌دلیل افزایش رطوبت خاک و بهبود خواص فیزیکی خاک سبب افزایش وزن هزار دانه و افزایش تعداد دانه در سنبله شد (Mohammadi et al., 2009).



شکل ۲- نمودار اثر متقابل تیمارهای تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر درصد پوشش سبز، تعداد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه نخود

Fig. 2- Interaction effects of planting date and tillage method treatments on green cover percentage, number of seeds per plant, biological yield, and grain yield in chickpea

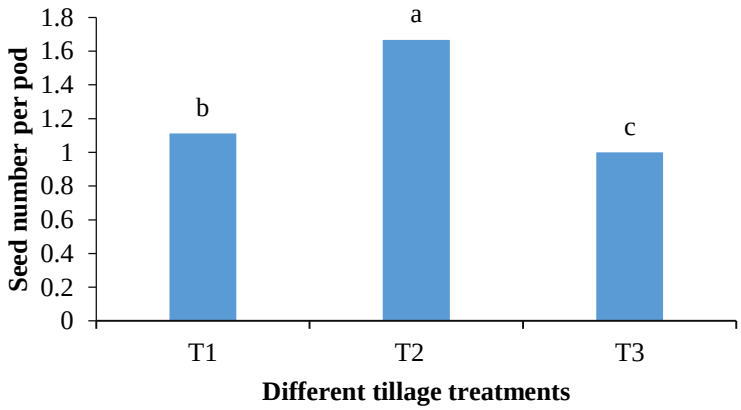
T_1: بی‌خاکورزی، T_2: کم‌خاکورزی، T_3: خاکورزی مرسوم، D_1: آذرماه، D_2: دی ماه و D_3: بهمن ماه

میانگین‌های دارای حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری براساس آزمون دانکن ندارند.

T1: No-tillage, T2: Reduced tillage, T3: Conventional tillage; D1: December, D2: Januery, and D3: Februery

Means followed by the same letter do not differ significantly at the 5% probability level according to the Duncan test

در واقع در کم‌خاکورزی، عملکرد و صفات عملکردی می‌توانند برابر یا حتی بهتر از خاکورزی متداول باشد (Schillinger et al., 2010). همچنین در ارتباط با تیمارهای تاریخ کاشت در این بررسی، نتایج مشابهی در یافته‌های محققان دیگر مشاهده شد. به‌عنوان مثال، بسیاری از محققان نشان دادند که اثر تاریخ کاشت بر تعداد دانه در بوته و سایر اجزای عملکردی معنی‌دار است، به‌طورکلی کاشت دیرهنگام سبب کاهش عملکرد دانه می‌شود. در واقع، کشت زودهنگام به‌دلیل بالا بودن بهره‌وری گیاه از ذخیره آب و همچنین احتمال ضعیف مواجه شدن گیاه با تنش خشکی و حرارتی در طول فصل رشد، می‌تواند منجر به افزایش تعداد دانه در گیاه شود (Mondani & Jalilian, 2019; Bazvand et al., 2015). نتایج بررسی حاضر در ارتباط با تعداد دانه در بوته همسو با یافته‌های فوق‌الذکر بود. در بررسی حاضر، ترکیب تیماری کشت زودهنگام و کم‌خاکورزی بالاترین تعداد دانه در بوته را داشت که نشان داد ترکیب این دو تیمار مقادیر بالاتری از صفت مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۳- اثر ساده تیمارهای مختلف خاکورزی بر تعداد دانه در نیام

Fig. 3- The simple effect of different tillage treatments on the number of seeds per pod

T_1: بی‌خاکورزی، T_2: کم‌خاکورزی، T_3: خاکورزی مرسوم

میانگین‌های دارای حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری براساس آزمون دانکن ندارند.

T1: No-tillage, T2: Reduced tillage, T3: Conventional tillage

Means followed by the same letter do not differ significantly at the 5% probability level according to the Duncan test

عملکرد بیولوژیک

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود (جدول ۳). بهترین ترکیب تیماری از نظر عملکرد بیولوژیک مربوط به خاکورزی کاهشی با تاریخ کاشت آذر ماه (۲۴۰۰ کیلوگرم در هکتار) بود که نسبت به تیمار بی-خاکورزی با تاریخ کاشت دی ماه ۴۳ درصد افزایش داشت و امّا بدترین ترکیب تیماری برای عملکرد بیولوژیک مربوط به تیمار بی-خاکورزی با تاریخ کاشت دی ماه (۱۶۸۰ کیلوگرم در هکتار) بود (شکل ۲). بررسی‌های متعددی در ارتباط با کاشت نخود دیم تحت سطوح تیماری خاکورزی (بی‌خاکورزی، کم‌خاکورزی و خاکورزی متداول) نشان دادند که بی‌خاکورزی به‌تنهایی سبب کاهش کلی عملکرد و کم‌خاکورزی یا خاکورزی حفاظتی سبب بالا رفتن عملکرد شده است. در واقع، افزایش عملکرد در شرایط دیم و اقلیم‌های خشک بیشتر ناشی از افزایش ذخیره رطوبتی خاک در سیستم‌های حفاظتی می‌باشد (Page et al., 2019). در بررسی‌های خوان‌پایه و جلیلیان (KhanPayeh & Jalilian, 2013)، بیشترین عملکرد بیولوژیک نخود دیم سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی حاصل تیمار شخم کاهش‌یافته و کم‌ترین مقدار از تیمار بدون شخم و شخم مرسوم به دست آمد. رطوبت قابل دسترس بالاتر در خاک سبب افزایش رشد گیاه شده و در نتیجه افزایش عملکرد بیولوژیک را به دنبال دارد.

یافته‌های این پژوهشگران با نتایج حاصل از بررسی حاضر هم‌خوانی لازم را نشان داد. سیدی و همکاران (Seyyedi et al., 2018) در ارزیابی عملکرد نخود در کشت زودهنگام نشان دادند که کشت زودهنگام نخود در پاییز نسبت به تاریخ کشت آخر که فروردین بود ، بیشترین میزان عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه را داشت. در مجموع یافته‌ها نشان دادند که کشت زودهنگام از سودمندی بالایی در خصوصیات رشدی و عملکردی نخود برخوردار است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی داشت.

عملکرد دانه

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تاریخ کاشت و نوع خاکورزی بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). بالاترین مقادیر عملکرد دانه در تیمار خاک‌ورزی کاهشی با تاریخ کاشت آذر ماه (۹۸۴/۶۷ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد که نسبت به تیمار بی-خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن ماه ۵۰ درصد افزایش داشت. کم‌ترین عملکرد دانه در تیمار بی‌خاکورزی با تاریخ کاشت بهمن به‌مقدار ۶۵۶/۶۷ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد (شکل ۲). عملکرد و فرآیندهای تشکیل نخود به ژنتیک، محیط و عوامل زراعی و تداخل بین آن‌ها بستگی دارد (Shah et al., 2020). ازآنجاکه رقم عادل یکی از ارقام دیم پُرمحصول می‌باشد، لذا در شرایط محیطی مناسب این تداخل ژنوتیپ در محیط (در این بررسی تاریخ کاشت و عملیات خاکورزی مناسب) یکی از عللی است که سبب افزایش قابل توجه در عملکرد خواهد شد. کما اینکه نتایج این پژوهش دلیلی ابر این ادعا است. تاریخ کاشت یکی از عوامل مهم مدیریتی مؤثر بر اجزای عملکرد و عملکرد نخود می‌باشد. کاشت در تاریخ‌های مختلف سبب برخورد مراحل رویشی و زایشی گیاه با درجه حرارت، تابش خورشید و طول روز متفاوت می‌شود. در کاشت زودهنگام، گیاه به‌سبب داشتن اندام‌های رویشی بزرگ‌تر، می‌تواند مقصد زایشی بزرگ‌تری را تغذیه کرده و به‌میزان کافی ماده خشک به آن اختصاص دهد و در نتیجه عملکرد گیاه افزایش می‌یابد. در مناطق دیم و به‌خصوص در نیمه غربی ایران، نخود عمدتاً در بهار کشت می‌گردد، ولی تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که کاشت پاییزه یا زمستانه آن موفقیت‌آمیز است، زیرا با این کار به‌نحو مؤثری از نزولات آسمانی استفاده نموده و عملکرد افزایش می‌یابد (Mohammadi et al., 2017). زمان کاشت بر استقرار گیاه زراعی، توانایی رقابت‌کنندگی و عملکرد آن تأثیرگذار است (Holding & Bowcher, 2014). تاریخ کشت نخود در مناطقی که در معرض خشکی انتهایی فصل رشد قرار دارند، تأثیر قابل توجهی دارد، زیرا بر شرایط و دوره رشد گیاه تأثیر می‌گذارد (Fang et al., 2016). یکی از علل کاهش عملکرد گیاه در تیمارهای بی‌خاکورزی را می‌توان به وجود حجم بالای علف هرز که مانع از رسیدن منابع رشدی مانند نور، مواد غذایی و رطوبت به گیاه اصلی می‌شود، دانست (Kiani et al., 2017; Khanpaye & Jalilian, 2013). بررسی‌های دیگری در محصول پنبه (*Gossypium herbaceum* L.) نشان داد که عملکرد و اجزای عملکردی در سیستم خاکورزی حفاظتی از مقادیر بالاتری نسبت به خاکورزی مرسوم برخوردار بودند (Ghaderi-Far et al., 2011). پژوهش دیگری در ارتباط با نخود دیم افزایش نُه و چهار درصدی عملکرد دانه را در استفاده از خاکورزی کاهشی به‌جای خاکورزی مرسوم نشان داد (Chaghazardi et al., 2016b). نتایج بررسی‌های دیگری در ارتباط با تأثیر سامانه‌های مختلف خاکورزی بر نخود نشان داد که کاهش شدت خاکورزی، عملکرد دانه و بیولوژیک را با یک اثر صعودی افزایش داد (Garshasbi Tahneh, 2018; Javanmard et al., 2022).

شاخص عملکرد دانه تابع اجزای عملکردی است. در بررسی حاضر در بین تاریخ‌های کشت، کشت زودهنگام و در سیستم‌های خاکورزی، کم‌خاکورزی سبب افزایش اجزای عملکردی و به‌تبع آن سبب افزایش عملکرد دانه و بیولوژیک شد. حال در تیمار ترکیبی کم‌خاکورزی همراه با تاریخ کشت زودهنگام، این اثر افزایشی به وضوح مشهود بود. لذا با استناد به داده‌های هواشناسی اعم از میزان بارندگی و تعداد روزهای بارانی (جدول ۲)، اولین تاریخ کشت در پاییز در این بررسی، بیشترین مقدار تجمعی از باران را دریافت نموده و اینکه کاهش شدت خاکورزی سبب نگه‌داری حجم بالایی از آب در خاک گردید که نتایج حاضر دور از انتظار نبوده است و کاملاً با پژوهش‌های مشابه پیشین در این خصوص هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری

با استناد به یافته‌های حاضر می‌توان گفت که بهترین ترکیب تیماری جهت حصول بالاترین عملکرد دانه نخود مربوط به تاریخ کشت اول (آذر) با سیستم کم‌خاکورزی بود. در این تاریخ کشت، گیاه نخود مدت زمان بیشتر و از طرفی تعداد روزهای طولانی‌تری را جهت رشد در اختیار داشته است و همچنین از نزولات بیشتری در این محدود زمانی استفاده کرده است. قطعاً در تاریخ کاشت آذر ماه همراه

با تیمار کم‌خاکورزی، پوشش سبز بیشتری تولید می‌شود، پوشش سبز بیشتر مساوی با بیشتر شدن مقادیر اجزای عملکردی و عملکرد است و نتایج حاصل از این پژوهش تأییدی بر این مدعا است. با استناد به داده‌های هواشناسی اعم از میزان بارندگی و تعداد روزهای بارانی، تاریخ کشت زودتر در پاییز در این بررسی، بیشترین مقدار تجمعی از باران را دریافت نموده و اینکه کاهش شدت خاکورزی احتمالاً سبب نگه‌داری حجم بالایی از آب در خاک گردید که نتایج حاضر دور از انتظار نبوده است. مقایسه تاریخ‌های کشت بهاره با پاییزه نخود در شرایط خاکورزی حفاظتی می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی باشد.

References

1. Aina, P. O. (2011). Conservation tillage for sustainable agricultural productivity. Book of Proceedings of the 2011 International Soil Tillage. Research Organization (ISTRO)–Nigeria Symposium, pp. 30–34.
2. Armengot, L., Blanco-Moreno, J. M., Bàrberi, P., Bocci, G., Carlesi, S., Aendekerk, R., Berner, A., Celette, F., Grosse, M., Huiting, H., Kranzler, A., Luik, A., Mäder, P., Peigné, J., Stoll, A., Delfosse, P., Sukkel, W., Surböck, A., Westaway, S., & Sans, F. X. (2016). Tillage as a driver of change in weed communities: A functional perspective. *Agriculture, Ecosystems & Environment 222*, 276-285. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.021
3. Bayat, R. , Sabaghpour, S. H. , Hatami, A., & Mehrabi, A. A. (2012). Study on effect of sowing date and plant density on grain yield and yield components of improved chickpea (*Cicer arietinum* L.) Kabuli type var. Arman. *Iranian Journal Pulses Research, 3*(2), 65-72. (In Persian). https://doi.org/10.22067/ijpr.v1391i2.24700
4. Bazvand, F., Pezeshkpour, P., & Mirzaie, A. (2015). Chickpea (*Cicer arietinum* e L.) yield and yield components as affected by sowing date and genotype under rainfed conditions. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, *4*(11), 59-65.
5. Chaghazardi, H. R., Jahansouz, M. R., Ahmadi, A., & Gorji, M. (2016a). Effects of tillage management on productivity of wheat and chickpea under cold, rainfed conditions in western Iran. *Soil and Tillage Research, 162*, 26-33. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.010
6. Chaghazardi, H. R., Jahnsuz, M. R., Ahmadi A., & Gorji, M. (2016b). Effects of different tillage methods on bread wheat and chickpea yield, yield components and soil physical properties under rainfed conditions in Kermanshah. *Iranian Journal of Filed Crop Science*, *46*(4), 687-698. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2015.56816
7. Cheraghi, S., & Pezeshkpour, P. (2013). Effect of different tillage methods and nitrogen foliar application on yield and quantitative traits of mung bean. *Journal of Crop Physiology*, *5*(19), 85–97. (In Persian). https://www.sid.ir/fa/JOURNAL/SearchPaper.aspx?journal=&subject=&writer=157280&year=&PDF=Y&Filter=
8. Fang, X. W., Turner, N. C., Li, F. M., & Siddique, K. H. M. (2016). An early transient water deficit reduces flower number and pod production but increases seed size in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Crop and Pasture Science* 6(2), 481-487. https://doi.org/10.1071/CP10349
9. FAO (Food and Agricultural Organization). (2023). Pulses are praised for their health, environmental and economic benefits.
10. Farnia, A., & Moradi, S. (2015). Evaluation of the response of rainfed chickpea cultivars to planting date in Kermanshah conditions. *Journal of Applied Research on Plant Ecophysiology*, *2*(1), 47-64. (In Persian). http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-179-fa.html
11. Fathi, E., Tahmasebi, I., & Teimoori, N. (2016). Effect of sowing date and weed interference on chickpea seed quantitative and traits in genotypes under dryland conditions. *Iranian Dryland Agronomy Journal, 5*(2), 135-155. (In Persian). https://doi.org/10.22092/idaj.2016.109662
12. Garshasbi Tahneh, M. (2018). Effects of different tillage systems and application of plant residues on growth and yield indices of chickpea (*Cicer arietinum* L.). M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. (In Persian)
13. Gaur, P. M., Tripathi, S., Gowda, C. L. L., Ranga, R. G. V., Sharma, H. C., Pande, S., & Sharma, M. (2010). Chickpea seed production manual. Patancheru 502324, Andhra Pradesh, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. 28 pp.
14. Ghaderi-Far, F., Ghajari, A., Sadegh-Nejad, H., & Gharanjiki, A. (2011). Effects of tillage systems on yield of cotton following canola in Gorgan. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *9*(3), 416-421. (In Persian)
15. Ghassemi-Golezani, K., Andalibi, B., Zehtab-Salmasi, S., & Saba, J. (2008). Effect of water stress during vegetative and reproductive stages on seed yield and essential oil content of dill (*Anethum graveolens* L.). *Jouirnal*

of Food Agriculture and Environment, 6, 282-284.
16. Hamzei, J., & Seyyedi, M. (2012). Response of three chickpea cultivars to different sowing dates under rainfed conditions in the Hamedan region. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production (Special Issue), 4*(22), 83–94. (In Persian). https://journals.tabrizu.ac.ir/article_1279.html?lang=en
17. Hodiani, M. A., Dahmardeh, M., Khammari, I., & Asgharipour, M. R. (2016). Evaluation of tillage systems on agronomical aspects in roselle-green gram intercropping using replacement method. *Iranian Journal of Filed Crop Science, 47*(2), 265-277. (In Persian)
18. Holding, D., & Bowcher, A. (2014). Weeds in Winter Pulses –Integrated solutions. CRC for AustralianWeed Management Technical Series 9.
19. Issaka, F., Zhang, Z., Zhao, Z. Q., Asenso, E., Li, J. H., Li, Y. T., & Wang, J. J. (2019). Sustainable conservation tillage improves soil nutrients and reduces nitrogen and phosphorous losses in maize Farmland in Southern China. *Sustainability, 11*(8), 1-13. https://doi.org/10.3390/su11082397
20. Javanmard, A., Nouri, M., Ostadi, A., Rebati, J., Nouraein, M., & Shabahang J. (2022). The effects of different tillage systems and fertilizer resources on the growth, yield component, and economic efficiency of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under rainfed condition. *Journal of Agroecology, 14*(2), 251-274.
21. KhanPayeh, A., & Jalilian, J. (2013). Effect of different tillage systems and seed priming on some morphological characteristics and yield of dryland chickpea. *Journal of Research in Crop Plants, 1*(2), 33-43. (In Persian). https://journal.urmia.ac.ir/article_20009.html?lang=en
22. Kiani, M. , Jahansouz, M. R., & Ahmadi, A. (2017). The effect of different tillage methods on yield and growth characteristics of some autumnal chickpea. *Journal of Crops Improvement, 18*(4), 977-985. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jci.2017.56547
23. Ministry of Jihad-Agriculture (2025). Statistics of chickpea production. https://www.mehrnews.com/news/6590351/ Accessed 8/14/2026.
24. Mishra, J. S., Singh, V. P., & Bhman, V. M. (2016). Response of lentil to date of sowing and weed controlin Jabalpur, India. *Lens Newsletter, 23*(1), 18-23.
25. Mohammadi, G. R, Javanshir, A., Rahimzadeh-Khoie, F., Mohammadi, S. A., & Zehtab-Salmasi, S. (2017). The effect of weeds interference on shoot and root growth and harvest index in chickpea. *Iranian Journal of Crop Sciences, 6*(3), 92-114. (In Persian). http://agrobreedjournal.ir/article-1-343-fa.html
26. Mohammadi, K., Nabi Allahi, K., Agha Alikhani, M., & Khoormali, F. (2009). Study on the effect of different tillage methods on the soil physical properties, yield and yield components of rainfed wheat. *Journal of Plant Production, 16*(4), 77-91. (In Persian)
27. Mondani, F., & Jalilian, A. (2019). Evaluation of the interaction between sowing date and cultivar on different traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Kermanshah climate conditions. *Plant Production Technology, 19*(1), 37-51.
28. Naseri, R., Siyadat, A., Soleymani Fard, A., Soleymani, R., & Khosh Khabar, H. (2012). Effects of planting date and density on yield, yield components and protein content of three chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under rainfed conditions in Ilam province. *Iranian Journal of Pulses Research, 2*(2), 7-18. (In Persian). https://doi.org/10.22067/ijpr.v2i2.19018
29. Page, K. L., Dang, Y. P., & Dalal, R. C. (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. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031
30. Rezvani Moghaddam, P., & Sadeghi Samarjan, R. (2009). Effect of sowing dates and different irrigation regimes on morphological characteristics and grain yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) (*Cultivar* 3279 ILC). *Iran Agricultural Research Journal, 6*(2), 315-325. (In Persian)
31. Sadeghipour, O., & Aghaei, P. (2011). Effect of different sowing dates on chlorophyll content, intercepted radiation and leaf area index of chickpea genotypes. *Journal of Crop Production Research (Environmental Stresses in Plant Sciences), 3*(1), 25-38. (In Persian). https://sid.ir/paper/182245/en
32. Sadeghipour, O., & Aghaei, P. (2012). Comparison of autumn and spring sowing on performance of chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties. *International Journal of Biosciences, 2*(6), 49-58.
33. Sardar, M., Behdani, M. A., Eslami, S. V., & Mahmoodi, S. (2015). The effect of different soil disturbance methods and weeds control on cotton (*Gossypium hirsutum*) yield after wheat. *Iranian Journal of Field Crops*

Research, *12*(4), 784-792. (In Persian)

34. Schillinger, W. F., Young, D. L., Kennedy, A. C., & Paulitz, T. C. (2010). Diverse no-till irrigated crop rotations instead of burning & plowing continuous wheat. *Field Crops Research*, *115*(1), 39-49. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.001
35. Sekhar, D., Pradepp Kumar, P. B., & Rao, T. (2015). Performance of chickpea varieties under different dates of sowing in high altitude zone of andhra Pradesh, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *4*(8), 329-332.
36. Seyyedi, S. M., Azadbakht, A., & Fesahat, A. (2018). Evaluation of growth characteristics, yield, and yield components of three chickpea cultivars under winter-sown and spring cultivation. *Journal of Crop Production and Plant Breeding*, *14*(1), 73-86. (In Persian). https://sanad.iau.ir/
37. Shah, S. M. S., Ullah, F., & Munir, I. (2020). Biochemical characterization for determination of genetic distances among different indigenous chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties of North-West Pakistan. *Brazilian Journal of Biology*, *2*(5), 33-51. https://doi.org/10.1590/1519-6984.232747
38. Sharma, P., Abrol, V., & Sharma, R. K. (2011). Impact of tillage and mulch management on economics, energy requirement and crop performance in maize–wheat rotation in rainfed subhumid inceptisols. *India.European Journal of Agronomy*, *34*(1), 46-51. https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.10.003
39. Tullberg, J. (2010). Tillage, traffic and sustainability a challenge for ISTRO. *Soil and Tillage Research*, *111*(1), 26-32. https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.008

Contents

Maintaining Yield and Improving Water Use Efficiency of Soybean (*Glycine max*) with Wheat *Triticum* spp.) Straw Mulch: An Assessment Based on Field Experiment and Modeling 165
Effat Paravar, Afshin Soltani, Seyed Reza Amiri, Ebrahim Zeinali and Farshid Ghaderi Far

Improving Quantitative and Qualitative Seed Yield of Camelina (Camelina sativa L.) through the Integrated Application of Chemical Fertilizers, Biofertilizers, and Nano-Chitosan under Rainfed and Supplementary Irrigation Conditions 183
Abdollah Javanmard, Mohammad Haghaninia and Haniyeh Shabkhiz

Physiological and Yield Responses of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Thermal Stress in a Sequential Cropping System (Summer-Winter) in the Shavor Region, Khuzestan 213
Mohammad Ali Molaee, Seyed Keyvan Marashi, Abdolali Gilani, Shahram Lak and Mojtaba Alavi Fazel

Agronomical, Ecological and Economical Evaluation of Barley (*Hordeum vulgare* L.) and Vetch (*Vicia panonica*) Intercropping in Rotation with Rice (*Oryza sativa* L.) in Paddy Fields 229
Mohammad Rabiee and Sajjad Shaker Kouhi

Evaluation of yield and yield stability of evolutionary populations and dynamic mixtures of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) in Iran 247
Maedeh Salimi, Alireza Koocheki, Mehdi Nassiri Mahallati, Sayyed Alireza Beheshti, Stefania Grando and Salvatore Ceccarelli

The Effect of Planting Date on the Growth and Yield of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Different Tillage Systems 271
Shahram Choobtashani, Hassan Heidari and Mohammadeghbal Ghobadi

Journal of Agroecology (Quarterly)

Vol. 18 No.2 2026

Published by: Ferdowsi University of Mashhad

Editor in charge: Prof. Behnam Kamkar

Editor in chief: Prof. Parviz Rezvani Moghaddam

Internal manager: Dr. Surur Khorramdel

Editorial Board:

Dr. Amir Bezad Bazrgar, Post Doctorate Fellow, University of Guelph, Canada
Prof. Morteza Barmaki, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili
Prof. Mohammad Pessarakli, Research Professor, School of Plant Sciences, the University of Arizona
Prof. Hemmatolla Pirdashti, Genetic & Agricultural Biotechnologhy Institute of Tabarestan
Dr. Amir Hajjarpoor, Research scientist, Julius Kühn-Institut, Germany
Dr. Surur Khorramdel, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
Prof. Adel Dabagh Mohammadi Nasab, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
Prof. Mehdi Rastgoo, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
Prof. Parviz Rezvani Moghaddam, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
Prof. Ahmad Zare Feizabadi, Agricultural Research Institute of Khorasan Razavi
Prof. Saeed Zehtab Salmasi, New Mexico State University,USA
Dr. Hamid Shahandeh Research Soil Scientist, Soil and Crop Sciences Department, Texas A & M University
Dr. Omid Abdi, Department of Forest Sciences, University of Helsinki finland
Prof. Farshid Ghaderifar, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources
Prof. Mansour Ghorbanpour, Faculty of Agriculture, University of Arak
Prof. Behnam Kamkar, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
Prof. Mohamma Reza Moradi Telavat, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Khuzestan
Dr. Ahmad Mosaddegh Manschadi, Associate Professor, Institute of Agronomy, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna
Prof. Mehdi Nassiri Mahallati, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad Press
Address: Journal of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad,
P.O. Box: 91775-1163, Mashhad, Iran
Tel: +98-51– 38804654
Fax: +98–51–38787430
Email: agroecology@um.ac.ir
Web site: http://agry.um.ac.ir

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Agroecology (Quarterly)

Vol. 18 No. 2

Summer 2026

ISSN: 2008-7713

Contents

Maintaining Yield and Improving Water Use Efficiency of Soybean (*Glycine max*) with Wheat *Triticum* spp.) Straw Mulch: An Assessment Based on Field Experiment and Modeling 165
Effat Paravar, Afshin Soltani, Seyed Reza Amiri, Ebrahim Zeinali and Farshid Ghaderi Far

Improving Quantitative and Qualitative Seed Yield of Camelina (Camelina sativa L.) through the Integrated Application of Chemical Fertilizers, Biofertilizers, and Nano-Chitosan under Rainfed and Supplementary Irrigation Conditions 183
Abdollah Javanmard, Mohammad Haghaninia and Haniyeh Shabkhiz

Physiological and Yield Responses of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Thermal Stress in a Sequential Cropping System (Summer-Winter) in the Shavor Region, Khuzestan 213
Mohammad Ali Molaee, Seyed Keyvan Marashi, Abdolali Gilani, Shahram Lak and Mojtaba Alavi Fazel

Agronomical, Ecological and Economical Evaluation of Barley (*Hordeum vulgare* L.) and Vetch (*Vicia panonica*) Intercropping in Rotation with Rice (*Oryza sativa* L.) in Paddy Fields 229
Mohammad Rabiee and Sajjad Shaker Kouhi

Evaluation of yield and yield stability of evolutionary populations and dynamic mixtures of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) in Iran 247
Maedeh Salimi, Alireza Koocheki, Mehdi Nassiri Mahallati, Sayyed Alireza Beheshti, Stefania Grando and Salvatore Ceccarelli

The Effect of Planting Date on the Growth and Yield of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Different Tillage Systems 271
Shahram Choobtashani, Hassan Heidari and Mohammadeghbal Ghobadi