



شماره ۳

جلد ۲۴

سال ۱۴۰۵

(شماره پیاپی: ۸۳)

نشریه علمی

پژوهشهای زراعی ایران

شاپا: ۱۴۷۲-۲۰۰۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- مقایسه اثر کاربرد منفرد و ترکیبی کودهای آلی، شیمیایی و شیرابه کود دامی بر عملکرد، اجزای عملکرد و اسانس گیاه دارویی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) در شرایط مشهد ۳۰۱
زهره فریمانه، پرویز رضوانی مقدم، سرور خرم دل
- بهبود رشد و عملکرد گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa*) از طریق پیش تیمار بذر و محلول پاشی با اسیدهای آمینه سرین و گلوتامین ۳۱۷
ریحانه رابعی، مهدی برادران فیروزآبادی، مصطفی حیدری
- بررسی مدیریت تلفیقی عنصر گوگرد و کود آلی بر عملکرد و اجزای عملکرد کتان روغنی (*Linum usitatissimum*) در شرایط اهواز ۳۳۳
لیلا ناصری مقام، اسفندیار فاتح، امیر آینه بند
- بررسی عوامل ایجادکننده خلأ عملکرد پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) در شهرستان بهشهر به روش CPA ۳۴۷
معصومه مهدوی عبدالملکی، افشین سلطانی، ابراهیم زینلی، صفورا جعفر نوده
- واکنش برخی شاخص‌های رشدی، عملکرد و کیفیت علوفه دو رقم کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) به سطوح مختلف تراکم بوته در منطقه باوی، استان خوزستان ۳۶۵
حسن شریفیات، محمدرضا مرادی تلاوت، احمد کوچک زاده، علی مشتعلی، هانا عبوده
- تأثیر قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری ۳۷۷
یدین توبه، احمد توبه، سلیم فرزانه
- ارزیابی اثر تلفیقی کود آلی مبتنی بر بیوجار و کود شیمیایی بر عملکرد زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) ۳۹۱
غلامرضا امینی، محمدعلی بهدانی، مهدیه عسکری، محمدحسن سیاری زهان، مسعود خزاعی
- پاسخ‌های زراعی متمایز توده‌های بومی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) به تاریخ کاشت: راهبردی برای مدیریت تنش خشکی ۴۰۵
سیدرضا امیری، خالد سلیمی، نادر ذاکری، طیبه یوسفی، سلمان نظرزایی

نشریه پژوهشهای زراعی ایران

«نشریه علمی قطب علمی گیاهان زراعی ویژه»

با شماره ثبت ۱۲۴/۷۸۵۷ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی و

۸۲/۵/۲۷

درجه علمی- پژوهشی شماره ۳/۱۱/۷۴۵۰۹ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

۸۹/۱۰/۲۱

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

سال ۱۴۰۵

شماره ۳

جلد ۲۴

دانشگاه فردوسی مشهد

صاحب امتیاز:

پرویز رضوانی مقدم

مدیر مسئول:

حمیدرضا خزاعی

سردبیر:

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

اعضای هیئت تحریریه:

مجید آقاعلیخانی

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پرویز احسان زاده

گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

یحیی امام

گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران

عبدالرضا باقری

گروه بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

محمدعلی بهدانی

گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران

محمد بنایان اول

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

مجید جامی الاحمدی

گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران

یعقوب راعی

گروه اکوفیزیولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

حمیدرضا خزاعی

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

حمید رحیمیان مشهدی

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

غلامرضا زمانی

گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران

احمد زارع فیض آبادی

مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، ایران

فرح اله شهریاری احمدی

گروه بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

محمد کافی

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

احمد نظامی

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

احسان عیشی رضایی

مرکز مطالعات کشاورزی بنیاد لابنتز (زالف)، آلمان

اعظم لشکری

مرکز جان اینس، نورویج، انگلیس

امیربهبزاد بذرگر

دانشکده علوم محیطی، دانشگاه گوتلف، کانادا

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، دبیرخانه نشریات علمی، نشریه پژوهشهای زراعی ایران صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳

پست الکترونیک: cesc@um.ac.ir

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

این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:

(ISC)، (SID)، (MAGIRAN)، (DOAJ)، (CABI)، (AGRIS)، (EBSCO)، (CIVILICA)، (GoogleScholar)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

مقالات پژوهشی

- ۳۰۱ مقایسه اثر کاربرد منفرد و ترکیبی کودهای آلی، شیمیایی و شیرابه کود دامی بر عملکرد، اجزای عملکرد و اسانس گیاه دارویی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) در شرایط مشهد
زهرا فریمانه، پرویز رضوانی مقدم، سرور خرم دل
- ۳۱۷ بهبود رشد و عملکرد گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa*) از طریق پیش تیمار بذر و محلول پاشی با اسیدهای آمینه سرین و گلوتامین
ریحانه رابعی، مهدی برادران فیروزآبادی، مصطفی حیدری
- ۳۳۳ بررسی مدیریت تلفیقی عنصر گوگرد و کود آلی بر عملکرد و اجزای عملکرد کتان روغنی (*Linum usitatissimum*) در شرایط اهواز
لیلا ناصری مقام، اسفندیار فاتح، امیر آینه بند
- ۳۴۷ بررسی عوامل ایجادکننده خلأ عملکرد پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) در شهرستان بهشهر به روش CPA
معصومه مهدوی عبدالملکی، افشین سلطانی، ابراهیم زینلی، صفورا جعفر نوده
- ۳۶۵ واکنش برخی شاخص‌های رشدی، عملکرد و کیفیت علوفه دو رقم کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) به سطوح مختلف تراکم بوته در منطقه باوی، استان خوزستان
حسن شریفات، محمدرضا مرادی تلاوت، احمد کوچک زاده، علی مشتقی، هانا عبوده
- ۳۷۷ تأثیر قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری
یدین توبه، احمد توبه، سلیم فرزانه
- ۳۹۱ ارزیابی اثر تلفیقی کود آلی مبتنی بر بیوجار و کود شیمیایی بر عملکرد زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.)
غلامرضا امینی، محمدعلی بهدانی، مهدیه عسکری، محمدحسن سیاری زهان، مسعود خزاعی
- ۴۰۵ پاسخ‌های زراعی متمایز توده‌های بومی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) به تاریخ کاشت: راهبردی برای مدیریت تنش خشکی
سیدرضا امیری، خالد سلیمی، نادر ذاکری، طیبه یوسفی، سلمان نظرزایی



Research Article

Vol. 24, No. 3, Fall 2026, p. 299-314

Comparison of the Effect of Single and Combined Application of Organic, Chemical fertilizers and Slurry on Yield, Yield Components, and Essential Oil of the Coriander (*Coriandrum sativum* L.) as a Medicinal Plant under Mashhad Conditions

Z. Farimaneh¹, P. Rezvani Moghaddam^{1*}, S. Khorramdel¹

1- Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding author's Email: rezvani@um.ac.ir)

Received: 25 July 2025
Revised: 29 September 2025
Accepted: 06 October 2025
Available Online: 22 October 2025

How to cite this article:

Farimaneh, Z., Rezvani Moghaddam, P., & Khorramdel, S. (2026). Comparison of the effect of single and combined application of organic, chemical fertilizers and slurry on yield, yield components, and essential oil of the coriander (*Coriandrum sativum* L.) as a Medicinal plant under Mashhad conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 299-314. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.94622.1419>

Introduction

Coriander (*Coriandrum sativum* L.) is a widely cultivated herb of economic and medicinal importance, commonly used in culinary applications as a spice and flavouring agent. In Iran, coriander cultivation plays a significant role in the country's agricultural economy, particularly in semi-arid regions such as Mashhad. The productivity of coriander is heavily influenced by soil fertility and nutrient management practices. Chemical fertilizers, although effective in providing essential nutrients, have been linked to environmental degradation, soil acidification, and long-term decline in soil fertility. On the other hand, organic fertilizers, such as animal manure and slurry, offer a sustainable alternative by improving soil physical structure, enhancing microbial activity, and gradually releasing nutrients. However, the efficacy of organic fertilizers alone or in combination with chemical fertilizers on coriander growth and yield remains under-explored in Mashhad's climatic conditions. This study aims to fill this gap by systematically evaluating the effects of different fertilizer treatments on seed yield, yield components, and essential oil content of coriander.

Materials and Methods

The field experiment was conducted during the 2023 growing season at Ferdowsi University of Mashhad research farm, located in a semi-arid climatic zone characterized by hot summers and cold winters. The experimental design was a randomized complete block design (RCBD) with seven treatments and three replications. The treatments included: 1) control (no fertilizer), 2) animal manure (composted cow manure at 5 ton ha⁻¹), 3) slurry (obtained through water extraction from manure), 4) chemical fertilizer (NPK at recommended rates), 5) a combination of 50% animal manure + 50% chemical fertilizer, 6) a combination of 50% animal manure + 50% slurry, and 7) a combination of 50% slurry+ 50% chemical fertilizer. Standard agronomic practices, including soil preparation, irrigation, and pest control, were applied uniformly across all treatments. Key growth parameters, including plant height, number of primary and secondary branches, number of umbels and umbellets per plant, seed number per plant, seed weight, fresh and dry biomass yield, and harvest index, were recorded at the flowering and seed maturity stages.

Results and Discussion

Analysis of variance revealed significant differences among treatments for most measured traits, indicating



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

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.94622.1419>

that nutrient source and application rate substantially influenced coriander growth and yield. The highest fresh and dry biomass production was observed in the treatment combining 50% animal manure and 50% chemical fertilizer (7130 and 1490 g.m⁻², respectively), highlighting a synergistic interaction between organic and inorganic nutrient sources. This combination likely enhanced nutrient availability while improving soil physical and biological conditions, leading to superior vegetative growth and reproductive development. Slurry treatment significantly increased seed number (88%), and the number of umbels (84%) compared to the control, suggesting improved nutrient solubility and uptake efficiency. Chemical fertilizer alone yielded the highest number of umbellets (306 per plant), branches (13.67 per plant), and seed weight per plant (12.48 g per plant), highlighting the rapid nutrient release and availability provided by inorganic fertilizers. However, the tallest plants were recorded in the sole animal manure treatment (66.67 cm), which also showed the highest harvest index (47.78%) after the control (49.75%), indicating that organic fertilizers can promote balanced vegetative growth and partitioning of assimilates to reproductive organs. These findings align with previous research emphasizing the benefits of integrated nutrient management for sustainable crop production. Additionally, the use of animal manure and its derivatives contributes to enhanced soil microbial activity, improved water retention, and long-term soil fertility. The study demonstrates that while chemical fertilizers can quickly boost yield components, organic fertilizers are essential for maintaining soil health and ensuring sustainable productivity in the long run.

Conclusion

The results of this study indicate that integrating animal manure with chemical fertilizers can significantly enhance the growth, yield components, and biomass production of coriander under Mashhad's semi-arid climatic conditions. The combined application strategy not only improved seed yield and vegetative growth but also contributed to better soil health compared to the use of sole chemical fertilizers. Slurry emerged as a promising alternative nutrient source with notable effects on yield parameters. Sustainable fertilization strategies involving both organic and inorganic sources are recommended for coriander cultivation in similar agro-ecological zones to achieve higher productivity and environmental sustainability. Further long-term research is warranted to evaluate the dynamics of soil health, economic viability, and potential ecological impacts of these fertilization practices.

Keywords: Essential oil percentage, Harvest index, Organic fertilizer, 1000-seed weight

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص ۲۹۹-۳۱۴

مقایسه اثر کاربرد منفرد و ترکیبی کودهای آلی، شیمیایی و شیرابه کود دامی بر عملکرد، اجزای عملکرد و اسانس گیاه دارویی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) در شرایط مشهد

زهرا فریمانه^۱، پرویز رضوانی مقدم^{۱*}، سرور خرم دل^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

چکیده

مدیریت صحیح خاک از ارکان اصلی دستیابی به کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. در این راستا، آزمایشی به منظور بررسی تأثیر انواع کودهای آلی، شیمیایی و ترکیب آن‌ها بر عملکرد، اجزای عملکرد دانه و اسانس گیاه دارویی گشنیز با نام علمی *Coriandrum sativum* L. در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. این آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با هفت تیمار (کود گاوی، شیرابه کود دامی، کود شیمیایی، سه تیمار دوگانه هر یک از منابع کودی و شاهد) و سه تکرار اجرا گردید. نتایج نشان دادند که بیشترین عملکرد تر و خشک (به ترتیب ۷۱۳۰۰ و ۱۴۹۰۰ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار ترکیبی کود گاوی + کود شیمیایی بود. شیرابه کود دامی باعث افزایش تعداد دانه در بوته، تعداد چتر در بوته، عملکرد تر و خشک (به ترتیب ۱۲۰۶، ۵۸/۳۳، ۴۸۵۰۰ و ۱۳۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع) در مقایسه با تیمار کود شیمیایی شد. بیشترین ارتفاع بوته در تیمار کود گاوی به دست آمد. بیشترین مقدار شاخص برداشت پس از شاهد (۴۹/۷۵ درصد)، در تیمار کود گاوی (۴۷/۷۸ درصد) مشاهده شد. نتایج نشان داد که تیمار شیرابه کود دامی، بیشترین درصد اسانس و عملکرد اسانس را به خود اختصاص داد. به طور کلی، استفاده از شیرابه کود دامی در بیشتر صفات دارای برتری بود و ترکیب کود گاوی و کود شیمیایی نیز رشد و عملکرد گیاه را نسبت به شاهد بهبود دادند. این نتایج تأکید می‌کند که جایگزینی کودهای شیمیایی با کودهای آلی به خصوص شیرابه کود دامی، می‌تواند در بهبود رشد و عملکرد گیاهان دارویی مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: درصد اسانس، شاخص برداشت، کودهای آلی، وزن هزار دانه

مقدمه

گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) با نام انگلیسی Coriander جزء گیاهان یک‌ساله و علفی است که از خانواده چتریان می‌باشد. این گیاه دارای ساقه‌های راست، افراشته، توخالی، شیاردار و منشعب با ارتفاع بوته ۲۰ تا ۱۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. برگ‌های گشنیز دارای دم‌برگ بلند، شانه‌ای یا کامل، برگ‌های فوقانی دارای بریدگی‌های خطی و به شکل دو تا سه بار شانه‌ای و برگ‌های میانی با دم‌برگ‌های کوتاه و متناوب می‌باشد. رنگ گلبرگ‌های گشنیز سفید یا صورتی و به شکل چترهای مرکب در قسمت انتهایی شاخه می‌باشند. گشنیز ریشه‌ای به طول ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر و دوکی شکل دارد که

رنگ آن سفید و دارای انشعابات فراوانی می‌باشد (Pande et al., 2018). از این گیاه به عنوان اشتهاآور، بادشکن، هضم‌کننده و تسکین‌دهنده دردهای عصبی و یا مفصلی و سیستم عصبی به صورت مخلوط یا خالص استفاده می‌شود. همچنین می‌توان در درمان دیابت، رفع اختلالات پروستات، معده درد و نیز به عنوان تقویت‌کننده قلب، اشتهاآور، هضم‌کننده، مدر، درمان اسهال، خلط‌آور، استفراغ، سرفه و کرم روده از گشنیز استفاده نمود علاوه بر این، گشنیز دارای خواص ضدقارچی، ضدباکتریایی و ضدانگلی می‌باشد (Ahvazi et al., 2010). ظهور گل‌ها در گشنیز در اواسط اردیبهشت تا اواسط تیر ماه می‌باشد و برداشت بذرها آن از اوایل تیر ماه آغاز و تا اواخر مرداد ماه به طول می‌انجامد (Hasheminejad & Bahadori, 2008). در دهه‌های گذشته، استفاده از کودهای شیمیایی برای افزایش عملکرد محصولات زراعی باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی و به خصوص آلوده شدن خاک و آب گردید که همین آلودگی‌ها با قرار گرفتن در

۱- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(Email: rezvani@um.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

زنجیره غذایی انسان‌ها باعث به خطر افتادن سلامت بشر شده است (Farrokhi et al., 2021). امروزه به دلیل مشکلات استفاده بیش از حد کودهای شیمیایی، محققان استفاده از کودهای آلی را به جای کودهای شیمیایی در کشاورزی توصیه می‌کنند (Mirjalili et al., 2021). استفاده از روش‌های تغذیه‌ای پایدار مانند کاربرد کودهای بیولوژیک و آلی برای تأمین قسمتی از نیازهای گیاه به کود و کاهش مصرف کودهای شیمیایی، کمک بزرگی به این موضوع می‌کند (Bender et al., 2016). کودهای حیوانی دارای مقادیر فراوانی از عناصر غذایی می‌باشند که حفظ این عناصر غذایی از زمان تولید تا استفاده و دفن آن‌ها از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی بسیار مفید است (Ahmed Mohamed et al., 2020). کود دامی و شیرابه کود دامی، شکل رایج کودهای گاوی می‌باشد (Assefa & Tadesse, 2019). طبق نتایج مورالس و همکاران (Morales et al., 1998)، تیمارهای آلی غنی‌سازی شده نظیر شیرابه کود دامی به علت ایجاد کمپلکس‌های ماده آلی سبب افزایش قابلیت استفاده عناصر میکرو از جمله آهن در خاک شد. کودهای شیمیایی برای رشد گیاه تنها یک یا چند عنصر ضروری را فراهم می‌کنند، اما کودهای آلی تعداد زیادی از عناصر کم‌مصرف و پرمصرف را در دسترس گیاه قرار می‌دهند و همچنین باعث بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شوند و علاوه بر این باعث ایجاد محیط مناسب برای رشد بهتر گیاهان می‌شوند (Almasi, 2021). اقحوانی شجری و همکاران (Aghhavani Shajari et al., 2016) گزارش کردند که تلفیق کود آلی با کود شیمیایی باعث بهبود خصوصیات ریخت‌شناختی گشنیز از جمله ارتفاع بوته، تعداد ساقه جانبی، تعداد چتر، تعداد چترک و تعداد دانه در چتر گردید و کاربرد کود شیمیایی به‌تنهایی نیز کمترین تأثیر را بر صفات مذکور بر جا گذاشت. نتایج مطالعات بیگناه و همکاران (Bigonah et al., 2015) روی گیاه دارویی گشنیز نشان داد که شاهد بیشترین و تیمار ورمی‌کمپوست کمترین درصد اسانس دانه را دارا بود. درحالی‌که عملکرد اسانس در تیمار ورمی‌کمپوست بیشتر از تیمار شاهد بود. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که وقتی گیاه گشنیز در شرایط تنش مواد غذایی قرار می‌گیرد برای بقای خود، میزان اسانس بیشتری سنتز می‌کند و در عوض، عملکرد بیولوژیک کمتری را دارا می‌باشد. اقحوانی شجری و همکاران (Aghhavani Shajari et al., 2014) گزارش کردند که بیشترین مقدار درصد و عملکرد اسانس گشنیز در تیمارهای مصرف کود گاوی به‌تنهایی و کاربرد تلفیقی کود زیستی میکوریزا با کود گاوی به دست آمد و کمترین مقدار آن در تیمار کاربرد کود شیمیایی به‌تنهایی مشاهده شد. کاربرد کود شیمیایی باعث کاهش درصد اسانس پیکر رویشی گیاه به میزان ۲۵ درصد نسبت به شاهد شد.

بررسی مقایسه اثر کودهای آلی، بیولوژیک و شیمیایی روی گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis*) نشان داد که کاربرد کودهای

آلی و زیستی در بهبود صفات کمی و کیفی مرزه مؤثر بودند (Gholami Sharafkhaneh et al., 2015). با توجه به مقادیر فراوان مواد آلی و عناصر غذایی موجود در کود دامی و شیرابه کود دامی، این مواد اثرات مثبت زیادی از جمله بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین افزایش عملکرد و کیفیت محصول را به همراه دارند. شیرابه کود دامی دارای آب بیشتری نسبت به کود دامی است که می‌توانند مدت زمان طولانی‌تری تقریباً تا ۱۱۹ روز در خاک زنده بمانند و علاوه بر آن منجر به انتشار سریع‌تر ریزجانداران به عمق خاک می‌شوند. (Frick et al., 2022). نتایج مطالعه بیگناه و همکاران (Bigonah et al., 2015) در مدیریت‌های مختلف کودی روی برخی خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی گشنیز حاکی از آن است که کودهای آلی و بیولوژیک تأثیر مثبتی بر صفات کمی و کیفی گشنیز از جمله عملکرد دانه، عملکرد اسانس، عملکرد بیولوژیک و اجزای عملکرد گیاه داشتند. آن‌ها اضافه کردند این اثر مثبت را می‌توان به تأثیر بهبودپذیری وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک توسط این کودها و فراهمی بهتر عناصر غذایی برای گیاه نسبت داد. این آزمایش با هدف بررسی تأثیر استفاده منابع مختلف کودی (کود دامی، شیرابه کود دامی و شیمیایی) بر ویژگی‌های کیفی و کمی گیاه دارویی گشنیز تحت شرایط آب‌وهوایی مشهد انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به منظور بررسی اثرات کاربرد جداگانه و ترکیبی کودهای مختلف آلی و شیمیایی بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه گشنیز در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد، واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد با طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی، ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا طی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا شد. این منطقه براساس روش آمبرژه، دارای آب‌وهوای سرد و خشک می‌باشد (Razavi Khorasan Meteorological and Climate Center, 2021).

قبل از شروع آزمایش، جهت نمونه‌گیری خاک، در هشت نقطه گودالی حفر و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد. سپس خاک‌های نمونه‌برداری شده به صورت کامل مخلوط و دو کیلوگرم از مخلوط چند نقطه به آزمایشگاه ارسال گردید که نتایج آن در جدول ۱ آراسته شده است.

قبل از شروع آزمایش، نمونه‌برداری و تعیین خصوصیات شیمیایی کود دامی گاوی کاملاً پوسیده انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

همچنین جهت تعیین خصوصیات شیمیایی و میزان عناصر غذایی شیرابه کود دامی، نمونه‌گیری انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش (عمق ۳۰-۰ سانتی متر)

Table 1- Physicochemical properties of the soil at the experimental site (0-30 cm depth)

بافت	نیتروژن قابل دسترس	فسفر	پتاسیم	اسیدیته	هدایت الکتریکی	کربن آلی
Texture	Available N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	pH	EC(dS m ⁻¹)	Organic C (%)
لومی (متوسط) Loam (medium)	0.091	25	400	7.88	2.66	0.917

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی کود دامی قبل از مصرف

Table 2- Chemical characteristics of cow manure prior to application

نیتروژن قابل دسترس	فسفر	پتاسیم	اسیدیته	هدایت الکتریکی	کربن آلی	نسبت کربن به نیتروژن	رطوبت
Available N (%)	P (%)	K (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)	Organic C (%)	C/N (%)	Moisture (%)
1.90	0.78	1.13	8.00	12.75	20.14	10.60	10

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی شیرابه کود دامی

Table 3- Chemical properties of slurry

نیتروژن قابل دسترس	فسفر	پتاسیم	اسیدیته	هدایت الکتریکی	کربن آلی	ماده آلی	نسبت کربن به نیتروژن
Available N (%)	P (%)	K (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)	Organic C (%)	Organic matter (%)	C/N (%)
0.132	0.075	0.178	7.66	14.09	0.715	1.216	5.42

انتهای کلیه کرت‌ها با بالا آوردن پشته‌ها بسته شدند تا از تأثیر تیمارها روی یکدیگر جلوگیری شود. همچنین قبل از کاشت، مقدار ۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تربیل در هکتار و ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار به صورت یکسان در تمامی کرت‌ها اعمال و با خاک مخلوط شد.

عملیات آماده‌سازی بستر کاشت شامل شخم، دیسک و ایجاد فارو در هشتم اسفند ماه سال ۱۴۰۱ انجام شد. مساحت کرت‌های آزمایشی ۳ × ۳ متر (نه مترمربع) بود. جهت جلوگیری از اختلاط اثر تیمارها، فاصله کرت‌ها از یکدیگر یک متر و فاصله بین تکرارها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. بذر مورد استفاده، از توده محلی همدان تهیه شد.

کاشت بذر صورت دستی و با رعایت فواصل ردیف و بوته در عمق ۳-۲ سانتی‌متر در تاریخ ۲۰ فروردین سال ۱۴۰۲ انجام گردید. در هر کرت، شش ردیف به فاصله ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که ابتدا بذرها به صورت پُر تراکم کاشته شدند و در مرحله دو تا چهار برگی، براساس تراکم ۴۰ بوته در مترمربع و با فاصله روی ردیف پنج سانتی‌متر، عملیات تنک انجام گرفت. بعد از کاشت، بلافاصله آبیاری به شیوه نشتی و یکسان در تمام تیمارها صورت گرفت. تا زمان استقرار کامل بوته‌ها (یک ماه اول)، فاصله آبیاری به صورت هر سه روز یک بار و بعد از آن، به صورت هر هفت روز یک بار انجام شد. پس از سبز شدن بوته‌ها، مهار علف‌های هرز به صورت دستی در سه نوبت در تاریخ‌های ۳۰ اردیبهشت، ۱۵ خرداد و ۲۷ خرداد انجام شد. عملیات تنک کردن طی دو مرحله در تاریخ ۲۰ اردیبهشت و ۲ خرداد انجام شد.

این آزمایش در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. میزان مصرف کود شیمیایی، کود دامی و شیرابه کود دامی براساس مقدار نیتروژن توصیه شده ملکوتی (Malakouti, 2014) و خصوصیات خاک تعیین شد. بر این اساس، تیمارهای کودی شامل کود دامی (گاوی) (C)، کود شیمیایی (F)، شیرابه کود دامی (S)، ۵۰ درصد کود دامی + ۵۰ درصد کود شیمیایی (F 50% C + 50%)، ۵۰ درصد کود دامی + ۵۰ درصد شیرابه کود دامی (C 50% + S 50%)، ۵۰ درصد کود شیمیایی + ۵۰ درصد شیرابه کود دامی (F 50% S 50%) و شاهد (بدون کود) بودند. طبق نتایج جدول ۴، مقدار نیتروژن مصرفی براساس محتوای ماده آلی خاک و مقدار فسفر و پتاسیم مصرفی براساس مقدار فسفر و پتاسیم موجود در خاک و کودهای آلی تعیین شد. بر این اساس، مقدار مصرف کود دامی، کود سوپرفسفات تربیل و کود سوپرفسفات پتاسیم براساس نتایج آزمایش خاک (جدول ۱) و توصیه ارائه شده در جدول ۴ و آنالیز آزمایش کودهای آلی، برای کاربرد منفرد هر یک از این تیمارها کود دامی (گاوی) ۱۹ تن در هکتار، شیرابه کود دامی ۲۱/۸۴ مترمکعب در هکتار، کود شیمیایی (اوره) ۱۶۱ کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. لازم به ذکر است که در محاسبه کود دامی مورد نیاز، براساس فراهمی عناصر غذایی براساس ۴۰ درصد در سال اول در نظر گرفته شد که در ابتدای فصل رشد به صورت دستی در کرت‌ها پاشیده و با خاک مخلوط شد. مقادیر کود شیمیایی و شیرابه کود دامی در سه مرحله در تاریخ (۱۵ اردیبهشت، ۵ خرداد و ۲۵ خرداد) در طول فصل رشد مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه تیمارهای آزمایشی مقادیر کودهای مختلف می‌باشد، لذا

جدول ۴- توصیه کودی برای کشت سبزی‌ها براساس آزمون خاک (Malakouti, 2014)

Table 4- Fertilizer recommendations for vegetable cultivation based on soil testing

پتاسیم		فسفر		نیتروژن	
K		P		N	
سوپر فسفات پتاسیم	پتاسیم	سوپر فسفات تریپل	فسفر	اوره	کربن آلی
Potassium superphosphate (kg ha ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Triple superphosphate (kg ha ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Urea (kg ha ⁻¹)	Organic C (%)
200	150<	150	5<	500	0.5<
150	150-200	100	5-10	450	0.5 - 1
100	201-250	50	15- 10	350	1 - 1.5
0	300>	0	15>	250	1.5>

بین کیسه‌ها دستگاه حباب‌ساز قرار داده شد و بعد از آن داخل مخزن را با پساب فاضلاب کود گاوی پر کرده، سپس به مدت زمان یک ماه اجازه داده شد تا عصاره خارج گردد. بعد از گذشت یک ماه عصاره به گالن‌های ۱۰۰۰ لیتری انتقال داده و به دلیل ضدعفونی شیرابه کود دامی داخل هر گالن دستگاه ازون ژنراتور به مدت سه تا چهار ساعت قرار داده شد. در انتها، نمونه‌ای از شیرابه به آزمایشگاه ارسال شد و مطابق نتیجه آزمون، میزان مصرف تعیین گردید.

عملیات اسانس‌گیری

در تاریخ ۱۰ تیر ماه، به‌منظور تعیین محتوای اسانس اندام‌های هوایی، از ابتدای هر کرت با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای از یک سطح یک مترمربع، نمونه‌برداری انجام شد. سپس در هر یک از نمونه‌ها، برگ، گل و ساقه تفکیک گردید. برگ‌ها و گل‌ها در نمونه-های برداشت‌شده در سایه خشک شد. سپس اسانس‌گیری از یک نمونه ۵۰ گرمی از برگ‌ها و گل‌های خشک‌شده در هر کرت، توسط دستگاه کلونجر انجام گردید. بدین صورت که هر نمونه ابتدا آسیاب شده، سپس درون بالن ریخته و ۶۰۰ میلی‌لیتر آب به آن اضافه شد. سپس به مدت چهار ساعت در دستگاه کلونجر قرار داده شد و پس از آب‌زدایی (با استفاده از پتاسیم سولفات)، درصد اسانس تعیین گردید. با توجه به اینکه نمونه اسانس‌گیری‌شده، هواخشک (در روش هواخشک اسانس موجود در گیاه از دست نخواهد رفت) بوده است، لذا برای تصحیح اختلاف به‌دست‌آمده، هم‌زمان با برداشتن ۵۰ گرم برای اسانس‌گیری، ۵۰ گرم دیگر در داخل آون ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده و وزن خشک تعیین شد. سپس از اختلاف به‌دست‌آمده، درصد اسانس محاسبه و ثبت گردید. عملکرد اسانس از حاصل ضرب درصد اسانس به عملکرد برگ و گل‌ها محاسبه گردید. پس از اندازه‌گیری شاخص‌های مورد نظر، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده نرم‌افزارهای Minitab و MS-Excel انجام گرفت. مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

یادداشت‌برداری در تمام طول فصل رشد براساس بازدیدهای مکرر انجام شد. جهت نمونه‌برداری، هر کرت در طول به دو قسمت مساوی تقسیم شد، به‌طوری که ۱/۵ متر اول برای تعیین عملکرد اندام‌های رویشی و درصد اسانس در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی و ۱/۵ متر دوم جهت تعیین عملکرد و اجزای عملکرد دانه اختصاص داده شد.

گیاهان در بخش زایشی کرت‌ها تا گل‌دهی کامل در آخر فصل به رشد خود ادامه داده و به مرحله رسیدگی فیزیولوژیک (رسیدگی دانه) رسیدند. در این مرحله در تاریخ ۱۴ مرداد قبل از برداشت گیاهان با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای (دو ردیف کناری و ۳۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای کرت)، تعداد پنج بوته در کرت به‌طور تصادفی انتخاب و صفاتی از جمله ارتفاع بوته (قبل از برداشت گیاه از سطح خاک تا بلندترین نقطه گیاه اندازه‌گیری شد)، وزن دانه در بوته (تمامی دانه-های بوته جداسازی و توزین شد)، وزن هزار دانه، وزن تر و خشک بوته (بلافاصله بعد از برداشت، نمونه‌ها توزین شدند)، تعداد چتر (شمارش تعداد چترهای کل بوته)، تعداد چترک در بوته (با شمارش تعداد چترک‌های موجود در هر چتر در کل بوته)، شاخه فرعی درجه یک (با شمارش تعداد شاخه‌های متصل به شاخه اصلی)، شاخه فرعی درجه دو (شاخه‌های انشعاب‌گرفته از شاخه‌های فرعی درجه یک) شمارش و اندازه‌گیری شدند. سایر بوته‌های کرت برای تعیین عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه مورد استفاده قرار گرفتند. بدین منظور، بوته‌ها از سطح مورد نظر با در نظر گرفتن اثر حاشیه از سطح خاک برداشت شدند و پس از خشک شدن بوته‌ها، دانه‌ها جدا شدند و عملکرد دانه اندازه‌گیری و تعیین گردید. شاخص برداشت دانه از نسبت عملکرد دانه به وزن خشک بوته‌ها (عملکرد بیولوژیک شامل عملکرد دانه و کاه‌وکش) ضربدر ۱۰۰ محاسبه گردید. برای تهیه شیرابه کود دامی، ابتدا کود گاوی را الک کرده و بعد از آن داخل کیسه‌هایی از جنس کف و تا نیمه پر کرده و درب کیسه‌ها را با طناب بسته و داخل کف مخزنی که برای تهیه شیرابه در نظر گرفته شده، قرار داده شد. جهت استخراج عصاره و وارد شدن اکسیژن به مخزن،

نتایج و بحث

وزن تر و وزن خشک اندام رویشی

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمارهای کودی بر صفات وزن تر و وزن خشک اندام رویشی گشنیز در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد تیمار ترکیبی کود دامی + کود شیمیایی بیشترین تأثیر را بر وزن تر اندام رویشی (۷/۱۳ کیلوگرم در مترمربع) با ۶۲ درصد اختلاف با شاهد و بعد از آن تیمار شیرابه کود دامی + کود شیمیایی (۵/۴۰ کیلوگرم در مترمربع) بود که نسبت به شاهد ۲۲ درصد اختلاف داشت (جدول ۶).

مقایسه میانگین وزن خشک نشان داد که کاربرد تیمار کود دامی + کود شیمیایی (۱/۶۲ کیلوگرم بر مترمربع) بیشترین تأثیر را بر وزن خشک اندام رویشی با اختلاف ۷۴ درصد با شاهد داشت (جدول ۶).

اقتصادی شجری و همکاران (Aghhavan Shajari et al., 2016) در بررسی خود روی کاربرد کودهای آلی و شیمیایی بر عملکرد کمی و کیفی گیاه دارویی گشنیز گزارش کردند که تمامی منابع کودی به جز مصرف منفرد کود شیمیایی، مقدار عملکرد بیولوژیک گیاه گشنیز را افزایش دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مصرف تلفیقی کودهای شیمیایی و آلی در مقایسه با مصرف منفرد آن‌ها اثرات به مراتب چشمگیری بر افزایش زیست‌توده تولیدی گیاه داشتند. بیگناه و همکاران (Bigonah et al., 2015) گزارش کردند که تیمار تلفیقی کود آلی با کود شیمیایی به طور معنی داری عملکرد بیولوژیک و صفات زایشی را در گیاه دارویی گشنیز افزایش دادند. نتایج مطالعه رضوانی مقدم و همکاران (Rezvani Moghaddam et al., 2012) در مدیریت‌های مختلف کودی روی گیاه مرزه (*Satureja hortensis* L.) نشان داد که کودهای آلی و زیستی تأثیر مثبتی بر بهبود صفات کمی و کیفی گیاه دارویی مرزه داشتند و نتایج نشان داد که در گیاه مرزه، کودهای زیستی و آلی را می‌توان با توجه به شرایط محیطی و پتانسیل گیاه، در نظام‌های تغذیه اکولوژیک به عنوان جایگزینی برای کودهای شیمیایی مورد استفاده قرار داد. مدیریت حاصلخیزی خاک بر مبنای مصرف کودهای آلی مانند کود دامی سبب بهبود خصوصیات خاک و افزایش رشد و عملکرد محصول می‌گردد، همچنین پایداری بوم‌نظام‌ها را تحت تأثیر قرار داده و در بلندمدت تضمین می‌کند (Leithy et al., 2006). کودهای آلی سبب افزایش در دسترس بودن عناصر غذایی می‌شود و کیفیت و کمیت عناصر غذایی خاک را حفظ کرده و باعث بهبود ساختمان خاک می‌شود و در نتیجه منجر به افزایش عملکرد محصول می‌شود (Melero et al., 2008).

نتایج پژوهش رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2022) حاکی از آن است که کودهای شیمیایی را می‌توان با ورمی کمپوست و اسید هیومیک جایگزین کرد و کاربرد مشترک آن‌ها نیز تأثیر مثبتی بر

پاسخ رشدی و ترکیب اسانس گشنیز دارد. نتایج تحقیقی نشان داد که وزن تر و وزن خشک گیاه ژوت (*Corchorus olitorius*) با کاربرد کود دامی در مقایسه با شاهد اثر معنی‌داری داشت، به طوری که تیمار کود دامی، وزن تر و وزن خشک بالایی در مقایسه با شاهد داشت. این موضوع می‌تواند به دلیل مواد معدنی خاصی که توسط کود دامی تجزیه و آزاد می‌شود، باشد. این مواد معدنی سبب تولید تعداد برگ‌های بیشتری می‌شود و با افزایش سرعت فتوسنتز توسط برگ‌ها، زیست‌توده بیشتری تولید می‌گردد (Naim et al., 2015).

طی تحقیقی گزارش شد که افزایش عرضه عناصر غذایی، حجم بیشتر ریشه، عملکرد وزن تر و عملکرد وزن خشک به دست آمده در گیاه هویج (*Daucus carota*) در تیمار شیرابه کود دامی را می‌توان به اثر مؤثر کودهای آلی به شرایط خاک نسبت داد (Jeptoo et al., 2013). نتایج تحقیقی که طی دو سال متوالی روی گیاه شاهی (*Lepidium sativum*) انجام گرفت، نشان داد که تیمار کود دامی سبب افزایش تعداد برگ، تعداد شاخه، وزن تر و وزن خشک در مقایسه با کاربرد تیمار کود شیمیایی شد (Ahmed Mohamed et al., 2020). افزودن ماده آلی به خاک باعث بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل وزن مخصوص ظاهری، ظرفیت نگهداری آب، قابلیت نفوذ، ظرفیت تبادل کاتیونی، غلظت نیتروژن کل، مقدار فسفر قابل جذب، غلظت عناصر کم‌مصرف و پرمصرف، pH و همچنین مقدار مواد آلی خاک می‌گردد (Turan et al., 2009). و از این طریق می‌توان عملکرد گیاه را بهبود بخشید.

اقتصادی شجری و همکاران (Aghhavan Shajari et al., 2016; 2014) گزارش کردند که استفاده تلفیقی از کودهای آلی و شیمیایی در فراهمی عناصر غذایی در خاک از طریق بهبود واکنش‌های درونی گیاه باعث افزایش جذب عناصر مغذی خاک و در نتیجه افزایش عملکرد گیاه گشنیز می‌شوند. چیتو و همکاران (Jeptoo et al., 2013) گزارش دادند که در پایان هر فصل محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم خاک در تیمار شیرابه کود دامی و کود دامی نسبت به کرت‌های شاهد در گیاه هویج بیشتر بود. نتایج دو پژوهش جداگانه که در آن‌ها، گیاه زردچوبه (*Curcuma longa*) تحت تأثیر کاربرد کودهای گاوی، بزی و مرغی (Hossain & Ishimine, 2007) قرار گرفت، و نیز تاج‌خروس (*Amaranthus retroflexus*) که با کود مرغی تیمار شد (Maerere et al., 2001) نشان داد که زیست‌توده اندام هوایی و ریشه در کرت‌های تیمار شده با شیرابه کود دامی در مقایسه با شاهد بالاتر بود، که علت را می‌توان در نتیجه بهبود در دسترس بودن عناصر غذایی و ساختار خاک نسبت داد که به رشد شاخساره و رشد ریشه کمک می‌کند. افزودن کود دامی به خاک باعث بهبود شرایط فیزیکی و فرایندهای حیاتی در خاک می‌شود که خود باعث ایجاد بستر مناسب برای رشد ریشه و فراهمی عناصر غذایی برای گیاه و افزایش ماده خشک می‌شوند. در همین مورد،

غذایی حیاتی گیاهان، از طریق افزایش فعالیت ریزجانداران خاک، فرآیند تجزیه مواد آلی را تسریع می‌کند که ضمن آزادسازی عناصر غذایی از مواد آلی، بالانس عناصر غذایی، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک بهبود پیدا کرده و در نتیجه بر فرآیند رشد گیاهان تأثیر مثبتی دارند (Bigonah et al., 2015).

یافته‌های گزارش شده از تحقیقی-روی گیاه دارویی مریم گلی یونانی (*Salvia fruticosa* Mill.) و ریحان (*Ocimum basilicum*) نشان داد که با کاربرد مقادیر مناسبی از کود دامی، زیست‌توده گیاهی افزایش می‌یابد (Kaplan et al., 2009). به نظر می‌رسد که استفاده توأم کودهای شیمیایی با کودهای آلی ضمن تأمین نیازهای عناصر

جدول ۵- آنالیز واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای کود آلی و شیمیایی بر وزن تر و وزن خشک گیاه گشنیز در مرحله زایشی

Table 5- Analysis of variance (mean of squares) of the effect of organic and chemical fertilizer treatments on fresh and dry yield of coriander at the reproductive stage

وزن خشک	وزن تر	درجه آزادی منابع تغییر	
Dry weight	Fresh weight	df	S.O.V
0.0070 ^{ns}	0.0027 ^{ns}	2	بلوک Block
0.2014 ^{**}	2.1707 ^{**}	6	تیمار Treatment
0.0047	0.0626	12	خطا Error
21.2	15.4	-	ضریب تغییرات C.V. (%)

ns و **: به ترتیب نشان دهنده غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

ns and **: indicate non-significant and significant at the 1% probability level, respectively

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر تیمارهای کود آلی و شیمیایی بر عملکرد وزن تر و وزن خشک گشنیز در مرحله زایشی

Table 6- Mean comparison of the effects of organic and chemical fertilizer treatments on fresh and dry yield of coriander at reproductive stage

تیمار Treatment	عملکرد وزن تر Fresh weight yield (g m ⁻²)	عملکرد وزن خشک Dry weight yield (g m ⁻²)
۱۰۰٪ کود شیمیایی 100% chemical fertilizer	5230 ^{b*}	1450 ^b
۱۰۰٪ شیرابه کود دامی 100% slurry	4580 ^{bc}	1320 ^b
۱۰۰٪ کود دامی 100% animal manure	5160 ^b	1190 ^c
۵۰٪ کود دامی + ۵۰٪ شیرابه کود دامی 50% Animal manure + 50% slurry	5390 ^b	1270 ^b
۵۰٪ کود شیمیایی + ۵۰٪ شیرابه کود دامی 50% chemical fertilizer + 50% slurry	5400 ^b	990 ^c
۵۰٪ کود دامی + ۵۰٪ کود شیمیایی 50% animal manure + 50% chemical fertilizer	7130 ^a	1490 ^a
شاهد Control	4410 ^c	930 ^c

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون تفاوت معنی‌داری براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

* Means sharing the same letter in each column are not significantly different according to Tukey's test at 5% probability level.

تعداد دانه در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات تیمارهای کودی بر تعداد دانه در بوته ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین تعداد دانه در بوته به‌ترتیب در نتیجه تیمار شیرابه کود دامی (۱۲۰۶ عدد) با اختلاف ۸۸ درصد با شاهد و تیمار کود شیمیایی با اختلاف ۴۹ درصد با شاهد حاصل شد. در مورد مقایسه اثر کودهای ترکیبی، بیشترین تعداد دانه در بوته به‌ترتیب مربوط به تیمار کود شیمیایی + شیرابه کود دامی با اختلاف ۲۵ درصد با شاهد، تیمار کود دامی + کود شیمیایی با اختلاف ۱۲ درصد با شاهد و در آخر تیمار کود دامی + شیرابه کود دامی با اختلاف ۸ درصد با شاهد به دست آمد (جدول ۸). کودهای آلی به‌عنوان جایگزینی بوم‌سازگار، برای کودهای شیمیایی مطرح می‌شوند، استفاده از این منابع، پایداری منابع خاک و عدم آلودگی محیط زیست را در پی دارد. علاوه بر این دانه‌هایی که از این روش تولید می‌شوند، علاوه بر کیفیت بالاتر، مقاومت بیشتر به بیماری‌ها، نیاز کودی کمتر و ماندگاری بالاتری نسبت به دانه‌های حاصل از کشاورزی رایج خواهد داشت (Amiri et al., 2013).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات تیمارهای کودی بر عملکرد دانه ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که به‌ترتیب تیمار کود دامی + کود شیمیایی (۶۴۱/۰ کیلو گرم بر مترمربع) ۳۸ درصد نسبت به شاهد و تیمار کود شیمیایی با ۱۷ درصد اختلاف با شاهد دارای برتری بودند (جدول ۸). در بین تیمارهای ترکیبی، بیشترین عملکرد دانه به‌ترتیب در تیمار کود دامی + کود شیمیایی (۶۴۱/۰ کیلوگرم بر مترمربع) با ۳۸ درصد اختلاف با شاهد و تیمار ترکیبی کود دامی + شیرابه کود دامی (۵۰۳/۰ کیلوگرم بر مترمربع) با هشت درصد اختلاف با شاهد مشاهده شد (جدول ۸).

تعداد شاخه‌های فرعی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات تیمارهای کودی بر تعداد شاخه‌های فرعی درجه یک و دو ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) نشان داد که به‌ترتیب مصرف کودهای شیمیایی با ۲۸ درصد و شیرابه کود دامی با ۱۹ درصد برتری نسبت به شاهد، بالاترین تعداد شاخه‌های فرعی درجه یک را داشته‌اند (Saydi et al., 2016).

مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) نشان داد که به‌ترتیب تیمارهای مصرف کودهای شیمیایی با ۵۶ عدد و شیرابه کود دامی با ۴۹ عدد شاخه فرعی درجه دو، بالاترین مقدار این صفت را داشتند.

در مقایسه اثر تیمارهای ترکیبی، بالاترین تعداد شاخه‌های فرعی درجه دو به‌ترتیب مربوط به تیمار ترکیبی کود دامی + شیرابه کود دامی با ۵۶ درصد برتری نسبت به شاهد و تیمار ترکیبی کود دامی + کود شیمیایی با ۳۶ درصد برتری در مقایسه با شاهد و در نهایت تیمار ترکیبی شیرابه کود دامی + کود شیمیایی با اختلاف ۱۹ درصد با شاهد بود (جدول ۸).

تعداد چتر و چترک در هر بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات تیمارهای کودی بر تعداد چتر و چترک در هر بوته ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) نشان داد که به‌ترتیب مصرف کودهای شیرابه کود دامی با ۸۴ درصد و کود شیمیایی با ۸۰ درصد برتری نسبت به شاهد، بالاترین تعداد چتر در هر بوته را داشتند.

در مقایسه اثر تیمارهای ترکیبی، بالاترین تعداد چتر در هر بوته به‌ترتیب در تیمار ترکیبی کود شیمیایی + شیرابه کود دامی با ۴۰ درصد اختلاف با شاهد و تیمار ترکیبی کود دامی + شیرابه کود دامی با ۲۶ درصد اختلاف نسبت به شاهد و در نهایت تیمار ترکیبی شیرابه کود دامی + کود دامی با اختلاف ۱۹ درصد با شاهد مشاهده شد (جدول ۸).

مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) نشان داد که به‌ترتیب مصرف کودهای شیمیایی و شیرابه کود دامی، بالاترین تعداد چترک در هر بوته را داشتند که به‌ترتیب ۱۹۷ و ۱۴۳ درصد در مقایسه با شاهد، برتری داشت. در مقایسه اثر تیمارهای ترکیبی، بالاترین تعداد چترک در هر بوته به‌ترتیب مربوط به تیمار ترکیبی کود دامی + شیرابه کود دامی با ۹۷ درصد اختلاف با شاهد و تیمار ترکیبی کود شیمیایی + شیرابه کود دامی با ۵۵ درصد اختلاف با شاهد و در نهایت تیمار ترکیبی کود دامی + کود شیمیایی با اختلاف ۴۶ درصد با شاهد بود (جدول ۸). کودهای آلی همراه با کودهای شیمیایی از طریق بهبود فعالیت تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه و کاهش آب‌شویی عناصر موجود در خاک باعث فراهمی بیشتر جذب عناصر غذایی توسط گیاه و افزایش فتوسنتز و ماده خشک گیاهی گردیده که این امر در نهایت سبب افزایش گل‌دهی و تعداد چتر در بوته می‌شود (Bigonah et al., 2015).

وزن هزار دانه و دانه در هر بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات تیمارهای کودی بر وزن هزار دانه و دانه در هر بوته ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های حاصل از این پژوهش (جدول ۸) نشان داد که کود شیمیایی با دو درصد اختلاف با شاهد، بالاترین وزن هزار دانه را نسبت به شاهد داشتند. مقایسه میانگین‌ها همچنین نشان داد که تیمار

شاهد به دست آمد. بعد از آن، تیمار کود شیمیایی (۶۶ سانتی متر) برتری-۱۴ درصدی نسبت به شاهد را دارا بود. در مقایسه اثر تیمارهای ترکیبی، بالاترین ارتفاع بوته به ترتیب مربوط به تیمار ترکیبی کود دامی + شیرابه کود دامی با ۱۱ درصد اختلاف با شاهد، و تیمار ترکیبی کود شیمیایی + شیرابه کود دامی با هفت درصد اختلاف با شاهد و در نهایت تیمار ترکیبی کود دامی + کود شیمیایی با اختلاف دو درصد اختلاف با شاهد بود (جدول ۸). در مجموع، می توان گفت که کودهای آلی تأثیر مفیدی بر ویژگی های زیست-فیزیکی شیمیایی خاک دارند، و دسترس پذیری عناصر غذایی را افزایش می دهند (Melero et al., 2008).

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۷) نشان داد که اثر تیمارهای کودی بر شاخص برداشت معنی دار بود ($p \leq 0.05$). بیشترین میزان شاخص برداشت مربوط به شاهد و بعد از آن تیمار کود دامی مشاهده شد (جدول ۸).

در مجموع، شاخص برداشت، چگونگی توزیع مواد پرورده بین اندام های رویشی و دانه گیاهان را نشان می دهد، بنابراین هر عاملی که مقادیر این عوامل را تغییر می دهد باعث تغییر در مقدار شاخص برداشت می شود (Moradi et al., 2009). در تحقیقی گزارش شد که بیشترین شاخص برداشت گشنیز مربوط به تیمار تلقیح با میکوریزا و مصرف ۷۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات زیستی و ۲۰ تن در هکتار کود دامی گاوی بود (Bastami & Majidian, 2015).

تعادل در عناصر غذایی باعث افزایش رشد رویشی و زایشی می شود. با ایجاد فرآورده های فتوسنتزی حاصل از رشد رویشی و انتقال به موقع این فرآورده ها به دانه ها سبب تولید دانه بیشتر و افزایش شاخص برداشت می شود (Bastami & Majidian, 2015). با توجه به مقادیر فراوان مواد آلی و عناصر غذایی موجود در کود دامی و شیرابه کود دامی، این مواد اثرات مثبت زیادی از جمله بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین افزایش عملکرد و کیفیت محصول را به همراه دارند. شیرابه کود دامی دارای آب بیشتری نسبت به کود دامی است که می تواند شرایط را برای فعالیت ریزجانداران خاک برای مدت زمان طولانی تری تقریباً تا ۱۱۹ روز فراهم سازد و علاوه بر آن منجر به انتشار سریع تر ریزجانداران به عمق خاک می شوند (Farrokhi et al., 2021).

کود شیمیایی (۱۲/۴۸ گرم) با ۷۳ درصد اختلاف با شاهد و بعد از آن تیمار شیرابه کود دامی (۱۱/۸۵ گرم) با اختلاف ۶۴ درصد اختلاف با شاهد، بیشترین وزن دانه در هر بوته را نسبت به شاهد دارا بودند (جدول ۸). در بررسی اثر تیمارهای ترکیبی، تیمار کود شیمیایی + شیرابه کود دامی با اختلاف ۴۱ درصد، بیشتری وزن دانه در هر بوته را نسبت به شاهد داشت (جدول ۸).

کود شیمیایی باعث فراهم سازی و بهبود جذب عناصر غذایی، کاهش رقابت بین بوته ها، افزایش رشد رویشی و در نهایت افزایش عملکرد محصول می شود (Tavasoli et al., 2010). اما اخیراً به کارگیری روش های مدیریت پایدار کشاورزی بر پایه مصرف کودهای آلی و بیولوژیک که با هدف حذف یا کم کردن مصرف نهاده های شیمیایی می باشد، مهم ترین راهکار برای جلوگیری از مشکلات زیست محیطی و بالا بردن سلامت محصولات کشاورزی عنوان شده است (Sharma et al., 2003).

مصرف کودهای آلی در مقایسه با کودهای شیمیایی به تنهایی، دارای مقدار زیادی از عناصر غذایی به خصوص نیتروژن، فسفر و پتاسیم می باشند که این عناصر را به تدریج در اختیار گیاه قرار می دهند (Zare Feizabadi et al., 2012). در مطالعه ای گزارش شده است که کاربرد ۱۵ تن کود دامی گاوی در هکتار سبب تولید بیشترین وزن هزار دانه در گندم (*Triticum aestivum* L.) شد و دلیل آن، اثرات مفید کود دامی بر میزان افزایش رشد ریشه، فراهم سازی مناسب عناصر غذایی و افزایش سطح برگ و بهبود فتوسنتز و در نهایت توزین بهتر مواد در مخازن زایشی بیان شد. در پژوهش یاد شده همچنین عنوان شد که از آنجایی که وزن هزار دانه گیاه به عواملی مثل شرایط پر شدن دانه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین تأمین مواد غذایی تا اواخر فصل رشد بستگی دارد، لذا در دسترس بودن عناصر غذایی برای گیاه ضروری می باشد و به نظر می رسد که افزایش عرضه عناصر غذایی مناسب و مواد فتوسنتزی به خصوص در مرحله پر شدن دانه باعث بهبود میزان مواد ذخیره ای در دانه و در نتیجه افزایش وزن هزار دانه شده است (Zare Feizabadi et al., 2012).

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات تیمارهای کودی بر ارتفاع بوته ($p \leq 0.01$) معنی دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین ها (جدول ۸) نشان داد که در تیمار مصرف کود دامی (۶۶/۶۷ سانتی متر) با اختلاف ۱۵ درصد با شاهد، بالاترین میزان ارتفاع بوته نسبت به

جدول ۷- آنالیز واریانس (میانگین مربعات) صفات زایشی گشنیز تحت تأثیر تیمارهای کود آلی و شیمیایی

Table 7- Analysis of variance (mean of squares) of reproductive traits of coriander under organic and chemical fertilizer treatments

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	تعداد دانه در هر بوته Number of seeds per plant	عملکرد دانه Seed yield,	شاخه‌های فرعی درجه ۱ Primary branches	شاخه‌های فرعی درجه ۲ Secondary branches	تعداد چتر در بوته No. of umbels per plant	تعداد چترک در بوته No. of umbellets per plant	وزن هزار دانه 1000- seed weight	وزن دانه در بوته Seed weight per plant	ارتفاع بوته Plant height, (cm)	شاخص برداشت Harvest index, (%)
بلوک Block	2	2715 ^{ns}	0.0006 ^{ns}	0.19	286.5 ^{ns}	76.11 ^{ns}	61.9 ^{ns}	0.123 ^{ns}	0.2264 ^{ns}	9 ^{ns}	0.00038 ^{ns}
تیمار Treatment	6	117163 ^{**}	0.0156 ^{**}	4.26 ^{ns}	232.504 ^{**}	358.54 ^{**}	13615.9 ^{**}	1.045 ^{**}	16.51 ^{**}	32.44 [*]	0.0065 ^{**}
خطا Error	12	2059	0.00017	0.746	6.397	8.706	156.3	0.056	0.2125	7.27	0.0007
ضریب تغییرات C.V (%)	—	23.3%	13.9%	11.3%	19.9%	23.1%	32.9%	5.6%	24.7%	6.1%	11.58%

ns و **: به ترتیب نشان‌دهنده غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد
ns and **: respectively indicate non-significant and significant at the 1% probability level

درصد اسانس و عملکرد اسانس

طبق نتایج به‌دست‌آمده براساس آنالیز واریانس، تیمارهای کودی اثر معنی‌داری بر درصد اسانس ($p \leq 0.05$) داشتند (جدول ۹). بیشترین درصد اسانس مربوط به تیمار شیرابه کود دامی (۲۱۷/۰ درصد) با اختلاف ۳۹ درصدی بیشتر از شاهد به دست آمد (جدول ۱۰). در مورد مقایسه کودهای ترکیبی، بیشترین مقدار درصد اسانس به‌ترتیب مربوط به تیمار کود دامی + کود شیمیایی و بعد از آن کود شیمیایی + شیرابه کود دامی بود (جدول ۱۰). طبق تحقیقی که روی گیاه دارویی گشنیز مشاهده شد، با مصرف کود دامی مقدار درصد اسانس افزایش یافت (Aghhavan-Shajari, 2012). متابولیت‌های ثانویه در گیاهان تحت تنش‌های محیطی افزایش می‌یابد، بنابراین به نظر می‌رسد که گیاهان در تیمار شاهد به‌علت کمبود عناصر غذایی با تنش مواجه شده و درصد اسانس را در خود افزایش داده‌اند. اما کودهای آلی و بیولوژیک با قابلیت نگهداری بیشتر آب در خاک و فراهم نمودن عناصر غذایی، از مواجهه گیاه با تنش جلوگیری کرده، لذا درصد اسانس در این تیمارها در مقایسه با شاهد کمتر بود. از آنجاکه عملکرد اسانس تابع درصد اسانس و عملکرد دانه می‌باشد، لذا افزایش در هر کدام از این شاخص‌ها سبب افزایش عملکرد اسانس خواهد شد (Bigonah et al., 2015).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمارهای کودی در مرحله رویشی بر عملکرد اسانس گشنیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۹). مقایسه میانگین عملکرد اسانس مورد بررسی نشان داد که تیمار شیرابه کود دامی (۰/۰۳۳ کیلوگرم در

مترمربع) بیشترین تأثیر را بر عملکرد اسانس و بیشترین اختلاف را با شاهد (۶۳ درصد) داشت (جدول ۱۰). نتایج مطالعات اقحوانی شجری و همکاران (Aghhavan-Shajari et al., 2014) روی اثر کودهای آلی، شیمیایی و زیستی بر گیاه دارویی گشنیز نشان داد که بیشترین مقادیر درصد و عملکرد اسانس با مصرف منفرد کود گاوی حاصل شد و بیشترین عملکرد برگ در تیمار کود شیمیایی مشاهده گردید.

در مقایسه اثر کودهای ترکیبی، بیشترین میزان عملکرد اسانس به‌ترتیب مربوط به تیمار ترکیبی کود دامی + کود شیمیایی (۰/۰۱۹ کیلوگرم بر مترمربع)، تیمار ترکیبی کود شیمیایی + شیرابه کود دامی (۰/۰۱۶۹ کیلوگرم بر مترمربع) و در آخر تیمار ترکیبی کود دامی + شیرابه کود دامی (۰/۰۱۳۷ کیلوگرم بر مترمربع) بود (جدول ۱۰). مرادی و همکاران (Moradi et al., 2009) گزارش کردند که استفاده از کودهای آلی و بیولوژیکی مختلف موجب بهبود اسانس و شاخص‌های رشدی و عملکرد دانه گیاه رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill) شد. درزی و همکاران (Darzi et al., 2013) گزارش کردند که کودهای دامی باعث افزایش معنی‌دار عملکرد ماده خشک گیاه گشنیز و افزایش درصد اسانس، عملکرد اسانس و در نهایت عملکرد دانه این گیاه گردید. در مطالعه گیاه دارویی زوفا (*Hyssopus officinalis* L.) تحت عنوان اثر کودهای آلی و زیستی بر رشد، عملکرد و خصوصیات کیفی، کاربرد کودهای آلی و زیستی سبب افزایش عملکرد اسانس نسبت به شاهد گردید (Koocheki et al., 2008).

جدول ۸- مقایسه میانگین صفات زایشی زعفران تحت تأثیر تیمارهای کود آلی و شیمیایی

Table 8- Mean comparison of reproductive traits of coriander under organic and chemical fertilizer treatments

تیمار Treatment	تعداد دانه در هر بوته Number of seeds per plant	عملکرد دانه Seed yield (g m ⁻²)	تعداد شاخه‌های فرعی درجه ۱ Number of primary branches	تعداد شاخه‌های فرعی درجه ۲ Number of secondary branches	تعداد چتر در هر بوته Number of umbels per plant	تعداد چترک در هر بوته Number of umbellets per plant	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	وزن دانه در هر بوته Seed weight per plant (g)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	شاخص برداشت دانه Seed harvest index (%)
۱۰۰٪ کود شیمیایی 100% chemical fertilizer	952 b*	541 ^b	13.67 ^a	56 ^a	57 ^a	306 ^a	11.35 ^a	12.48 ^a	22.66 ^a	40.22 ^{bc}
۱۰۰٪ شیرابه کود دامی 100% slurry	1206 ^a	466 ^{cd}	12.67 ^{ab}	49 ^b	58.33 ^a	250 ^b	10.49 ^{bc}	11.85 ^a	64.33 ^{ab}	37.93 ^c
۱۰۰٪ کود دامی 100% animal manure	717 ^{cd}	431 ^d	10.67 ^b	45.33 ^{bc}	56 ^a	200 ^c	11.09 ^{ab}	7.58 ^c	66.67 ^a	47.78 ^{ab}
۵۰٪ کود دامی + ۵۰٪ شیرابه 50% animal manure + 50% slurry	700 ^{cd}	503 ^c	11 ^b	46.33 ^{bc}	36 ^{bc}	203 ^c	9.79 ^d	7.22 ^c	64.33 ^{ab}	39.59 ^c
۵۰٪ کود شیمیایی + ۵۰٪ شیرابه 50% chemical fertilizer + 50% slurry	800 ^c	451 ^d	10.67 ^b	35.33 ^{de}	33.44 ^b	160 ^d	10 ^{cd}	10.22 ^b	62.33 ^{ab}	45.28 ^{abc}
شیمیایی 50% animal manure + 50% chemical fertilizer	719 ^{cd}	641 ^a	12 ^{ab}	40.33 ^{cd}	40 ^{bc}	150 ^d	10.63 ^{bc}	7.24 ^c	59.33 ^{ab}	39.50 ^c
شاهد Control	641 ^d	464 ^d	10.67 ^b	29.67 ^e	31.67 ^c	103 ^e	11.12 ^{ab}	7.23 ^c	58 ^b	49.75 ^a

* Means sharing at least one common letter within each column are not significantly different at the 5% probability level according to Tukey's test.

جدول ۹- آنالیز واریانس (میانگین مربعات) درصد و عملکرد اسانس بخش رویشی گشنیز تحت تأثیر تیمارهای کود آلی و شیمیایی
Table 9- Analysis of variance (mean of squares) of essential oil content and yield of coriander vegetative parts as affected by organic and chemical fertilizer treatments

منابع متغیر S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد اسانس Essential oil yield	درصد اسانس Essential oil content
بلوک Block	2	0.573 ^{ns}	0.0020 ^{ns}
تیمار Treatment	6	145.83 ^{**}	0.0039 ^{**}
خطا Error	12	3.044	0.00016
ضریب تغییرات C.V (%)	-	34.1	24.4

ns و **: به ترتیب نشان دهنده غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال یک درصد.

ns and **: indicate non-significant and significant at 1% probability level, respectively.

جدول ۱۰- مقایسه میانگین درصد و عملکرد اسانس بخش رویشی گشنیز تحت تأثیر تیمارهای کود آلی و شیمیایی
Table 10- Mean comparison of essential oil content and yield of coriander vegetative parts as affected by organic and chemical fertilizer treatments

تیمار Treatment	عملکرد اسانس Essential oil yield (g m ⁻²)	درصد اسانس Essential oil content (%)
۱۰۰٪ کود شیمیایی 100% chemical fertilizer	20 ^{b*}	0.141 ^{bc}
۱۰۰٪ شیرابه کود دامی 100% slurry	33 ^a	0.217 ^a
۱۰۰٪ کود دامی 100% manure	130 ^c	0.114 ^c
۵۰٪ کود دامی + ۵۰٪ شیرابه کود دامی 50% manure + 50% slurry	137 ^c	0.113 ^c
۵۰٪ کود شیمیایی + ۵۰٪ شیرابه کود دامی 50% chemical fertilizer + 50% slurry	169 ^{bc}	0.128 ^{bc}
۵۰٪ کود دامی + ۵۰٪ کود شیمیایی 50% manure + 50% chemical fertilizer	194 ^b	0.163 ^b
شاهد Control	207 ^b	0.156 ^b

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون تفاوت معنی‌داری براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

* Means with the same letters in each column are not significantly different based on Tukey's test at 5% probability level.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که تیمارهای کودی به‌طور معنی‌داری بر تمامی خصوصیات ریخت‌شناختی و اجزای عملکرد و عملکرد گیاه دارویی گشنیز مؤثر بود. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار وزن تر و وزن خشک بوته مربوط به تیمار ترکیبی کود دامی + کود شیمیایی بود. همچنین بیشترین تعداد دانه در هر بوته و تعداد چتر در هر بوته در تیمار شیرابه کود دامی مشاهده شد. بیشترین تعداد چترک در هر بوته، تعداد شاخه‌های فرعی درجه ۱ و درجه ۲ و

یکی از تأثیرات مثبت کودهای آلی را شاید بتوان به بالا بردن عملکرد اسانس در گیاهان و تأثیر این کودها بر ویژگی‌های رشدی گیاه نسبت داد، به عبارتی، میزان نسبتاً بالای عملکرد در گیاهان تحت تأثیر تیمارهای آلی را می‌توان به دلیل تولید سطح برگ و ماده خشک بیشتر در اثر مصرف کودهای آلی نسبت داد (Tahami, 2010). به کارگیری کود آلی در گیاه رازیانه باعث افزایش عملکرد اسانس و درصد اسانس شد (Nada et al., 2022). در آزمایشی، کاربرد کود آلی و زیستی به جای کود شیمیایی در گیاه رازیانه باعث افزایش اسانس گیاه رازیانه در تیمارهای کود آلی و زیستی گردید (Azzaz et al., 2009).

ترکیبی کود دامی + کود شیمیایی، بیشترین میزان صفات کمی و کیفی گیاه گشنیز به دست آمد. استفاده از شیرابه کود دامی به عنوان جایگزین کود شیمیایی علاوه بر بهبود اغلب خصوصیات ریخت‌شناختی و عملکردی گشنیز، موجب کاهش مصرف کود شیمیایی به عنوان یکی از نهاده‌های پرهزینه می‌گردد. همچنین کاربرد این کود، رسیدن به اهداف کشاورزی پایدار را تسهیل می‌کند.

وزن دانه در هر بوته نیز در تیمار کود شیمیایی به دست آمد. همچنین بالاترین ارتفاع بوته مربوط به تیمار کود دامی بود. در مورد شاخص برداشت، بعد از شاهد بالاترین مقدار مربوط به تیمار کود دامی بود. نتایج همچنین نشان داد که تیمار شیرابه کود دامی بیشترین درصد اسانس و عملکرد اسانس را به خود اختصاص داد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که با استفاده از شیرابه کود دامی و کود

References

- Ahmed Mohamed, E. A., Muddathir, A. M., & Hassan Abdalla, A. (2020). Effects of organic and inorganic fertilization on growth, yield, seed fixed oil content, and fatty acids profile of garden cress (*Lepidium sativum* L.). *Applied Sciences*, 10(2), 2–9. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03562-9>
- Ahvazi, M., Rezvani Aghdam, A., & Habibi Khaniyani, B. (2010). Herbal Seeds: Morphology, Physiology, and Medicinal Properties (Vol. 1). Jihad Daneshgahi Publications, Tehran, Iran. (Original work published 1389), 236 p.
- Aghhavani-Shajari, M. (2012). Evaluation of quantitative and qualitative changes in coriander (*Coriandrum sativum* L.) in response to single and combined applications of fertilizer sources. (MSc. Thesis, Department of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian).
- Aghhavani Shajari, Rezvani Moghaddam, P., Ghorbani, R., & Nassiri Mahallati, M. (2014). Effects of organic, biological and chemical fertilizers on vegetative indices and essential oil content of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Agroecology*, 6(3), 425–443. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v6i3.43405>
- Aghhavani Shajari, M., Rezvani Moghaddam, P., Ghorbani, R., & Nassiri Mahallati, M. (2016). Effects of single and combined application of organic, biological and chemical l fertilizers on quantitative and qualitative yield of coriander (*Coriandrum sativum*). *Journal of Horticultural Science*, 29(4), 486–500. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v29i4.51510>
- Almasi, F. (2021). Organic fertilizer effects on morphological and biochemical traits and yield in coriander (*Coriandrum sativum* L.) as an industrial and medicinal plant. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 1(1), 19–23. <https://doi.org/10.22126/etic.2021.6476.1011>
- Amiri, M. B., Ghorbani, R., Jahan, M., & Ahyaee, H. R. (2013). Evaluation of some germination and seedling traits of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) seeds produced under biological and organic fertilizer applications in the field. *Iranian Journal of Crop Research*, 10(4), 649–658. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v10i4.20341>
- Assefa, S., & Tadesse, S. (2019). The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity: A review. *Agricultural Research and Technology*, 22(2), 46–50. <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2019.22.556192>
- Azzaz, N. A., Hassan, E. A., & Hamad, E. H. (2009). The chemical constituent and vegetative and yielding characteristics of fennel plants treated with organic and bio-fertilizer instead of mineral fertilizer. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(2), 579–587.
- Bastami, A., & Majidian, M. (2015). Effect of mycorrhiza, bio-phosphate fertilizer, and vermicompost on photosynthetic pigments and coriander yield. *Tolidat Giyahi (Scientific Journal of Agriculture)*, 38(4), 49–60. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/ppd.2016.11841>
- Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. (2016). Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
- Bigonah, R., Rezvani Moghaddam, P., & Jahan, M. (2015). Effects of different fertilizer managements on quantitative and qualitative characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) as a medicinal plant. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4), 574–581. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v12i4.45140>
- Darzi, M., Haj Seyed Hadi, M., & Rajali, F. (2013). Effect of cattle manure and growth-promoting bacteria on some morphologic traits and yield of coriander medicinal plant. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 28(3), 434–446. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2012.2945>
- Farrokhi, E., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Khademi, R. (2021). The effects of manure and biological and chemical fertilizers on yield and some morphological characteristics of *Aloe vera* (*Aloe burbadensis* Miller.) in Bushehr province. *Journal of Agroecology*, 13(3), 391–407. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v1i1.35204>
- Frick, H., Oberson, A., Cormann, M., Wettstein, H. R., Frossard, E., & Bunemann, K. (2022). Leached nitrate under fertilised loamy soil originates mainly from mineralisation of soil organic N. *Agriculture, Ecosystems &*

- Environment*, 338, 0167-8809. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108093>
16. Gholami Sharafkhane, E., Jahan, M., Bannayan Aval, M., Koocheki, A., & Rezvani Moghaddam, P. (2015). The effect of organic, biological and chemical fertilizers on yield, essential oil percentage and some agroecological characteristics of summer savoury (*Satureja hortensis* L.) under Mashhad conditions. *Journal of Agroecology*, 7(2), 179-189. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v7i2.50231>
17. Hasheminejad, A., & Bahadori, A. (2008). Identification of Medicinal and Aromatic Plants (1st Ed.). Farhikhtegan Daneshgah Publications. Tehran, Iran. 279 p. (Original work published 1387).
18. Hossain, A., & Ishimine, Y. (2007). Effects of farmyard manure on growth and yield of turmeric (*Curcuma longa* L.) cultivated in dark-red soil, red soil, and gray soil in Okinawa, Japan. *Plant Production Science*, 10(1), 146–150. <https://doi.org/10.1626/pp.s.10.146>.
19. Jeptoo, A., Aguyoh, J. N., & Saidi, M. (2013). Improving carrot yield and quality through the use of bio-slurry manure. *Sustainable Agriculture Research*, 2(1), 164–172. <https://doi.org/10.5539/sar.v2n1p164>.
20. Kaplan, M., Kocabas, I., Sonmez, I., & Kalkan, H. (2009). The effects of different organic manure applications on the dry weight and the essential oil quantity of sage (*Salvia fruticosa* Mill.). *Acta Horticulturae*, 826, 147–152.
21. Koocheki, A., Tabrizi, L., & Ghorbani, R. (2008). Effect of biofertilizers on agronomic and quality criteria of hyssop (*Hyssopus officinalis*). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(1), 127-137. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v6i1.1184>
22. Leithy, S., El-Meseiry, T. A., & Abdallah, E. F. (2006). Effect of biofertilizer, cell stabilizer, and irrigation regime on rosemary herbage oil quality. *Journal of Applied Sciences Research*, 2, 773–779.
23. Maerere, A. P., Kimbi, G. G., & Nonga, D. L. M. (2001). Comparative effectiveness of animal manures on soil chemical properties, yield, and root growth of *Amaranthus*. *African Journal of Science and Technology*, 1(4), 14–21. <https://doi.org/10.4314/ajst.v1i4.44623>
24. Malakouti, M. J. (2014). Optimal Fertilizer use Recommendations for Agricultural Products in Iran: Determining the amount, type, and timing of fertilizer use with the aim of relative self-sufficiency, ensuring community food security, and increasing farmers' income. Molabgan Publications. Tehran, Iran. 348 p.
25. Melero, S., Vanderlinden, K., Ruiz, J. C., & Madejón, E. (2008). Long-term effect on soil biochemical status of a vertisol under conservation tillage system in semi-arid Mediterranean conditions. *European Journal of Soil Biology*, 44(4), 437–442. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.06.003>
26. Mirjalili, A., Lebaschi, M. H., Ardakani, M. R., Heidari Sharifabad, H., & Mirza, M. (2021). Biochemical changes of Bakhtiari savory affected by organic fertilizer and plant density under dryland farming conditions. *Journal of Ethno-Pharmaceutical Products*, 2(2), 70–77. https://js.kgut.ac.ir/article_249132_8273e42bb4de11d39f37ab81f96f93ec.pdf
27. Moradi, R. A., Rezvani Moghaddam, P., & Nassiri Mahallati, M. (2009). Effects of biological and organic fertilizers on yield and yield components and quantity and quality of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) essential oil. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 7(2), 625–635. (In Persian).
28. Morales, F., Grasa, R., & Abadía, J. (1998). Iron chlorosis paradox in fruit tree. *Plant Nutrition*, 21, 815–825. <https://doi.org/10.1080/01904169809365444>
29. Nada, R. S., Ashmawi, A. E., Mady, E., Randhir, T. O., & Elateeq, A. A. (2022). Effect of organic manure and plant growth promoting microbes on yield, quality, and essential oil constituents of fennel bulb (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Journal of Ecological Engineering*, 23(5), 149–164. <https://doi.org/10.12911/22998993/147252>
30. Naim, A. H., Ahmed, K. M., & Ahmed, F. E. (2015). Effects of chicken manure on growth and yield of jute mallow (*Corchorus olitorius* L.) under rain-fed conditions of Sudan. *Open Access Library Journal*, 2, e2042. <https://doi.org/10.4236/oalib.1102042>.
31. Pande, V. V., Shastri, K. V., Khadse, C. D., Tekade, A. R., Tankar, A. N., & Jain, B. B. (2018). Assessment of indigenous knowledge of medicinal plants from Vidarbha region of Maharashtra. *International Journal of Green Pharmacy*, 2(2), Article 30.
32. Rasouli, F., Nasiri, Y., Asadi, M., Hassanpour Aghdam, M. B., Golestaneh, S., & Pirsarandib, Y. (2022). Fertilizer type and humic acid improve the growth responses, nutrient uptake, and essential oil content on *Coriandrum sativum* L. *Scientific Reports*, 12, 7437. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11555-4>
33. Razavi Khorasan Meteorological and Climate Center. (2021). Meteorological Data. Iranian Meteorological Organization, Mashhad, Iran. (In Persian)
34. Rezvani Moghaddam, P., Bakhshaei, S., Amin Ghafouri, A., & Jafari, R. (2012). Effects of different fertilizer managements on production of savory medicinal plant under Mashhad conditions. *Iranian Journal of Crop Research*, 12(1), 27–33. (In Persian).
35. Saydi, Z., Fateh, A., & Ayneband, A. (2016). Effect of nitrogen and organic fertilizers on soil properties and essential oil characteristics of ajowan (*Carum capticum*). *Journal of Crop Production*, 9(2), 175–192. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2016.3122>
36. Sharma, D. P., Sharma, T. R., Agrawal, S. B., & Rawat, A. (2003). Differential response of turmeric to organic and inorganic fertilizers. *JNKVV Research Journal*, 37(2), 17–19.

37. Tavasoli, A., Ghanbari, A., Ahmadi, M. M., & Heydari, M. (2010). The effect of fertilizer and manure on forage and grain yield of millet (*Panicum miliaceum*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) in intercropping. *Iranian Journal of Crop Research*, 8(2), 203–212. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i2.7518>
38. Tahami, M. K. (2010). Evaluation of the effects of organic, biological, and chemical fertilizers on yield, yield components, and essential oil of basil (*Ocimum basilicum* L.). MSc. Thesis, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian).
39. Turan, M. A., Elkarim, A. H. A., Taban, N., & Taban, S. (2009). Effect of salt stress on growth, stomatal resistance, proline and chlorophyll concentrations on maize plant. *African Journal of Agricultural Research*, 4, 893–897.
40. Zare Feizabadi, A., Jamali, S. M., Taheri, G., & Khazaei, H. (2012). Combined effect of vermicompost and biological materials on quantitative traits of bread wheat. *Journal of Ecological Agriculture*, 1(2), 65–76. (In Persian).



Research Article

Vol. 24, No. 3, Fall 2026, p. 315-329

Enhancing Quinoa (*Chenopodium quinoa*) Growth and Yield Through Seed Pretreatment and Foliar Application of Serine and Glutamine

R. Rabei¹, M. Baradaran Firouzabadi^{1*}, M. Heidari¹

1- Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(*- Corresponding author's Email: m.baradaran.f@gmail.com)**How to cite this article:**

Received: 18 September 2025

Revised: 12 November 2025

Accepted: 1 February 2026

Available Online: 12 May 2026

Rabei, R., Baradaran Firouzabadi, M., & Heidari, M. (2026). Enhancing quinoa (*Chenopodium quinoa*) growth and yield through seed pretreatment and foliar application of serine and glutamine. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 315-329. (In Persian)<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.95496.1425>

Introduction

One way to increase seed yield of plants is to use amino acids as biostimulants and growth regulators. Amino acids are the main components of proteins. About 20 types of important amino acids are involved in the synthesis of proteins in the cell. Amino acids play essential roles in plant metabolism, growth, and development. Among them, glutamine is particularly important because it serves as a key intermediate linking carbon and nitrogen metabolism. It also functions as a major nitrogen donor and precursor for the biosynthesis of several amino acids and other nitrogen-containing compounds, thereby contributing to numerous physiological and metabolic processes in plants. Another amino acid that can lead to improved performance in plants under stress and non-stress conditions is serine. The amino acid serine is essential for some cellular processes, including protein synthesis and some amino acids such as glycine, cysteine and methionine in plants. In order to investigate the effect of amino acids on improving quinoa (*Chenopodium quinoa*) grain yield, an experiment was conducted in 2013 in the laboratory and research farm of the Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a factorial arrangement in a randomized complete block design with three replications. The treatments consisted of two factors: seed pretreatment and foliar application. Seed pretreatment was applied at four levels: no pretreatment, distilled water, serine, and glutamine, with serine and glutamine applied at a concentration of 200 mg L⁻¹. Foliar application was also performed at four levels: distilled water (control), serine, glutamine, and a combination of serine and glutamine, each applied at a concentration of 200 mg L⁻¹. Pretreatment of seeds with the above-mentioned substances and concentrations was carried out for three hours, observing the principles of seed aeration. After that, the seeds were dried in the shade and used to continue the experiment and measure the traits. Foliar application with the desired concentrations was carried out before flowering of the plant under suitable conditions so that the leaves were completely wet. Two weeks after foliar application, the measurement of the traits began.

Results and Discussion

The results showed that foliar application of glutamine alone and combined application of serine and glutamine resulted in a significant increase of 7.41 and 8.58 percent in relative leaf water content compared to the control, respectively. Four treatment combinations, pretreatment and application with serine, pretreatment and application with glutamine, pretreatment with serine application with serine and glutamine, pretreatment

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.95496.1425>

with glutamine and application with these two substances increased the weight of 1000 grains in the range of 10.27 to 12.20 percent and increased the number of grains in the panicle in the range of 9.10 to 11.97 percent. Combined foliar application of serine and glutamine as well as application of glutamine and serine alone resulted in an increase of 0.82, 0.59, and 0.52 percent in grain protein, respectively. The highest seed yield was obtained with the application of pretreatment and foliar application of serine, pretreatment and foliar application of glutamine and pretreatment with glutamine along with combined foliar application of serine and glutamine, which showed an increase of 30.52, 30.91, and 31.02 percent compared to the control, respectively.

Conclusion

Finally, within the scope of the research conducted, the use of pretreatment of seeds with serine and glutamine along with foliar application of these two substances is recommended to increase protein and seed yield of quinoa. When each of these two amino acids was used as a pretreatment and foliar application, they showed a greater effect on the aforementioned traits. Among the four foliar application treatments, the combined application of serine and glutamine performed better. Finally, within the scope of this study, the use of the two amino acids serine and glutamine (200 mg L^{-1}) as foliar application is recommended to improve protein content and quinoa seed yield.

Keywords: Grain protein, Lipid peroxidation, 1000-seed weight

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص ۳۱۵-۳۲۹

بهبود رشد و عملکرد گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa*) از طریق پیش تیمار بذر و

محلول پاشی با اسیدهای آمینه سرین و گلوتامین

ریحانه رباعی^۱، مهدی برادران فیروزآبادی^{۱*}، مصطفی حیدری^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

چکیده

به منظور بررسی تأثیر اسیدهای آمینه بر بهبود پروتئین و عملکرد دانه کینوا (*Chenopodium quinoa*)، آزمایشی طی سال ۱۴۰۲ در آزمایشگاه و مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود اجرا گردید. این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل پیش تیمار بذر در چهار سطح (صفر (عدم پیش تیمار)، آب مقطر، سرین و گلوتامین هر کدام با غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر) و محلول پاشی برگ در چهار سطح (شاهد (آب مقطر)، سرین، گلوتامین، ترکیب توأم سرین و گلوتامین هر کدام با غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر) بود. پیش تیمار بذور با مواد و غلظت‌های یادشده با رعایت اصول هوادهی بذر به مدت سه ساعت و محلول پاشی برگ قبل از گل دهی گیاه در شرایط مناسب انجام شد. نتایج نشان داد که اسیدهای آمینه ضمن کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و بهبود وضعیت آب برگ سبب افزایش عملکرد شدند. پیش تیمار و محلول پاشی با سرین، پیش تیمار و محلول پاشی با گلوتامین، پیش تیمار با سرین به همراه محلول پاشی توأم سرین و گلوتامین، پیش تیمار با گلوتامین و محلول پاشی توأم این دو ماده موجب افزایش وزن هزار دانه در محدوده ۱۰/۲۷ تا ۱۲/۲۰ درصد و افزایش تعداد دانه در خوشه در محدوده ۹/۱۰ تا ۱۱/۹۷ درصد گردیدند. محلول پاشی توأم سرین و گلوتامین و هم چنین محلول پاشی گلوتامین و سرین به تنهایی به ترتیب منجر به افزایش ۰/۸۲، ۰/۵۹ و ۰/۵۲ درصدی پروتئین دانه شدند. بیشترین عملکرد دانه مربوط به کاربرد پیش تیمار و محلول پاشی سرین، پیش تیمار و محلول پاشی گلوتامین و پیش تیمار با گلوتامین به همراه محلول پاشی توأم سرین و گلوتامین بود که به ترتیب نسبت به شاهد افزایش ۳۰/۵۲، ۳۰/۹۱ و ۳۱/۰۲ درصدی را نشان دادند. در نهایت در محدوده پژوهش انجام شده، کاربرد پیش تیمار بذرها با سرین و گلوتامین به همراه محلول پاشی برگ توأم این دو ماده جهت افزایش پروتئین و عملکرد دانه کینوا توصیه می گردد.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداسیون لیپیدها، پروتئین دانه، وزن هزار دانه

مقدمه

محرك‌های زیستی و تنظیم کننده‌های رشد است. اسیدهای آمینه از اجزای اصلی پروتئین‌ها می باشند. حدود ۲۰ نوع اسید آمینه مهم در سنتز پروتئین‌ها در سلول درگیر هستند. اسیدهای آمینه می توانند تأثیر بسیار مهمی بر فعالیت‌های حیاتی و ساختارهای گیاهی داشته باشند (EL-Zefzafy et al., 2016). ثابت شده است که اسیدهای آمینه به عنوان منبعی از نیتروژن در سنتز هورمون‌های رشد نقش دارند و جزء مهم ترین متابولیت‌های اولیه محسوب می شوند (Rouphael & Colla, 2018). مقدار و کیفیت اسیدهای آمینه موجود در گیاهان زراعی بر کمیت و کیفیت محصول تأثیر گذار است. اسیدهای آمینه بعد از ورود به سلول‌های گیاهی، به دلیل خلوص بالایی که دارند به سادگی توسط گیاه جذب می گردند و موجب می شوند که انرژی گیاه برای

کینوا (*Chenopodium quinoa*) یکی از مهم ترین گیاهان زراعی از خانواده تاج خروس است که ارزش غذایی بالایی دارد و با شرایط آب و هوایی مختلف سازگار می باشد. کینوا به دلیل ارزش غذایی بالا، می تواند به عنوان مکمل مناسبی برای غلات در رژیم غذایی انسان مورد استفاده قرار گیرد (Prager et al., 2018). یکی از راه های افزایش عملکرد در گیاهان، استفاده از اسیدهای آمینه به عنوان

۱- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: m.baradaran.f@gmail.com)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.95496.1425>

مقابله با تنش‌های محیطی ذخیره گردد (Elshamly et al., 2024). به‌طور کلی می‌توان این‌طور بیان کرد که اسیدهای آمینه موادی هستند که موجب تحریک سوخت‌وساز و فرآیندهای متابولیکی گیاه در جهت افزایش کارایی آن‌ها می‌شوند (Bashir et al., 2018).

یکی از انواع اسیدهای آمینه مهم در گیاهان، گلوتامین است. گلوتامین با دو چرخه مهم متابولیکی یعنی چرخه کربن و چرخه نیتروژن در گیاهان در ارتباط می‌باشد. گلوتامین پیش‌ماده برخی اسیدهای آمینه از جمله اسید آسپارتیک، سرین، آلانین، لیزین و پرولین می‌باشد (Hussain et al., 2018). گلوتامین، آرژنین و آسپارژین، اسیدهای آمینه اصلی هستند که در بسیاری از واکنش‌های متابولیکی و بیوشیمیایی در گیاهان از جمله سم‌زدایی سموم و خنثی کردن H^+ تولیدشده در گیاهان تغذیه‌شده با آمونیوم نقش دارند (Noroozlo et al., 2019). گلوتامین، شایع‌ترین نوع گوگرد آلی در گیاهان است و به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان مهم در سیستم دفاعی گیاهان ایفای نقش می‌کند. گلوتامین یک ترکیب تری‌پپتید مهم با ساختارهای اسیدهای آمینه گلايسين، سيستئين و اسيد گلوتاميك است که همراه با آنزیم‌های گلوتامین ردوکتاز و پراکسیداز در چرخه آسدا-هالیول نقش ایفا می‌کند (Kao, 2015). پژوهش‌ها نشان داده است که با استفاده از محلول‌پاشی اسید آمینه گلوتامین می‌توان مخزن گلوتامین در گیاهان را تقویت کرد و بدین ترتیب گیاهان را در برابر تنش‌ها مقاوم کرد (Noroozlo et al., 2019).

یکی دیگر از اسیدهای آمینه که در گیاهان می‌تواند منجر به بهبود عملکرد در شرایط تنش و عدم تنش شود، سرین است. اسید آمینه سرین، برای برخی از فرآیندهای سلولی از جمله ساخت پروتئین و بعضی از اسیدهای آمینه مانند گلايسين، سيستئين و متيونين در گیاهان ضروری است (Rosa-Tellez et al., 2023). دو مسیر برای بیوسنتز سرین در گیاهان وجود دارد. مسیر اول، مسیر گلیکولات در تنفس نوری است که مهم‌ترین مسیر در نظر گرفته می‌شود. مسیر دیگر شامل مسیر فسفریله می‌باشد (Ros et al., 2014). سیستئین، اسید آمینه‌ای با ساختار گوگرد است که پیش‌ساز آن اسید آمینه سرین است. این ماده بیشتر در سیتوسول تشکیل و ذخیره می‌شود و هم‌چنین در کلروپلاست‌ها و میتوکندری نیز یافت می‌شود. این مولکول نقش اصلی را در سم‌زدایی دارد و نقش مهمی در ظرفیت اکسیداتیو و ارتباط مستقیم با مقاومت گیاه دارد (Romero et al., 2014). محققان دریافته‌اند که کاربرد خارجی گلوتامین و سرین موجب افزایش کلروفیل برگ، وزن خشک اندام هوایی، شاخص پایداری غشاء سلول، میزان نیتروژن موجود در گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) گردید (Sharif Zade Ehteshami & Danaee, 2023). محلول‌پاشی سرین روی گیاه گندم (*Triticum aestivum*) موجب افزایش کلروفیل، کاروتنوئید، اجزای عملکرد و عملکرد دانه شد و اثرات تنش خشکی را به‌طور معنی‌داری کاهش داد (Hameed et al., 2023).

(2023).

با توجه به نقش کلیدی اسیدهای آمینه در متابولیسم نیتروژن، تنظیم وضعیت آبی، کاهش تنش اکسیداتیو و بهبود اجزای عملکرد، هدف از این تحقیق، بررسی اثرات پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی برگ با اسیدهای آمینه سرین و گلوتامین، به‌صورت جداگانه و توأم، بر بعضی از صفات فیزیولوژیکی (محتوای نسبی آب برگ، مالون‌دی‌آلدئید، کلروفیل کل و کربوهیدرات‌های محلول)، صفات کیفی (پروتئین دانه)، اجزای عملکرد و عملکرد دانه گیاه کینوا در شرایط مزرعه‌ای بود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود روی گیاه کینوا رقم صدوق، با قابلیت جوانه‌زنی سریع و استقرار اولیه مناسب اجرا شد. این رقم زودرس، دارای سرعت جوانه‌زنی و استقرار اولیه مناسب بوده و از تحمل نسبی به شوری برخوردار است. تیمارهای آزمایش شامل پیش‌تیمار بذر با اسیدهای آمینه در چهار سطح (صفر (عدم پیش‌تیمار)، آب مقطر، سرین و گلوتامین هرکدام با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و محلول‌پاشی برگ اسیدهای آمینه در چهار سطح (شاهد (آب مقطر)، سرین، گلوتامین، ترکیب توأم سرین و گلوتامین هرکدام با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. شرایط آب‌وهوایی و خاک منطقه آزمایش، به‌ترتیب در جدول ۱ و ۲ گزارش شده است.

پیش‌تیمار بذر با مواد و غلظت‌های یادشده، با رعایت اصول هوادهی بذر به مدت سه ساعت انجام شد. پس از آن، بذر در سایه خشک و سپس در تاریخ ۲۰ مرداد ۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود کشت گردید. پیش از کاشت، زمین یک بار شخم عمیق به‌عمق حدود ۳۰ سانتی‌متر و سپس یک بار دیسک زده شد. پس از تسطیح و یکنواخت‌سازی سطح، کرت‌بندی انجام گرفت و بستر بذر به‌صورت یکنواخت آماده‌سازی شد تا استقرار یکنواخت گیاهچه‌ها تضمین گردد.

در مجموع، ۴۸ کرت آزمایشی وجود داشت که در هر کرت چهار خط کاشت به‌طول پنج متر، با فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف پنج سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آبیاری در طول فصل رشد به‌فاصله هفت روز یک بار انجام گرفت. این تناوب آبیاری براساس شرایط اقلیمی منطقه شاهرود، که دارای اقلیم نیمه‌خشک با میانگین دمای روزانه ۲۸ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد و تبخیر بالا است، و همچنین براساس نیاز آبی گیاه کینوا در خاک‌های لوم شنی منطقه تعیین گردید؛ به‌گونه‌ای که ضمن تأمین رطوبت کافی، از

قطع و پس از خشک شدن در سایه، صفات کمی و کیفی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

برای بررسی خالص اثر پیش تیمار بذر و محلول پاشی اسیدهای آمینه، در طول فصل رشد هیچ گونه کود شیمیایی به مزرعه اضافه نشد. تغذیه گیاه صرفاً براساس حاصل خیزی اولیه خاک انجام گرفت (جدول ۱).

تجزیه و تحلیل آماری داده ها با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. برای بررسی اثر تیمارها از تجزیه واریانس براساس طرح بلوک های کامل تصادفی به صورت فاکتوریل استفاده گردید. مقایسه میانگین ها با آزمون حداقل اختلاف معنی دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel انجام گرفت.

غرق آبی و کمبود اکسیژن در ناحیه ریشه جلوگیری شود. وجین علف های هرز به صورت دستی و به طور پیوسته در طول فصل رشد انجام شد.

محلول پاشی برگی با غلظت های مورد نظر، پیش از گل دهی (۶۰ روز پس از کاشت) و در ساعات عصر (حدود ساعت ۵ بعد از ظهر) در شرایط مناسب محیطی شامل دمای ۲۵ تا ۲۸ درجه ی سانتی گراد، سرعت باد کمتر از پنج کیلومتر بر ساعت و رطوبت نسبی حدود ۵۵ تا ۶۰ درصد انجام شد؛ به گونه ای که سطح برگ ها به طور کامل خیس شدند. برای این منظور از سم پاش پشتی دستی با نازل مخروطی ریزپاش استفاده گردید.

دو هفته پس از انجام محلول پاشی، اندازه گیری صفات مورد بررسی آغاز شد و برداشت نهایی در تاریخ ۱۰ آبان ۱۴۰۳ انجام گرفت. در زمان برداشت، گیاهان هر کرت به طور کامل از سطح زمین

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 1- Physico-chemical properties of the experimental soil

بافت	اسیدیته	هدایت الکتریکی	کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر	پتاسیم
Texture	pH	EC (dS m ⁻¹)	Organic carbon (%)	N (%)	P (%)	K (%)
لوم سیلتی Silty loam	7.36	0.71	0.60	0.066	5.54	240

جدول ۲- داده های هواشناسی منطقه در سال مورد آزمایش (اداره هواشناسی استان سمنان)

Table 2- Meteorological data for the field sites during experiment (Semnan province Meteorological Office)

ماه	بارندگی	رطوبت نسبی	میانگین حداکثر دما	میانگین حداقل دما	میانگین دما
Month	Precipitation (mm)	Relative humidity (%)	Mean maximum temperature (°C)	Mean minimum temperature (°C)	Mean temperature (°C)
فروردین April	35.8	42	22.8	7.2	15
اردیبهشت May	5.8	37	28.3	12.1	20.2
خرداد June	1.7	36	34.7	17.5	26.1
تیر July	0.0	30	42.3	20.4	31.4
مرداد August	0.0	28	42.5	19.8	31.1
شهریور September	0.0	32	35.9	14.7	25.3
مهر October	3.3	33	29.5	9.0	19.3
آبان November	5.8	38	24.4	3.8	14.1

نتایج و بحث

نگرفتند (جدول ۳). ولی محتوای نسبی آب برگ به طور معنی داری تحت تأثیر محلول پاشی با اسیدهای آمینه ($P < 0.05$) قرار گرفت (جدول ۳). محلول پاشی گلوتامین به تنهایی و کاربرد توأم سرین و

ارتفاع و قطر ساقه کینوا تحت تأثیر تیمارهای آزمایش قرار

گلوتامین به ترتیب منجر به افزایش معنی دار ۷/۴۱ و ۸/۵۸ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به شاهد گردید (شکل ۱). محققان اعلام کردند که سرین و گلوتامین به عنوان اسمولیت های آلی در سلول های گیاهی عمل می کنند. این مواد باعث کاهش پتانسیل آب سلول می شوند و به جذب و حفظ آب کمک می کنند (Sadak et al., 2015). گلوتامین در تنظیم متابولیسم نیتروژن و سرین در تنظیم مسیرهای متابولیکی (مانند فتوسنتز و تنفس) نقش دارند. این بهینه سازی متابولیکی باعث کارآمدی بیشتر در مصرف آب می شود (Li et al., 2025).

مالون دی آلدئید تحت تأثیر پیش تیمار، محلول پاشی و برهم کنش دوجانبه عامل ها قرار گرفت (جدول ۳). بررسی برهم کنش دوجانبه پیش تیمار و محلول پاشی نشان داد که کمترین میزان مالون دی آلدئید مربوط به چهار ترکیب تیماری شامل پیش تیمار بذری با سرین به همراه محلول پاشی سرین و محلول پاشی توأم سرین و گلوتامین، پیش تیمار بذری با گلوتامین به همراه محلول پاشی گلوتامین و محلول پاشی توأم سرین و گلوتامین بود. سایر ترکیبات تیماری از لحاظ میزان مالون دی آلدئید اختلافی با شاهد نشان ندادند (شکل ۲).

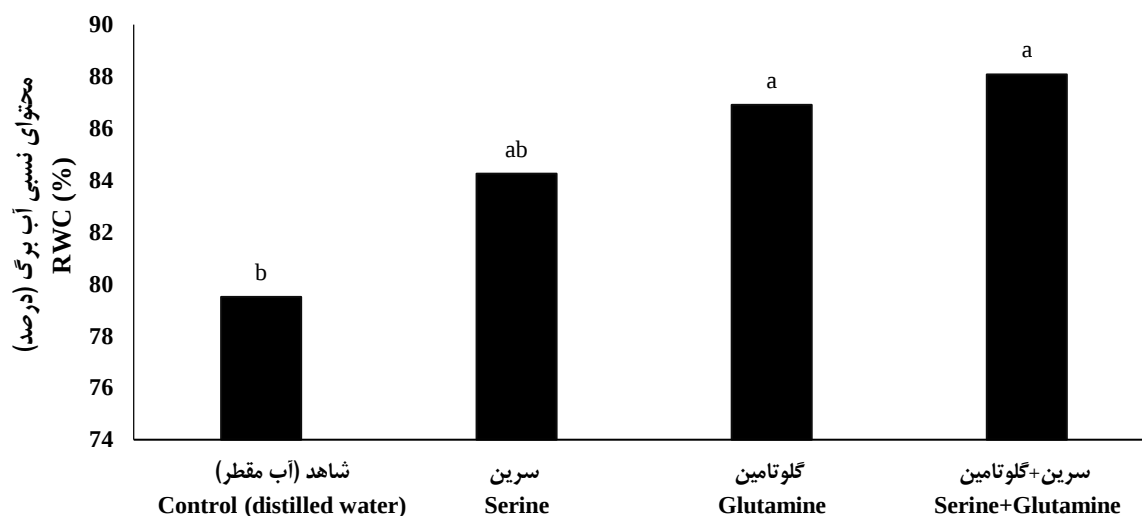
در شرایط بدون تنش، دلیل کاهش میزان مالون دی آلدئید با کاربرد سرین و گلوتامین می تواند به بهبود وضعیت آنتی اکسیدانی و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها در سلول های گیاهی مرتبط باشد. این اسیدهای آمینه از طریق افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان، تثبیت غشاهای سلولی و کمک به تعادل متابولیسم نیتروژن، نقش مؤثری در کاهش تنش اکسیداتیو و حفظ ساختار سلولی ایفا می کنند (Ali et al., 2024). محققان اعلام کردند که کاربرد سرین و گلوتامین موجب افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز می شوند. این آنزیم ها با حذف رادیکال های آزاد اکسیژن، مانع از آسیب به لیپیدهای غشاء سلولی و در نتیجه تولید مالون دی آلدئید می گردند (Jahanbani et al., 2024). سرین جزء پیش سازهای مهم در مسیر سنتز فسفولیپیدها و گلوکاتینون محسوب می شود. این ترکیبات به حفظ ساختار غشاها و کاهش آسیب اکسیداتیو کمک می کنند و در نتیجه میزان مالون دی آلدئید تولیدشده کمتر می شود (Zimmermann et al., 2021).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات اندازه گیری شده در کینوا تحت تأثیر پیش تیمار و محلول پاشی با سرین و گلوتامین
Table 3- Variance analysis (mean of squares) of traits measured in quinoa affected by pretreatment and foliar application with Serine and Glutamine

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع ساقه Stem height	قطر ساقه Stem diameter	محتوای نسبی آب برگ RWC	مالون دی آلدئید MDA	کربوهیدرات های محلول برگ Leaf soluble carbohydrate	کلروفیل کل Total chlorophyll	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	پروتئین دانه Grain protein	تعداد دانه در خوشه Number of grain in panicle	تعداد خوشه در بوته Number of panicles per plant	وزن هزار دانه 1000 grain weight	عملکرد دانه Grain yield
تکرار Replication	2	348.25 _{ns}	0.75 _{ns}	129.00 _{ns}	0.008 _{ns}	0.004 _{ns}	0.0008 _{ns}	83633.25 _{ns}	0.63 _{ns}	19.18 _{ns}	0.87 _{ns}	0.013 _{ns}	7321.46 _{ns}
پیش تیمار (A)	3	41.83 _{ns}	0.75 _{ns}	25.18 _{ns}	0.041*	0.01*	0.001 _{ns}	25048.38 _{ns}	0.10 _{ns}	18.77*	0.09 _{ns}	0.054**	182948.30**
محلول پاشی (B)	3	26.88 _{ns}	0.52 _{ns}	174.40*	0.12**	0.029**	0.018**	12536.50 _{ns}	1.45**	74.05**	0.12 _{ns}	0.066**	363388.86**
تیمار × پاشی A×B	9	11.27 _{ns}	1.12 _{ns}	16.46 _{ns}	0.03*	0.002 _{ns}	0.026**	1657.70 _{ns}	0.07 _{ns}	40.68**	0.06 _{ns}	0.027**	130862.03**
خطا Error	30	97.56	1.12	50.31	0.012	0.003	0.0005	62771.75	0.10	4.16	0.50	0.005	29387.62
ضریب تغییرات C.V (%)	-	8.64	9.33	8.37	11.31	1.47	1.33	5.85	2.16	2.85	5.	2.62	6.85

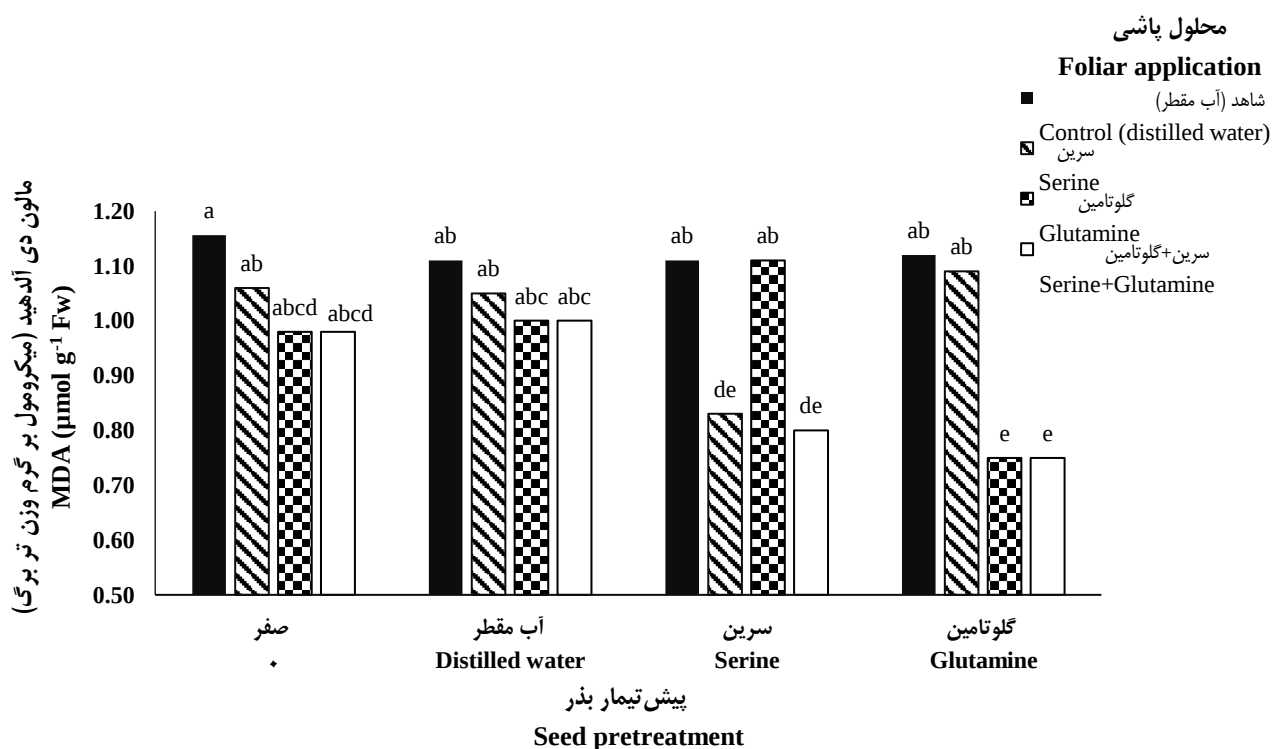
* و **: به ترتیب بیانگر معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشد.

* and **: indicate statistical significance at the 5% and 1% probability levels, respectively.



محلول پاشی
Foliar application

شکل ۱- مقایسه میانگین اثر محلول پاشی اسیدهای آمینه بر محتوای نسبی آب برگ کینوا
Figure 1- Mean comparison of amino acids foliar application on RWC of quinoa
ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند
Columns with the same letter are not significantly different based on the LSD test ($P \leq 0.05$).

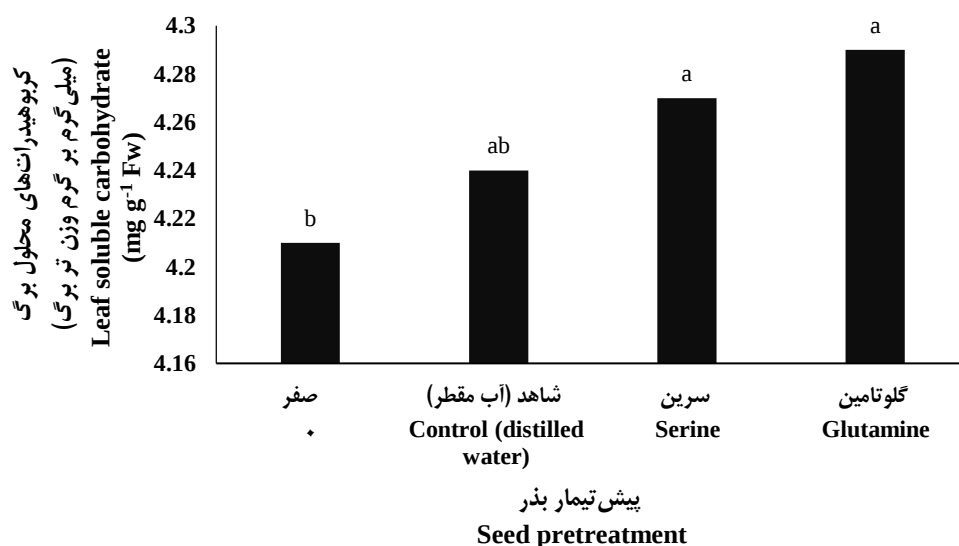


شکل ۲- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش پیش تیمار بذر و محلول پاشی اسیدهای آمینه بر مالون‌دی‌آلدئید
Figure 2- Mean comparison of interaction of seed pretreatment and foliar application of amino acids on MDA

نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر محلول‌پاشی و برهم‌کنش دوجانبه عامل‌ها بر کلروفیل برگ معنی‌دار شد (جدول ۳). تمامی ترکیبات تیماری به‌جز دو ترکیب تیماری پیش‌تیمار با آب مقطر بدون محلول‌پاشی و پیش‌تیمار با سرین بدون محلول‌پاشی منجر به افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل کل نسبت به شاهد شدند. بیشترین میزان کلروفیل کل مربوط به پیش‌تیمار بذری با گلوتامین به همراه محلول‌پاشی توأم سرین و گلوتامین بود که معادل ۱/۷۸ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ بود و نسبت به شاهد افزایش ۹/۲۰ درصدی را نشان داد که البته این ترکیب با سه ترکیب تیماری دیگر شامل پیش‌تیمار با گلوتامین و محلول‌پاشی با گلوتامین، پیش‌تیمار با سرین به همراه محلول‌پاشی با سرین و محلول‌پاشی توأم سرین و گلوتامین از لحاظ میزان کلروفیل کل اختلاف معنی‌دار نداشت (شکل ۵). نقش این اسیدآمینه در متابولیسم نیتروژن مرتبط باشد. از آن‌جایی که نیتروژن، عنصر اصلی در ساختار کلروفیل (به‌ویژه حلقه پورفیرین) است، افزایش آن منجر به افزایش میزان کلروفیل در برگ گیاهان می‌گردد (Svietlova et al., 2024). مشخص شده است که کاربرد سرین و گلوتامین با افزایش دسترسی نیتروژن آلی، تحریک سنتز کلروفیل و کاهش تخریب ناشی از تنش‌های اکسیداتیو موجب افزایش میزان کلروفیل کل در برگ گیاه می‌شوند. این اسیدهای آمینه همچنین با حفظ ساختار کلروپلاست و افزایش سنتز پروتئین‌های فتوسنتزی، کارایی فتوسنتز را بهبود می‌بخشند (Ramyar et al., 2023).

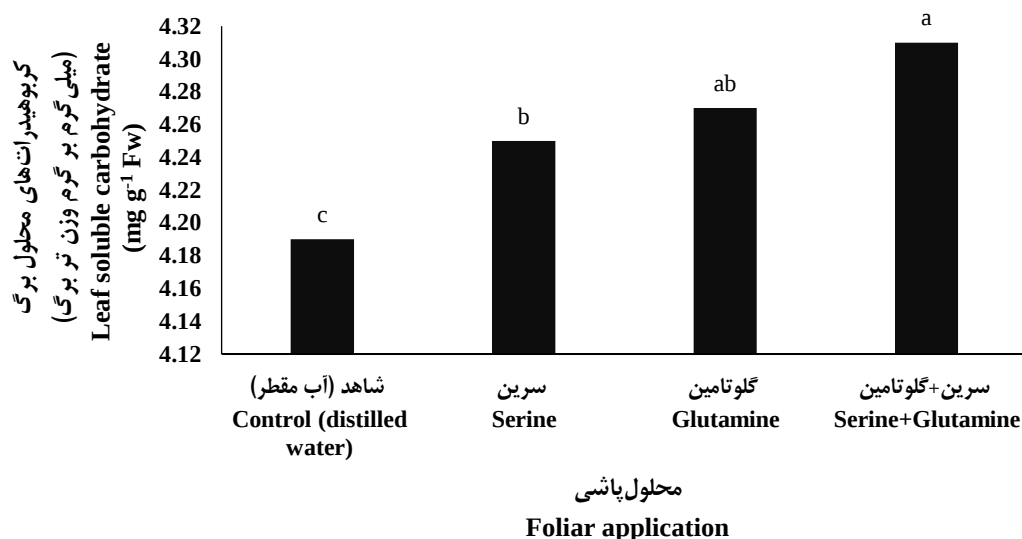
کربوهیدرات‌های محلول برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر پیش‌تیمار و محلول‌پاشی قرار گرفت (جدول ۳). همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، پیش‌تیمار بذری با سرین و گلوتامین به‌ترتیب منجر به افزایش معنی‌دار ۱/۴۲ و ۱/۹۰ درصدی میزان کربوهیدرات‌های محلول برگ نسبت به شاهد گردید که البته با آب مقطر اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۳).

بررسی محلول‌پاشی اسیدهای آمینه بر میزان کربوهیدرات محلول برگ نیز نشان داد که استفاده از سرین، گلوتامین و کاربرد توأم این دو ترکیب منجر به افزایش معنی‌دار میزان قندهای محلول برگ گردید (شکل ۴). کربوهیدرات‌های محلول، یکی از مهم‌ترین مواد در تنظیم پتانسیل اسمزی در سلول گیاهی هستند. کاربرد اسیدهای آمینه ممکن است باعث ایجاد تغییر در پتانسیل آب سلول و تحریک تولید قندهای محلول برای حفظ تعادل اسمزی شود. اسیدهای آمینه گلوتامین و سرین نقش مهمی در افزایش متابولیسم نیتروژن دارند که به‌نوبه خود بر سنتز و تجمع قندهای محلول تأثیر می‌گذارد. محلول-پاشی اسیدهای آمینه مانند گلوتامین و سرین می‌تواند کارایی فتوسنتزی و فعالیت آنزیمی گیاه را بهبود بخشد و منجر به افزایش محتوای قند شود. این فرآیند برای رشد و نمو گیاهان به‌ویژه در شرایط تنش مفید است، زیرا قندهای محلول نیز به‌عنوان مولکول‌های سیگنال و منابع انرژی عمل می‌کنند (Ismail et al., 2024). کاربرد گلوتامین و سرین می‌تواند از طریق بهبود متابولیسم، تحریک فتوسنتز، تنظیم تعادل اسمزی و یا نقش‌های سیگنالی باعث افزایش قندهای محلول در برگ گیاه شود. این اثر ممکن است به شرایط گیاه، نوع گیاه، میزان مصرفی و نحوه کاربرد نیز وابسته باشد (Salinas et al., 2019).

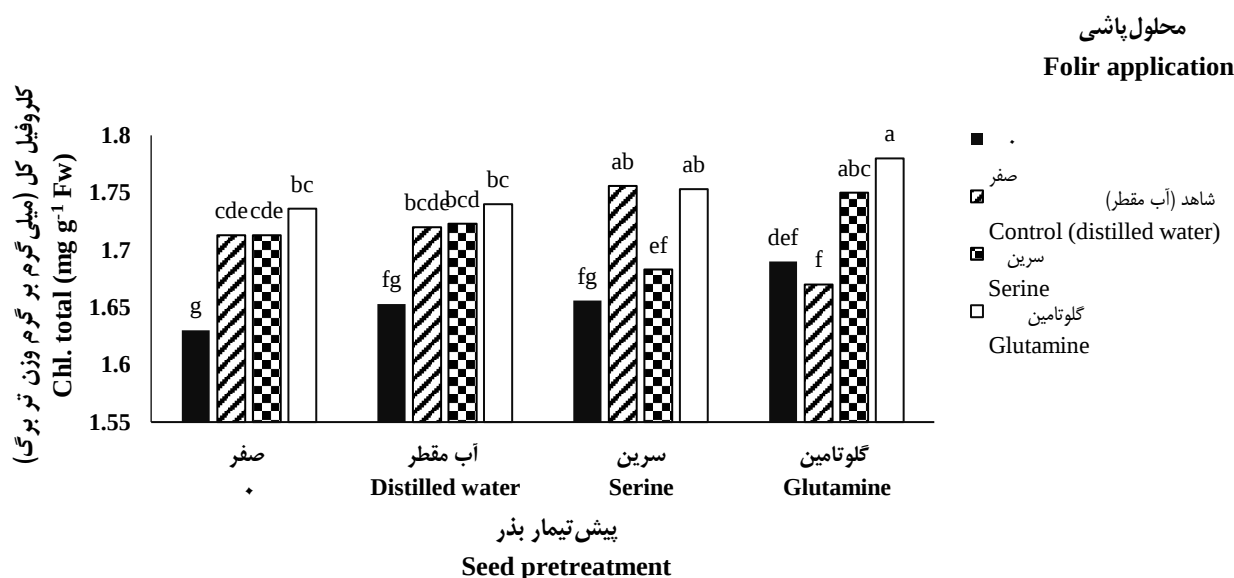


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر پیش‌تیمار بذر با اسیدهای آمینه بر کربوهیدرات‌های محلول برگ

Figure 3- Mean comparison of seed pretreatment with amino acids on leaf soluble carbohydrate



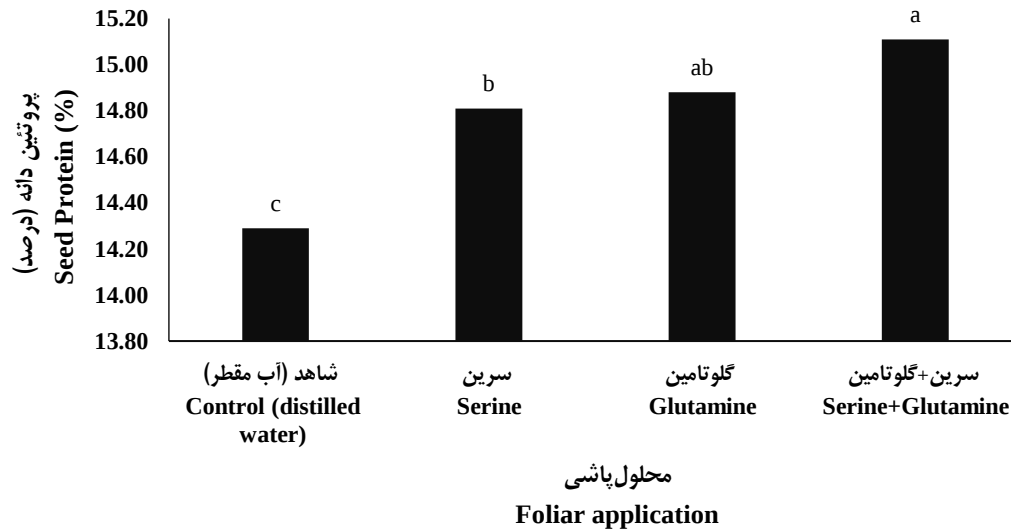
شکل ۴- مقایسه میانگین اثر محلول پاشی اسیدهای آمینه بر کربوهیدرات‌های محلول برگ
Figure 4- Mean comparison of amino acids foliar application on leaf soluble carbohydrate



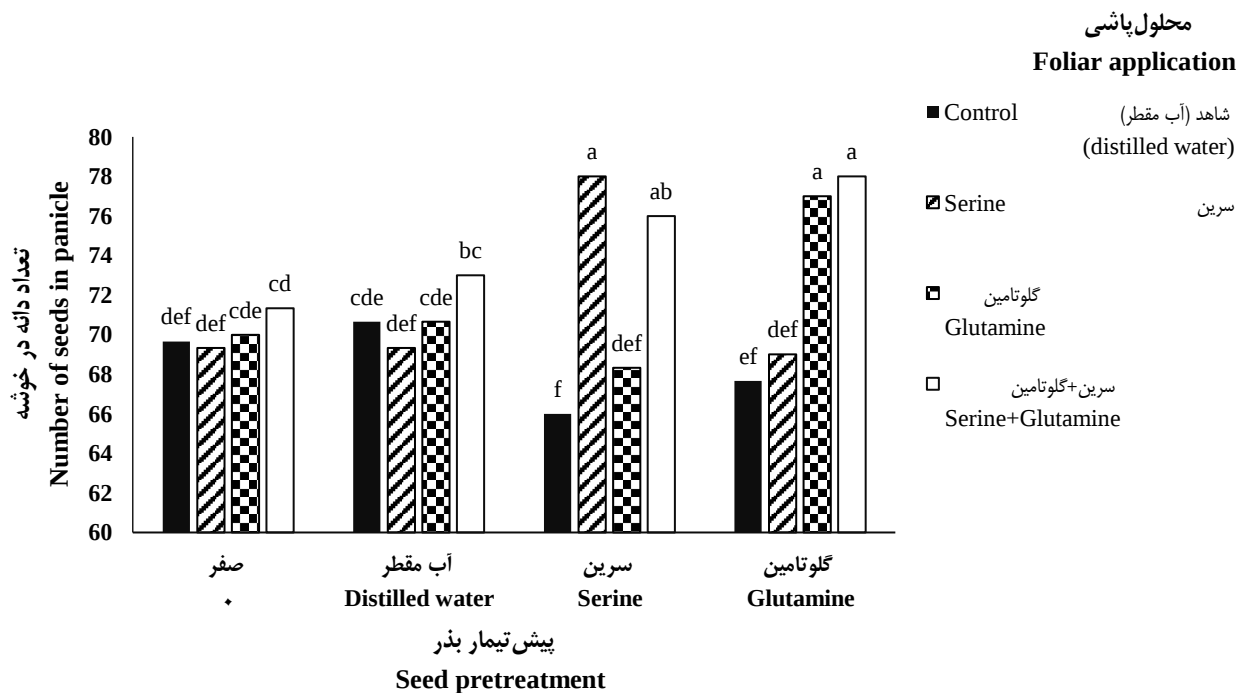
شکل ۵- مقایسه میانگین اثر برهم کنش پیش تیمار بذر و محلول پاشی اسیدهای آمینه بر کلروفیل کل
Figure 5- Mean comparison of interaction of seed pretreatment and foliar application of amino acids on total chlorophyll

به‌تنهایی به‌ترتیب منجر به افزایش ۵۹/۰ و ۵۲/۰ درصدی پروتئین دانه شدند (شکل ۶). افزایش میزان پروتئین دانه با کاربرد سرین و گلوتامین به‌دلیل نقش مستقیم این اسیدهای آمینه در متابولیسم نیتروژن، سنتز پروتئین و انتقال ترکیبات نیتروژنه به دانه‌ها است (Amir et al., 2018). این اسیدهای آمینه می‌توانند فعالیت آنزیم‌هایی مانند گلوتامین سنتاز و گلوتامات سنتاز را افزایش دهند که این امر منجر به افزایش کارایی تثبیت و استفاده از نیتروژن برای ساخت پروتئین می‌شود (Fortunato et al., 2023).

در بین صفات مورد بررسی، تیمارهای آزمایش اثری بر وزن خشک اندام هوایی نداشتند (جدول ۳). پروتئین دانه تنها تحت تأثیر محلول پاشی اسیدهای آمینه قرار گرفت (جدول ۳). به‌طوری که محلول پاشی با اسیدهای آمینه در این پژوهش منجر به افزایش معنی‌دار میزان پروتئین دانه گردید. کمترین میزان پروتئین دانه معادل ۱۴/۲۹ درصد مربوط به گیاهان شاهد بود. که در اثر کاربرد توأم سرین و گلوتامین با افزایش معنی‌دار ۸۲/۰ درصدی به ۱۵/۱۱ درصد رسید که البته از لحاظ آماری با کاربرد گلوتامین به‌تنهایی اختلاف معنی‌دار نداشت. کاربرد گلوتامین و سرین



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر محلول پاشی اسیدهای آمینه بر پروتئین دانه
Figure 6- Mean comparison of amino acids foliar application on grain protein



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر برهم کنش پیش تیمار بذر و محلول پاشی اسیدهای آمینه بر تعداد دانه در خوشه
Figure 7- Mean comparison of interaction of seed pretreatment and foliar application with amino acids on number of seeds in panicle

سرین به علاوه محلول پاشی توأم سرین و گلوتامین و پیش تیمار با گلوتامین و کاربرد توأم محلول پاشی با سرین و گلوتامین، بالاترین میزان تعداد دانه در پانیکول را به خود اختصاص دادند که نسبت به شاهد افزایش ۹/۱۰ تا ۱۱/۹۷ درصدی را نشان دادند. بعد از آن،

اثر پیش تیمار بذر، محلول پاشی و برهم کنش آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر تعداد دانه در پانیکول معنی دار بود (جدول ۳). کاربرد توأم پیش تیمار و محلول پاشی با سرین، کاربرد توأم پیش تیمار و محلول پاشی با گلوتامین و همچنین دو ترکیب تیماری پیش تیمار با

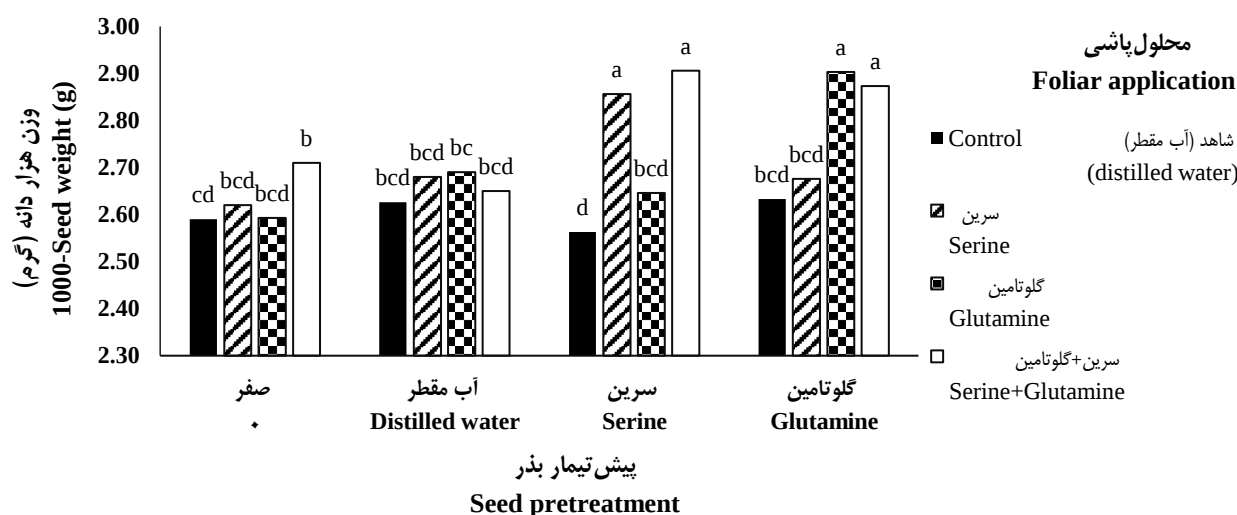
کاربرد اسیدهای آمینه سرین و گلوتامین می‌تواند با بهبود تغذیه نیتروژنی گیاه، افزایش انتقال ترکیبات فتوسنتزی و پیش‌سازهای پروتئینی به دانه‌ها و کاهش اثرات تنش‌های محیطی، به‌طور قابل توجهی وزن هزار دانه را افزایش دهد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از اسیدهای آمینه می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای افزایش عملکرد محصول و بهبود کیفیت دانه‌ها در شرایط مختلف محیطی مطرح شود (Dorr et al., 2018).

اثر تیمارهای آزمایش شامل پیش‌تیمار بذر، محلول‌پاشی و برهم کنش دوجانبه آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین عملکرد دانه مربوط به کاربرد پیش-تیمار و محلول‌پاشی سرین، پیش‌تیمار و محلول‌پاشی گلوتامین و پیش‌تیمار با گلوتامین به همراه محلول‌پاشی توأم سرین و گلوتامین بود که به‌ترتیب نسبت به شاهد افزایش ۳۰/۵۲، ۳۰/۹۱ و ۳۱/۰۲ درصدی را نشان دادند و با یکدیگر در یک گروه آماری قرار گرفتند. سایر ترکیبات تیماری از لحاظ عملکرد دانه اختلافی با شاهد نشان ندادند (شکل ۹).

همبستگی بین صفات نشان داد که در این پژوهش بین عملکرد دانه با صفات وزن هزار دانه، تعداد خوشه در بوته، تعداد دانه در خوشه و پروتئین دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود داشت. صفاتی از قبیل وزن خشک اندام هوایی، ارتفاع ساقه و محتوای نسبی آب برگ نیز در سطح احتمال پایین‌تر همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه داشتند. همبستگی منفی و معنی‌داری بین مالون‌دی‌آلدهید با عملکرد دانه مشاهده شد که مورد انتظار بود (جدول ۴).

پیش‌تیمار بذور با آب مقطر و محلول‌پاشی توأم سرین و گلوتامین با دارا بودن ۷۳ دانه در پانیکول در گروه دوم آماری قرار گرفت که نسبت به شاهد افزایش ۴/۷۹ درصدی را نشان داد. سایر ترکیبات تیماری از لحاظ تعداد دانه در پانیکول با شاهد اختلاف معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۷). سرین و گلوتامین به‌عنوان اسیدهای آمینه کلیدی در ساخت ترکیبات ضروری برای تقسیم سلولی و رشد بافت‌ها عمل می‌کنند (Amiri & Abbasi, 2018). کاربرد سرین و گلوتامین با بهبود تغذیه نیتروژنی، افزایش توان رشد اندام‌های زایشی، کاهش اثرات تنش‌های محیطی و تقویت رابطه منبع و مخزن موجب افزایش تعداد دانه در پانیکول گیاه می‌گردد (Mirtaleb et al., 2021).

در بین اجزای عملکرد، تعداد خوشه در بوته از هیچ‌یک از تیمارهای آزمایش تأثیر نپذیرفت (جدول ۳). در مقابل، وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر پیش‌تیمار بذر، محلول‌پاشی و برهم‌کنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۳). نتایج حاصل از این بررسی (شکل ۸) نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه مربوط به چهار ترکیب تیماری پیش‌تیمار و محلول‌پاشی با سرین، پیش‌تیمار و محلول‌پاشی با گلوتامین، پیش‌تیمار با سرین به همراه محلول‌پاشی توأم سرین و گلوتامین، پیش‌تیمار با گلوتامین و محلول‌پاشی توأم این دو ماده به‌ترتیب با ۱۰/۲۷، ۱۲/۰۸، ۱۲/۲۰ و ۱۰/۹۲ درصد افزایش نسبت به شاهد بود. کاربرد محلول‌پاشی توأم سرین و گلوتامین در شرایط عدم پیش‌تیمار بذر در گروه دوم آماری قرار گرفت و وزن هزار دانه را نسبت به شاهد ۴/۶۳ درصد افزایش داد. سایر ترکیبات تیماری با شاهد اختلاف معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۸). محققان دریافتند که



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی اسیدهای آمینه بر وزن هزار دانه

Figure 8- Mean comparison of interaction of seed pretreatment and foliar application with amino acids on 1000 seed weight

جدول ۴- همبستگی ساده بین صفات اندازه‌گیری شده

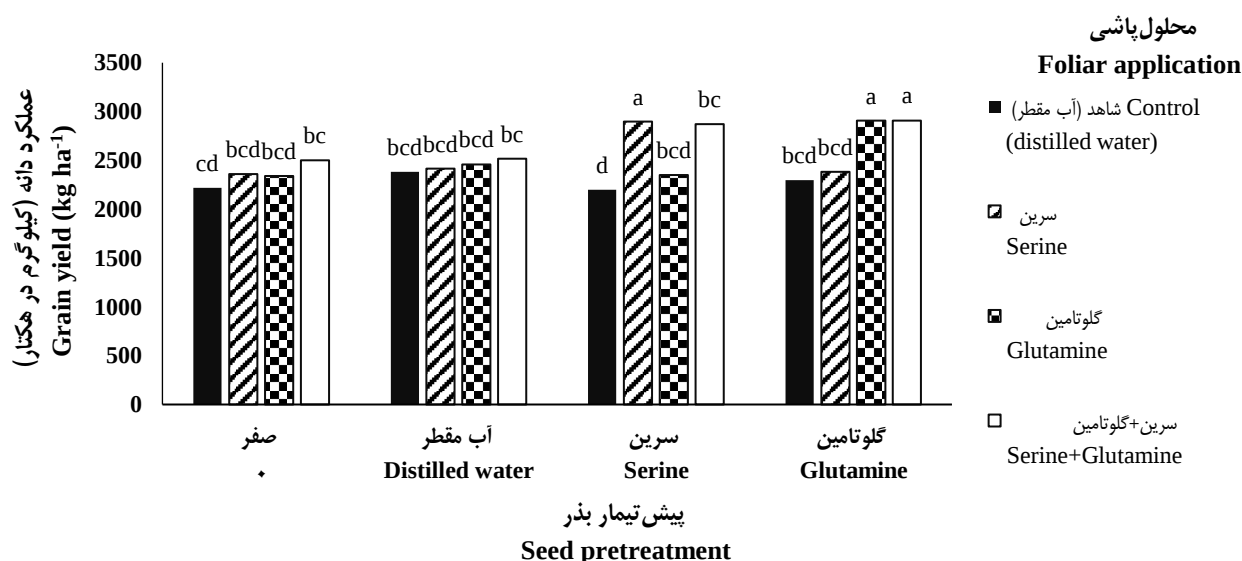
Table 4- Correlation between measured traits

صفات Traits	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 ارتفاع ساقه Stem height	1											
2 قطر ساقه Stem diameter	0.17	1										
3 محتوای نسبی آب برگ RWC	-0.16	0.08	1									
4 مالون دی آلدئید MDA	-0.06	0.03	-0.34*	1								
5 کربوهیدرات‌های محلول برگ Leaf soluble carbohydrate	0.10	0.12	0.21	-0.63**	1							
6 کلروفیل کل Total chlorophyll	0.02	0.17	0.04	0.004	0.46**	1						
7 وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	0.32*	0.14	0.15	0.12	0.08	-0.009	1					
8 پروتئین دانه Grain protein	0.23	0.06	-0.06	-0.33*	0.69**	0.54**	0.05	1				
9 تعداد دانه در خوشه Number of seeds in panicle	0.09	0.05	0.34*	-0.66**	0.60**	0.12	0.03	0.33*	1			
10 تعداد خوشه در بوته Number of panicles per plant	0.49**	0.10	-0.07	-0.02	0.20	-0.02	0.66**	0.30*	-0.03	1		
11 وزن هزار دانه 1000-seed weight	0.06	0.23	0.45**	-0.71**	0.57**	-0.03	0.15	0.26	0.74**	0.04	1	
12 عملکرد دانه Grain yield	0.30*	0.17	0.33*	-0.67**	0.65	0.02	0.35*	0.43**	0.83**	0.44**	0.84**	1

* و **: به ترتیب بیانگر معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.
* and **: significant at the level 0.05 and 0.01, respectively.

افزایش می‌یابد (Hassan et al., 2020). کاربرد سرین و گلوتامین از طریق بهبود رشد زایشی، افزایش تعداد و وزن دانه، تقویت فتوسنتز و بهینه‌سازی متابولیسم نیتروژن موجب افزایش عملکرد دانه در گیاه کینوا می‌گردد. این اسیدهای آمینه با کاهش آثار منفی تنش‌های محیطی و بهبود رابطه منبع و مخزن، در ارتقای ظرفیت تولیدی گیاه نقش کلیدی ایفا می‌کنند (Luo et al., 2023).

افزایش عملکرد دانه در اثر کاربرد سرین و گلوتامین در این پژوهش را می‌توان با افزایش وزن هزار دانه، تعداد دانه در خوشه، و بهبود شرایط آبی برگ و نیز کاهش پراکسیداسیون لیپیدها (میزان مالون‌دی‌آلدهید) توسط این مواد مرتبط دانست. پژوهشگران اعلام کردند که گلوتامین به‌عنوان ترکیب کلیدی در انتقال نیتروژن باعث می‌شود که گیاه نیتروژن دریافتی را به‌شکلی مؤثرتر به پروتئین‌ها و دانه‌ها اختصاص دهد و در نتیجه، ذخیره نهایی مواد مغذی در دانه



شکل ۹- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی اسیدهای آمینه بر عملکرد دانه

Figure 9- Mean comparison of interaction of seed pretreatment and foliar application with amino acids on grain yield

محلول‌پاشی مورد استفاده قرار گرفتند، تأثیر بیشتری بر صفات مذکور نشان دادند. در بین چهار تیمار مربوط به محلول‌پاشی، کاربرد توأم سرین و گلوتامین بهتر عمل کرد. در نهایت در محدوده پژوهش انجام‌شده، کاربرد پیش‌تیمار بذر با سرین و گلوتامین به همراه محلول‌پاشی برگی توأم این دو ماده (۲۰۰ میلی گرم در لیتر) جهت افزایش پروتئین و عملکرد دانه کینوا توصیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این تحقیق، کاربرد دو اسید آمینه سرین و گلوتامین موجب بهبود صفات ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی، کیفی و عملکرد دانه کینوا گردید. از لحاظ تأثیر بر میزان پروتئین دانه، کاربرد این دو ماده به‌صورت محلول‌پاشی بهتر از کاربرد پیش‌تیمار بذر بود. زمانی که هرکدام از این دو اسید آمینه به‌صورت توأم پیش‌تیمار و در

References

- Ali, H., Mahmood, I., Ali, M. F., Waheed, A., Jawad, H., Hussain, S., & Alamri, S. (2024). Individual and interactive effects of amino acid and paracetamol on growth, physiological and biochemical aspects of *Brassica napus* L. under drought conditions. *Heliyon*, 10(11), 9-10. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31544>
- Amir, R., Galili, G., & Cohen, H. (2018). The metabolic roles of free amino acids during seed development. *Plant Science*, 275, 11-18. <http://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.06.011>
- Amiri, A., & Abbasi, N. (2018). Role of glutamine synthetase in nitrogen use efficiency and reproductive organ growth in wheat. *Iranian Journal of Agricultural Sciences Research*, 19(3), 325-338. (In Persian).
- Bashir, A., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur Rehman, M. Z., Ishaque, W., Riaz, M. A., & Maqbool, A. (2018). Effect of foliar-applied iron complexed with lysine on growth and cadmium (Cd) uptake in rice under Cd stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(21), 91-99. <http://doi.org/10.1007/s11356-018-2042-y>

5. Dorr, C. S., Almeida, T. L. D., Panozzo, L. E., & Schuch, L. O. B. (2018). Treatment of soybean seeds of different levels of physiological quality with amino acids. *Journal of Seed Science*, 40(4), 407–414. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v40n4199311>
6. Elshamly, A. M., Iqbal, R., Ali, B., Ahmed, I., Akram, M. I., Ali, S., & Hamed, M. H. (2024). Zinc and amino acids improve the growth, physiological, and biochemical attributes of corn under different irrigation levels. *Rhizosphere*, 29, 100820. <http://doi.org/10.1016/j.rhishp.2023.100820>
7. EL-Zefzafy, M. M., Shahhat, I. M. A., Yousef, R. S., & Elsharkawy, E. R. (2016). Influence of foliar application with amino acids and citric acid on physiological and phytochemical responses of *Artemisia abrotanum* produced by in vitro culture. *Bioscience Biotechnology Research Communication*, 9(4), 702–711. <http://doi.org/10.21786/bbrc/9.4/18>
8. Fortunato, S., Nigro, D., Lasorella, C., Marcotuli, I., Gadaleta, A., & de Pinto, M. C. (2023). The role of glutamine synthetase (GS) and glutamate synthase (GOGAT) in the improvement of nitrogen use efficiency in cereals. *Biomolecules*, 13(12), 1771. <http://doi.org/10.3390/biom13121771>
9. Hameed, S., Atif, M., & Perveen, S. (2023). Role of gibberellins, neem leaf extract, and serine in improving wheat growth and grain yield under drought-triggered oxidative stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 1(2), 1–17. <http://doi.org/10.1007/s12298-023-01402-9>
10. Hassan, M. U., Islam, M. M., Wang, R., Guo, J., Luo, H., Chen, F., & Li, X. (2020). Glutamine application promotes nitrogen and biomass accumulation in the shoot of seedlings of the maize hybrid ZD958. *Planta*, 251, 1–15. <http://doi.org/10.1007/s00425-020-03363-9>
11. Hussain, A., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur Rehman, M. Z., Hameed, A., Hafeez, F., Alamri, S. A., Alyemeni, M. N., & Wijaya, L. (2018). Role of zinc–lysine on growth and chromium uptake in rice plants under Cr stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37(4), 1413–1422. <http://doi.org/10.1007/s00344-018-9831-x>
12. Ismail, M. A. M., Ahmad, M., Abdelrahman, T., Marwa, A., Sally, A., & Ali, M. (2024). Amino acids and polyamines in foliar spraying in enhancing medicinal plant resilience to abiotic stress – A systematic review. *Journal of Angiotherapy*, 8(11), 1–15. <http://doi.org/10.25163/angiotherapy.81110082>
13. Jahanbani, S., Mumivand, H., Zahedi, B., & Argento, S. (2024). Foliar application of urea and amino acids regulates growth, photosynthesis, pigments, antioxidant activity, and the essential oil content and composition of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Agronomy*, 14(12), 2950. <http://doi.org/10.3390/agronomy14122950>
14. Kao, C. H. (2015). Role of glutathione in abiotic stress tolerance of rice plants. *Journal of Taiwan Agricultural Research*, 164, 167–176. <http://doi.org/10.6156/JTAR/2015.06403.01>
15. Li, S., Ahmed, W., Jiang, T., Yang, D., Yang, L., Hu, X., & Zhao, Z. (2025). Amino acid metabolism pathways as key regulators of nitrogen distribution in tobacco: Insights from transcriptome and WGCNA analyses. *BMC Plant Biology*, 25(1), 393. <http://doi.org/10.1186/s12870-025-06390-4>
16. Luo, H., Duan, M., Xing, P., Zhang, Y., Qi, J., Kong, L., & Tang, X. (2023). Effects of L-glutamic acid application on yield, grain quality, photosynthetic pigments, 2-acetyl-1-pyrroline, and antioxidant system of aromatic rice. *Field Crops Research*, 303, 109134. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109134>
17. Mirtaleb, S. H., Niknejad, Y., & Fallah, H. (2021). Foliar application of amino acids and potassic fertilizer improves the nutritional quality of rice. *Journal of Plant Nutrition*, 44(14), 2029–2041. <http://doi.org/10.1080/01904167.2021.1889588>
18. Noroozlo, Y. A., Souri, M. K., & Delshad, M. (2019). Stimulation effects of foliar-applied glycine and glutamine amino acids on lettuce growth. *Agriculture Journal*, 4(1), 164–172. <http://doi.org/10.1515/opag-2019-0016>
19. Prager, A., Munz, S., Nkebiwe, P. M., Mast, B., & Graeff-Hönninger, S. (2018). Yield and quality characteristics of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars grown under field conditions in Southwestern Germany. *Agronomy*, 8, 197–216. <http://doi.org/10.3390/agronomy8100197>
20. Ramyar, H., Baradaran-Firouzabadi, M., Sobhani, A. R., & Asghari, H. R. (2023). Reduction of lead toxicity effects and enhancing the glutathione reservoir in green beans through spraying sulfur and serine and glutamine amino acids. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 38157–38173. <http://doi.org/10.1007/s11356-022-24819-3>
21. Romero, L. C., Aroca, M. A., Laureano-Marin, A. M., Moreno, I., Garcia, I., & Gotor, C. (2014). Cysteine and cysteine-related signaling pathways in *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Plant*, 7(2), 264–278. <http://doi.org/10.1093/mp/sst168>
22. Ros, R., Munoz-Bertomeu, J., & Krueger, S. (2014). Serine in plants: Biosynthesis, metabolism, and functions. *Trends Plant Science*, 19(9), 564–569. <http://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.06.003>
23. Rosa-Tellez, S., Casatejada-Anchel, R., Alcántara-Enguidanos, A., Torres-Moncho, A., Dohgri, M., Martinez-Serra, C., & Ros, R. (2023). Serine metabolic networks in plants. *Progress in Botany*, 84, 83–102. http://doi.org/10.1007/124_2023_73
24. Roupael, Y., & Colla, G. (2018). Synergistic biostimulatory action: Designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9(1), 1655. <http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01655>

25. Sadak, M., Abdelhamid, M. T., & Schmidhalter, U. (2015). Effect of foliar application of amino acids on plant yield and some physiological parameters in bean plants irrigated with seawater. *Acta Biologica Colombiana*, 20(1), 141–152.
26. Salinas, M., Gandolfo, E., Hakim, G., Giardina, E., & Di Benedetto, A. (2019). Foliar amino acids sprays on lettuce (*Lactuca sativa* L.) biomass accumulation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 2183–2196. <http://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.228>
27. Sharif Zadeh Ehteshami, M., & Danaee, E. (2023). The effect of foliar application of amino acids alanine, proline, and glutamine on some morphophysiological and enzymatic properties of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Quality and Durability of Agricultural Products and Food Stuffs*, 3(1), 49–62. (In Persian). <https://doi.org/10.71516/qafj.2023.1072>
28. Svietlova, N., Zhyr, L., Reichelt, M., Grabe, V., & Mithöfer, A. (2024). Glutamine as sole nitrogen source prevents induction of nitrate transporter gene NRT2.4 and affects amino acid metabolism in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1369543. <http://doi.org/10.3389/fpls.2024.1369543>
29. Zimmermann, S. E., Blau, S., Frerigmann, H., & Krueger, S. (2021). The phosphorylated pathway of serine biosynthesis is crucial for indolic glucosinolate biosynthesis and plant growth promotion conferred by the root endophyte *Colletotrichum tofieldiae*. *Plant Molecular Biology*, 107(1), 85–100. <http://doi.org/10.1007/s11103-021-01181-5>



Research Article

Vol. 24, No. 3, Fall 2026, p. 331-344

Investigating the Integrated Management of Sulfur Element and Organic Fertilizer on the Yield and Yield Components of Oilseed Flax (*Linum usitatissimum*) in the Ahvaz Conditions

L. Naseri Magham¹, E. Fateh^{1*}, A. Ayneband¹

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

(*- Corresponding author's Email: e.fateh@scu.ac.ir)

Received: 27 October 2025
Revised: 28 November 2025
Accepted: 21 December 2025
Available Online: 29 December 2025

How to cite this article:

Naseri Magham, L., Fateh, E., & Ayneband, A. (2026). Investigating the integrated management of sulfur element and organic fertilizer on the yield and yield components of oilseed flax (*Linum usitatissimum*) in the Ahvaz conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 331-344. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.96034.1428>

Introduction

Flax (*Linum usitatissimum*) is an annual plant with a stem height of 30 to 50 centimeters. Unlike fiber flax, oil flax has a stem with several branches. Oil flax seeds contain 22% protein, 6.5% crude fiber and 30 to 40% oil. They are of particular importance due to the presence of some essential amino acids such as lecithin 3.8%, methionine 2.3% and tryptophan 1.9%. One way to increase flax yield is to apply agronomic management practices such as appropriate planting date and optimal nutrient intake. On the other hand, although flax is adaptable to adverse environmental conditions and lands with low fertility levels, and accordingly its cultivation can be expanded in different agro-ecological conditions, the area under cultivation of this plant is very small. Considering the role of *Thiobacillus* bacteria in the oxidation and dissolution of nutrients, it seems that the use of these bacteria along with organic fertilizer can enable the use of available nutrients and lead to improvement of the physicochemical properties and biological activities of the soil. Accordingly, the purpose of this experiment is to study the effect of *Thiobacillus* bacteria and different levels of sulfur and organic fertilizer on flax yield and yield components.

Materials and Methods

This experiment was conducted at Shahid Chamran University, Ahvaz, in the 1401-1402 crop year to investigate the effect of *Thiobacillus* bacteria, sulfur application, and organic fertilizer on the yield and growth of oilseed flax under Ahvaz conditions. The experiment was conducted as a factorial design based on randomized complete blocks with 3 replications. The first factor included different levels of sulfur and *Thiobacillus* at 5 levels including: control (without the use of sulfur and *Thiobacillus*), 200 kg of sulfur per hectare, 400 kg of sulfur per hectare, 100 kg of sulfur per hectare with *Thiobacillus* bacterial inoculum, and 200 kg of sulfur per hectare with *Thiobacillus* bacterial inoculum. The second factor included the use of organic fertilizer at three levels: control (no use of organic fertilizer), 6 tons of vermicompost, and 6 tons of sugarcane bagasse compost. The measured traits included yield and yield components.

Results and Discussion

The results showed that, among the different organic fertilizer treatments, the control (no organic fertilizer) produced the lowest number of branches per plant (7.03), capsules per plant (185), and seeds per capsule (7.3). In contrast, the application of 6 t ha⁻¹ vermicompost resulted in the highest number of branches per plant (7.9),



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

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.96034.1428>

number of secondary branches (1.34), 1000-seed weight (1.6 g), and grain yield (3218 kg ha⁻¹). In the study of different levels of sulfur and *Thiobacillus* application, it was found that the lowest average number of branches (6.4 branches), number of secondary branches (26.2 branches), number of seeds per capsule (1.7 seeds), and weight of 1,000 seeds (5.8 g) were related to the control treatment (no use of sulfur and *Thiobacillus*). The highest number of branches (7.9 branches) and grain yield (3838 kg ha⁻¹) were related to the treatment of 200 kg sulfur ha⁻¹ + *Thiobacillus* bacterial inoculum. In the study of different levels of sulfur and *Thiobacillus* application, it was found that the lowest average number of branches (6.4 branches), number of secondary branches (26.2 branches), number of seeds per capsule (1.7 seeds), and weight of 1,000 seeds (5.8 grams) were related to the control treatment (no use of sulfur and *Thiobacillus*). The highest number of branches (7.9 branches) and grain yield (3838 kg ha⁻¹) were related to the treatment of 200 kg sulfur ha⁻¹ + *Thiobacillus* bacterial inoculum.

Conclusion

Therefore, the application of vermicompost among organic fertilizer levels and the treatment of 200 kg sulfur per hectare + *Thiobacillus* inoculum among sulfur and *Thiobacillus* levels had a positive effect, and the combined application of this treatment led to improved seed yield and yield components of oilseed flax.

Keywords: Bacteria, Bagasse, Compost, *Thiobacillus*, Vermicompost

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص ۳۳۱-۳۴۴

بررسی مدیریت تلفیقی عنصر گوگرد و کود آلی بر عملکرد و اجزای عملکرد کتان روغنی

(*Linum usitatissimum*) در شرایط اهواز

لیلا ناصری مقام^۱، اسفندیار فاتح^{۱*}، امیر آینه بند^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

چکیده

به منظور بررسی تأثیر باکتری *Thiobacillus*، کاربرد گوگرد و کود آلی بر عملکرد و رشد کتان روغنی (*Linum usitatissimum*) در شرایط اهواز، پژوهشی طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. این آزمایش به صورت طرح فاکتوریل برپایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گردید. عامل اول شامل سطوح مختلف گوگرد و *Thiobacillus* در پنج سطح شامل شاهد (بدون استفاده از گوگرد و *Thiobacillus*)، ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار همراه با مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار همراه با مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* بود. عامل دوم شامل استفاده از کود آلی در سه سطح شامل شاهد (عدم استفاده از کود آلی)، شش تن ورمی کمپوست و شش تن کمپوست باگاس نیشکر بود. نتایج نشان داد که در بین سطوح مختلف کود آلی، کمترین میانگین تعداد شاخه (۷/۰۳ شاخه)، تعداد کپسول در بوته (۱۸۵ کپسول)، تعداد دانه در کپسول (۷/۳ دانه)، مربوط به تیمار شاهد (عدم کاربرد کود آلی) بود. در مقابل در شرایط کاربرد تیمار شش تن ورمی کمپوست، بیشترین تعداد شاخه در بوته (۷/۹ شاخه در بوته)، انشعابات فرعی (۳۴/۱ شاخه)، وزن هزار دانه (۶/۱ گرم) و عملکرد دانه (۳۲۱۸ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد. نتایج نشان داد که کاربرد ورمی کمپوست در بین سطوح کود آلی و تیمار ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد همراه با تلقیح باکتری در بین سطوح گوگرد، تأثیر مثبت و معنی داری داشت. کاربرد تلفیقی این تیمارها منجر به بهبود عملکرد دانه و اجزای آن شد.

واژه‌های کلیدی: باکتری، باگاس، *Thiobacillus*، کمپوست، ورمی کمپوست

مقدمه

کتان روغنی در شرایط نسبتاً سرد قادر به رشد می‌باشد. اما درجه حرارت بالاتر از ۳۲ درجه سانتی‌گراد سبب کوتاه شدن دوره گل‌دهی و در نتیجه کاهش عملکرد دانه می‌شود. مناسب‌ترین درجه حرارت برای رشد کتان ۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد است. مجموع میانگین حرارت سالیانه کتان روغنی بین ۱۸۰۰-۱۶۲۰ درجه می‌باشد (Esmaili Behbahani et al, 2019). زمین جهت کشت کتان باید کاملاً قابل نفوذ باشد، خاک‌های رسی شنی دارای زهکش و نسبتاً عمیق و همچنین خاک‌های لومی که دارای مواد غذایی کافی باشند برای کشت این گیاه مناسب است. pH خاک‌هایی که دارای حدود هفت و یا کمی اسیدی باشند برای کاشت آن مناسب هستند، ولی بهترین pH بین ۵/۵ تا ۷ می‌باشد. کشت کتان روغنی در خاک‌های هوموسی نتیجه بهتری داشته و به علت بالا بودن نیتروژن

کتان (*Linum usitatissimum*)، گیاهی یک‌ساله است که ارتفاع ساقه آن بین ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. برخلاف کتان‌های لیفی، ساقه کتان‌های روغنی دارای چندین انشعاب است (Deyholos, 2006). این گیاه روزبلند است و هرگاه طول روز ۱۴ تا ۱۸ ساعت باشد، گل‌دهی آن در مدت ۱۰ تا ۱۵ روز انجام و به اتمام خواهد رسید. البته در برخی از ارقام کتان، گیاهان روزخنش نیز دیده می‌شود. روزهای کوتاه، روند رشد و نمو آن را کند می‌کند (Tadayon)

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*) نویسنده مسئول:
(Email: e.fateh@scu.ac.ir)

هوموس، تعداد شاخه‌ها افزایش می‌یابد. افزودن فسفر به زمین موجب ازدیاد روغن شده و وجود اسید فسفریک تأثیر نسبی در زودرسی محصول دارد (Lafond et al., 2008).

دانه‌های کتان روغنی حاوی ۲۲ درصد پروتئین، ۶/۵ درصد فیبر خام و ۳۰ تا ۴۰ درصد روغن می‌باشد و به علت داشتن بعضی اسیدهای آمینه ضروری مانند لیسیتین ۳/۸ درصد، متیونین ۲/۳ درصد و تریپتوفان ۱/۹ درصد از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند. مقدار روغن کتان‌های روغنی بین ۳۰ تا ۴۵ درصد است که از این مقدار، حدود ۵۴ تا ۷۰ درصد روغن دانه را اسید لینولئیک تشکیل می‌دهد و به همین علت روغن کتان سریع خشک شده و در صنایع رنگ‌سازی کاربرد دارد. سایر اسیدهای چرب شامل اسید لینولئیک به میزان ۱۷-۱۵ درصد، اسید اولئیک ۱۲ تا ۲۱ درصد، اسید پالمیتیک سه تا پنج درصد و اسید استئاریک دارای دو تا چهار درصد می‌باشد. میزان اسیدهای چرب امگا ۳ در کتان بیش از سه برابر اسیدهای چرب امگا ۶ است (Pali & Mehta, 2014). همچنین به دلیل اینکه در مقایسه با سایر گیاهان زراعی دانه روغنی، کتان غنی از آلفا-لینولئیک اسید (به عنوان فراوان‌ترین منبع آنتی‌اکسیدان‌ها) و لیگنین است، تأثیر مفیدی در پیشگیری از بیماری‌ها و سلامت انسان دارند (Shojaeian, Kish et al., 2021).

یکی از راه‌های افزایش عملکرد کتان، اعمال مدیریت‌های زراعی مانند تاریخ کاشت مناسب و میزان بهینه مصرف عناصر غذایی است. از طرف دیگر، با وجود آنکه کتان با شرایط نامساعد محیطی و اراضی با سطح باروری اندک سازگاری دارد و بر این اساس می‌توان کشت آن را در شرایط مختلف زراعی-بوم‌شناختی گسترش داد، اما سطح زیر کشت این گیاه بسیار اندک است.

گوگرد، چهارمین عنصر غذایی اصلی گیاه پس از نیتروژن، فسفر و پتاسیم است و گیاهان آن را به شکل سولفات (SO_4^{2-}) جذب می‌کنند. گوگرد با شرکت در فرآیندهای متابولیکی متعدد، نقش مهمی در عملکردهای حیاتی گیاهان دارد. این عنصر برای سنتز اسیدهای آمینه خاصی ضروری است و نقش‌های عملکردی منحصربه‌فردی در آنزیم‌ها، ویتامین‌ها، لیپیدها و سایر اجزای مهم گیاهی دارد (Kopriva et al., 2019). گوگرد در خاک به دو صورت ترکیبات آلی و معدنی وجود دارد، اگرچه در بیشتر خاک‌های کشاورزی ترکیبات آلی غالب است. در خاک کشاورزی، درصد اشکال آلی گوگرد بسته به آب‌وهوا و نوع خاک بین ۵۰ تا ۹۸ درصد متغیر است (Hu et al., 2005). گوگرد موجود در زیست‌توده خاک دو تا سه درصد از کل ترکیبات آلی خاک را تشکیل می‌دهد، اما با وجود این درصد اندک، نقش مهمی در تبدیل گوگرد در خاک دارد (Haider & Schaffer, 2009). زیست‌توده ریزجانداران فعال‌ترین و در دسترس‌ترین شکل گوگرد آلی در خاک است. گوگرد غیرآلی در خاک عمدتاً به صورت سولفات و ترکیبات گوگردی با درجه اکسیداسیون کمتر مانند سولفیدها، پلی‌سولفیدها،

سولفات‌ها، تیوسولفات‌ها و گوگرد عنصری وجود دارد (Esmaili Behbahani et al, 2019). خاک کشاورزی حاوی مقادیر کافی اکسید گوگرد است و بیشترین سهم گوگرد معدنی در خاک را تشکیل می‌دهد. گوگرد در خاک از طریق فرآیندهای تثبیت، تحرک، کانی‌سازی، اکسیداسیون و احیاء در یک تبادل مداوم بین اشکال آلی و معدنی است که بر نسبت نسبی اشکال در خاک تأثیر می‌گذارد. سطح گوگرد آلی تا حد زیادی با مقدار کربن و نیتروژن در مواد آلی خاک مرتبط است (Prasad & Shivay, 2018). اکسیداسیون ترکیبات معدنی گوگرد در خاک می‌تواند طی فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی رخ دهد. میزان وقوع این فرآیندها به محیط بستگی دارد. در خاک‌های تحت کشت، اکسیداسیون گوگرد عمدتاً از طریق مسیرهای زیست‌شناختی با مشارکت ریزجانداران اتفاق می‌افتد. بنابراین، درجه و سرعت این فرآیند به اندازه، ترکیب و فعالیت جمعیت میکروبی بستگی دارد. در خاک‌های تحت کشت اکسیداسیون، گوگرد عمدتاً توسط باکتری‌های جنس *Thiobacillus* و باکتری‌های هتروتروف انجام می‌شود (Yang et al., 2015). اعتقاد بر این است که *Thiobacillus* و جنس‌های مربوط به آن از طریق اکسیداسیون گوگرد، انحلال فسفر و حل کردن سایر مواد مغذی مانند روی، آهن و غیره، نقش مهمی در تولید محصول دارند. این باکتری‌ها در احیای خاک‌های قلیایی استفاده می‌شوند و مواد مغذی را در دسترس گیاهان زراعی قرار می‌دهند که تاکنون در خاک‌های قلیایی در دسترس نبودند.

در کشاورزی، کودها برای بهبود حاصلخیزی خاک استفاده می‌شوند، اما استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و معدنی در کشاورزی سبب آلودگی‌های زیست‌محیطی غیرقابل جبران و همچنین مشکلات بهداشتی بسیاری شده است. بنابراین، به منظور کاهش حذف اثرات نامطلوب کودهای شیمیایی بر سلامت انسان و محیط‌زیست، امروزه مباحثی تحت عنوان کشاورزی ارگانیک، کشاورزی پایدار یا کشاورزی زیست‌محیطی ایجاد شده است (Sharma & Chetani, 2017). کودهای آلی عمدتاً مقرون به صرفه هستند و نسبت به کودهای شیمیایی بیشتر در دسترس هستند. همچنین مواد آلی، اساس حاصلخیزی خاک است. از سوی دیگر، کودهای معدنی به دلیل هزینه بالا و اثرات منفی زیست‌محیطی خود در صورت مدیریت ضعیف شناخته شده‌اند (Solomon et al., 2012). کودهای آلی، نیازهای فرآیند بیولوژیکی گیاهان را تأمین می‌کنند و به طور هم‌زمان جمعیت آفات گیاهی را سرکوب می‌کنند. علاوه بر این، فعالیت ریزجانداران در خاک، قابلیت تبادل آنیون و کاتیون، مواد آلی و محتوای کربن خاک را افزایش می‌دهند. کودهای آلی، کیفیت و عملکرد محصولات کشاورزی را به روشی مشابه کودهای معدنی افزایش می‌دهند، اما باعث آلودگی محیط زیست نمی‌شود (Bhatt et al., 2019). برخی از مزایای مهم کودهای آلی

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر باکتری *Thiobacillus* و کاربرد گوگرد و کود آلی بر عملکرد و اجزای عملکرد کتان روغنی در شرایط اهواز، طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در مزرعه آموزشی پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز واقع در جنوب غربی اهواز و حاشیه غربی رود کارون با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۲ متر از سطح دریا اجرا گردید. براساس آمار ۴۰ ساله هواشناسی، متوسط بارندگی سالانه در منطقه ۱۹۹/۵ میلی‌متر است. متوسط حداکثر دما ۴۶/۲ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداقل دمای ماهیانه ۶/۶ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در تیرماه و دی‌ماه رخ می‌دهد. همچنین آمار هواشناسی در محدوده زمانی انجام آزمایش به صورت میانگین ماهانه در جدول ۱ نشان داده شده است.

شامل بهبود بافت خاک، حفظ آب و مقاومت در برابر فرسایش است. کودهای آلی، نیتروژن را به شکل قابل استفاده فراهم می‌کنند که به گیاه کمک می‌کند تا رشد گیاه را بهبود بخشد و در عین حال نه باعث سوزاندن ریشه‌ها و نه از بین بردن ریزجانداران مفید در خاک می‌شود. کودهای آلی با تأمین نیازهای تغذیه‌ای گیاهان و افزایش تحمل گیاه، به پیشگیری از بیماری‌ها کمک می‌کنند (Asadu & Unagwu et al., 2012; Sharma & Chetani, 2017).

با توجه به نقش باکتری‌های جنس *Thiobacillus* در اکسیداسیون و انحلال عناصر مغذی، به نظر می‌رسد که کاربرد این باکتری‌های همراه با کود آلی بتواند امکان استفاده از مواد مغذی موجود را فراهم کرده و منجر به بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و فعالیت‌های زیست‌شناختی خاک شوند. بر این اساس، هدف از اجرای این آزمایش، مطالعه، تأثیر باکتری *Thiobacillus* و سطوح مختلف گوگردی و کود آلی بر عملکرد و اجزای عملکرد کتان می‌باشد.

جدول ۱- میانگین ماهانه شرایط آب‌وهوایی در طول فصل رشد در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲

ماه	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
Month	November	December	January	February	March	April	May	June
دمای حداکثر								
Maximum temperature (°C)	32.1	26.5	25	26	29.7	36.1	46.9	49.9
دمای حداقل								
Minimum temperature (°C)	11.1	5.6	2.9	6.1	7.1	10.7	19.4	25.8
میانگین دمای روزانه								
Average temperature (°C)	19.4	15.3	14.2	15.5	18.3	24.3	33.5	39
بارندگی								
Precipitation (mm)	15.9	20.5	45.1	13.8	17.2	20	2	0

شد و سپس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری گردید. نتایج تجزیه آزمون خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه، قبل از شروع آزمایش، نمونه برداری از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری قسمت‌های مختلف مزرعه انجام شد و پس از خشک کردن و خرد کردن ذرات درشت خاک، نمونه‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2- Physical and chemical characteristics of the soil of the test site

عمق	بافت	پتاسیم	اسیدیته	فسفر	هدایت الکتریکی	نیتروژن	مواد آلی
Depth	Texture	Potassium (mg kg ⁻¹)	pH	Phosphorus (mg kg ⁻¹)	EC (dS m ⁻¹)	Nitrogen (%)	Organic carbon (%)
0-30 cm	Loamy-sand	130.8	7.45	11.3	3.2	0.098	0.43

گوگرد و *Thiobacillus*)، ۲- ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، ۳- ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، ۴- ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار همراه با مایه تلفیق باکتری *Thiobacillus* و ۵- ۲۰۰ کیلوگرم

این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عامل اول شامل سطوح مختلف گوگرد و *Thiobacillus* در پنج سطح شامل ۱- شاهد (بدون استفاده از

پس از عملیات برداشت، از میان بوته‌های برداشت‌شده هر کرت، ۱۰ بوته به‌طور تصادفی برای شمارش اجزای عملکرد انتخاب شده و به‌صورت جداگانه و دقت در پلاستیک قرار داده شدند و به آزمایشگاه منتقل گردیدند و اندازه‌گیری صورت گرفت.

تجزیه‌ی آماری با استفاده از برنامه آماری SAS ver 9.4 و ترسیم نمودارها با استفاده برنامه‌های Word و Excel انجام شد. مقایسه میانگین صفات با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح پنج درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

تعداد شاخه فرعی در بوته

نتایج تجزیه واریانس صفات حاکی از تأثیرپذیری صفت تعداد شاخه فرعی در بوته تنها از اثرات اصلی عوامل آزمایشی در سطح یک درصد بود (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین‌های به‌دست‌آمده، بیشترین تعداد شاخه فرعی در بوته مربوط به تیمار کاربرد شش تن ورمی‌کمپوست (۷/۹۷ شاخه در بوته) بود که نسبت به شاهد ۱۳/۵ درصد افزایش نشان داد و از این نظر برتری آماری معنی‌داری نسبت به سایر سطوح تیماری داشت. در مقابل، بین سطوح شاهد و شش تن کمپوست باگاس نیشکر (به‌ترتیب با میانگین ۷/۰۳ و ۷/۳ شاخه در بوته) اختلاف آماری معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴).

بررسی اثرات اصلی سطوح گوگرد و *Thiobacillus* نیز نشان داد که تمامی سطوح تیماری کاربرد گوگرد و *Thiobacillus* منجر به افزایش تعداد شاخه فرعی در بوته نسبت به شاهد شدند، به‌طوری که سطوح تیماری ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* به‌ترتیب منجر به افزایش ۱۶، ۲۳، ۲۰ و ۲۴ درصدی تعداد شاخه نسبت به شاهد شدند. تحت این شرایط مشاهده شد که کمترین میانگین تعداد شاخه فرعی در بوته مربوط به شاهد با میانگین ۶/۳۷ شاخه بود که از این نظر اختلاف آماری معنی‌داری با سایر سطوح تیماری داشت. در مقابل، تیمارهای ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* به‌ترتیب دارای ۷/۸۶، ۷/۶۶ و ۷/۹۱ شاخه بودند و از این نظر اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. به نظر می‌رسد که وجود هم‌زمان گوگرد و باکتری *Thiobacillus* عامل کلیدی در تحریک رشد شاخه‌های فرعی است، نه صرفاً افزایش مقدار گوگرد. این امر احتمالاً به‌دلیل نقش مؤثر باکتری در فعال‌سازی گوگرد و تسهیل جذب عناصر غذایی می‌باشد.

نتایج این پژوهش به‌وضوح تأییدکننده تأثیر مثبت ورمی‌کمپوست

گوگرد در هکتار همراه مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* بود. عامل دوم شامل استفاده از کود آلی در سه سطح شامل ۱- شاهد (عدم استفاده از کود آلی)، ۲- شش تن ورمی‌کمپوست و ۳- شش تن کمپوست باگاس نیشکر بود. در مجموع، سه تکرار، ۴۵ واحد آزمایشی در طرح وجود داشت که هر واحد آزمایشی شامل چهار پشته (سه پشته کاشت و یک پشته نکاشت) و با فاصله ۵۰ سانتی‌متری از یکدیگر بودند.

آماده‌سازی زمین با انجام شخم و دو مرتبه دیسک عمود بر هم و تسطیح با ماله در مزرعه تکمیل شد. پس از آن، کودهای پایه براساس آزمون خاک و کود ورمی‌کمپوست و گوگرد و *Thiobacillus* به نسبت‌های معین‌شده به خاک اضافه خواهد شد. به‌منظور تلقیح با *Thiobacillus*، از کود زیستی سولفورارور ۱ حاوی باکتری *Thiobacillus* استفاده شد. به‌منظور تلقیح با باکتری، برای هر ۵۰ کیلوگرم گوگرد یک کیلوگرم *Thiobacillus* استفاده گردید که بر این اساس برای تیمارهای آزمایشی، دو کیلوگرم گوگرد با ۴۰ گرم *Thiobacillus* مخلوط شد. تلقیح گوگرد با باکتری چند روز قبل از کاشت و در سایه انجام گردید و سپس بلافاصله براساس تیمارهای آزمایشی، مقادیر تعیین‌شده تیمارها به‌صورت نواری روی خطوط کشت قرار داده شد و سپس روی آن با خاک پوشانده شد. چند روز بعد از عملیات کوددهی، عملیات کشت با کاشت بذور در عمق دو سانتی‌متری خاک به‌صورت دستی انجام گردید. کشت گیاه دارویی کتان روغنی در تاریخ ۱۴۰۱/۰۸/۲۰ و اولین آبیاری مزرعه در ۲۲ آبان ۱۴۰۱ انجام شد. همچنین مقدار کود نیتروژن باقی‌مانده (براساس آزمون خاک) در دو مرحله ظهور جوانه انتهایی و ابتدای گل‌دهی (هر مرحله رشدی ۱۰۰ کیلوگرم) مصرف گردید. در طول دوره آزمایش، آفت و بیماری خاصی مشاهده نشد و مبارزه با علف‌های هرز صورت گرفت. عملیات برداشت محصول نیز در تاریخ ۱۴۰۲/۰۲/۱۰ انجام شد.

تعیین عملکرد دانه

به‌منظور برآورد عملکرد دانه، در زمان رسیدگی کامل (زمانی که ۷۰ درصد دانه‌ها در کپسول‌ها قهوه‌ای شدند)، با در نظر گرفتن حذف اثر حاشیه، سه مترمربع از هر کرت برداشت شد؛ سپس بوته‌های مربوطه جداگانه به آزمایشگاه منتقل و در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و مجدد توزین و وزن ماده خشک (عملکرد زیست‌توده) نمونه‌های آزمایشی محاسبه گردید. پس از جدا نمودن بذرها و توزین دانه‌های هر کرت، عملکرد دانه در واحد مترمربع محاسبه شد.

تعیین اجزای عملکرد دانه

مولد مریستمی، افزایش تقسیم سلولی و انتقال مواد فتوسنتزی و تنظیم‌کننده‌های رشد از منبع به مخزن با مصرف گوگرد، تعداد شاخه جانبی در سویا (*Glycin max L.*) افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که کود ورمی کمپوست از طریق تأمین تدریجی نیتروژن و سایر عناصر غذایی، اثراتی مشابه با کودهای شیمیایی نیتروژن داشته است.

تعداد کپسول در بوته

نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد که صفت تعداد کپسول در بوته تنها تحت تأثیر اثر اصلی سطوح گوگرد و *Thiobacillus* در سطح پنج درصد قرار گرفت (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین، کمترین میانگین تعداد کپسول در بوته با میانگین ۱۷۶ عدد مربوط به شاهد (بدون استفاده از گوگرد و *Thiobacillus*) بود که تحت سطوح تیماری ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد، ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد، ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری به ترتیب با ۱۲، ۲۵، ۱۲ و ۱۵ درصد افزایش به میانگین ۱۹۷، ۲۱۹، ۱۹۸ و ۲۰۲ کپسول در بوته رسید که از این نظر اختلاف آماری معنی‌داری نسبت به یکدیگر نداشتند (جدول ۴).

تفاوت در تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول ارتباط مستقیم با میزان نفوذ نور به داخل تاج‌پوشش گیاهی دارد. به دلیل نقش گوگرد در ساخت آمینواسیدهای سیستئین، متیونین و سنتز اسیدهای چرب، دانه‌های روغنی به مقادیر متوسط سولفور واکنش نشان می‌دهند (Havlin et al., 1999). با توجه به اثر مستقیم تعداد کپسول به عنوان جزء مؤثر در تعیین عملکرد کاملینا (*Camelina sativa L.*)، می‌توان یکی از علل افزایش عملکرد دانه کتان روغنی را به افزایش تعداد کپسول در بوته نسبت داد. احتمالاً کاربرد گوگرد به همراه بیوسولفور، توانسته است از طریق کاهش pH خاک و حلالیت عناصر (Anandham et al., 2007) به افزایش رشد و نمو گیاه کتان روغنی کمک کند. نتایج حاکی از آن است که کاربرد گوگرد، اعم از اینکه به تنهایی یا همراه با باکتری *Thiobacillus* باشد، می‌تواند به طور معنی‌داری تعداد کپسول در بوته را نسبت به شاهد افزایش دهد. این یافته مؤید نقش مؤثر گوگرد در بهبود ویژگی‌های زایشی گیاه است. باین حال، از آنجاکه اختلاف آماری معنی‌داری بین سطوح مختلف تیمارهای گوگردی مشاهده نشد، به نظر می‌رسد که صرف تأمین نیاز پایه گیاه به گوگرد برای دستیابی به این پاسخ مطلوب کافی بوده و افزایش بیشتر مقدار مصرف گوگرد لزوماً منجر به افزایش تعداد کپسول نمی‌شود.

بر تعداد شاخه فرعی در بوته بود. این نتایج نشان می‌دهد که ورمی کمپوست از طریق فراهم نمودن مواد غذایی مورد نیاز گیاه و همچنین افزایش تولیدات فتوسنتزی به واسطه افزایش ظرفیت فتوسنتزی در افزایش رشد رویشی گیاه نظیر ارتفاع و تعداد شاخه‌های جانبی مؤثر می‌باشد. براساس منابع موجود، اکثر عناصر غذایی موجود در ورمی کمپوست از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم به سهولت برای گیاه قابل دسترس می‌باشد که می‌تواند نقش مؤثری در بهبود رشد و عملکرد گیاهان داشته باشد (Wu et al., 2012). همچنین ورمی کمپوست حاوی اسید هیومیک، هورمون‌های محرک رشد گیاه و انواع ویتامین‌ها و آنزیم‌ها می‌باشد (Arancon et al., 2004; Pramanik et al., 2007) که می‌تواند به طور مستقیم باعث بهبود رشد و نمو گیاهان گردد. علاوه بر این، ورمی کمپوست بر مواردی مانند بهبود ساختار شیمیایی، فیزیکی و زیستی بستر کاشت، و همچنین افزایش جذب و نگهداری آب تأثیر دارد. از این رو، افزایش خصوصیات رشدی و عملکردی کتان روغنی در اثر کاربرد کود ورمی کمپوست با توجه به موارد نام برده شده قابل استناد می‌باشد.

تعداد شاخه فرعی فرعی در بوته

نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد که اثرات اصلی و برهم‌کنش عوامل آزمایشی در سطح یک درصد تأثیر معنی‌داری بر تعداد شاخه فرعی فرعی در بوته نداشتند (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین صفات، بیشترین تعداد شاخه فرعی فرعی در بوته مربوط به سطح تیماری کاربرد توأم شش تن ورمی کمپوست و ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد (۳۸ شاخه فرعی فرعی) بود که البته از نظر آماری اختلاف آماری معنی‌داری با سطوح تیماری ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* توأم با کاربرد شش تن ورمی کمپوست (به ترتیب با میانگین ۳۸ و ۳۷ شاخه فرعی فرعی)، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در شرایط عدم استفاده از کود آلی و تیمار ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری توأم با کاربرد شش تن کمپوست باگاس نیشکر نداشت. در مقابل، کمترین تعداد انشعاب فرعی با میانگین ۲۰ شاخه فرعی فرعی نیز مربوط به شاهد (عدم استفاده از گوگرد و کود آلی) بود (شکل ۱).

به طور کلی تحقیقات نشان داده است که تعداد شاخه‌های جانبی بوته به طور عمده به حاصلخیزی خاک و شرایط رشد بستگی دارد و در شرایط بهینه رشد، گیاهان شاخه‌های فرعی بیشتری تولید می‌کنند (Nemati & Azizi, 2013). دوی و همکاران (Devi et al., 2012) گزارش دادند که به علت نقش عنصر گوگرد در فرآیندهای رشد و نمو گیاه و ساختمان اسیدهای آمینه و فرآیند تفکیک بافت از سلول‌های

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی تحت تأثیر سطوح مختلف عوامل آزمایشی
Table 3- Results of variance analysis of experimental traits under the influence of different levels of experimental factors

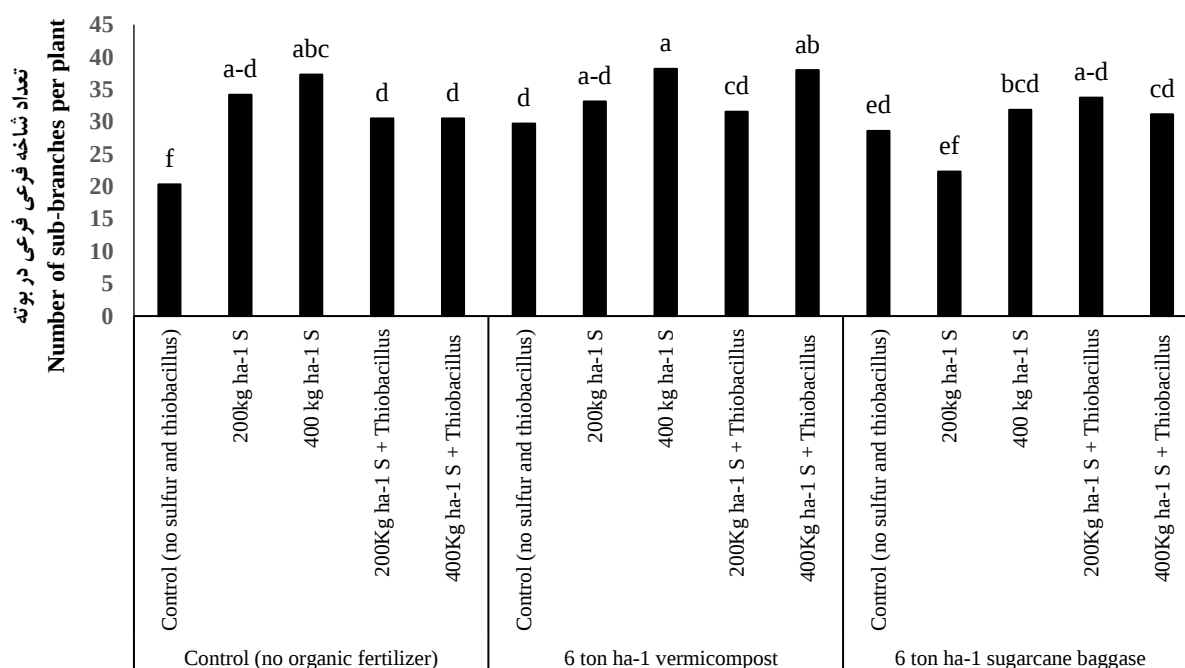
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares					
		تعداد شاخه فرعی در بوته Number of sub-branches per plant	تعداد شاخه فرعی در بوته Number of secondary branches per plant	تعداد کیسول در بوته Number of capsules per plant	تعداد دانه در کیسول The number of seeds in the capsule	وزن هزار دانه Weight of 1000- seeds (g)	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)
بلوک Block	2	0.56	12.2	1329	0.43	0.25	72379
سطوح کود آلی Organic fertilizer levels	2	3.56**	86**	1880 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.04 ^{ns}	169706 ^{ns}
سطوح گوگرد و Thiobacillus Sulfur and Thiobacillus levels	4	3.59**	116**	2171*	1.42**	0.26*	1597083**
کود آلی × گوگرد و Thiobacillus Organic fertilizer × sulfur and Thiobacillus	8	0.205 ^{ns}	53.9**	1097 ^{ns}	0.37*	0.19*	174698 ^{ns}
خطا Error	28	0.15	12.03	760	0.15	0.075	165281
ضرب تغییرات C.V (%)	--	5.3	14.3	13.9	5.2	4.5	12.9

** و * : به ترتیب نشانگر معنی دار بودن در سطح احتمال یک و پنج درصد و ns: عدم وجود اختلاف معنی دار می باشد.
** and *: Indicate significance at the 1% and 5% probability levels, respectively; ns: indicates no significant difference.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات اصلی عوامل آزمایشی از نظر صفات مورد بررسی
Table 4- Comparison of the average effects of the main experimental factors in terms of investigated traits

سطوح مختلف کود آلی Different levels of organic fertilizer	تعداد شاخه فرعی در بوته Number of sub-branches per plant	تعداد شاخه فرعی در بوته Number of secondary branches per plant	تعداد کپسول در بوته Number of capsules per plant	تعداد دانه در کپسول The number of seeds in the capsule	وزن هزار دانه Weight of 1000-seeds (g)	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)
شاهد (عدم استفاده از کود آلی) Control (non-use of organic fertilizer)	7.03b	30.56b	185b	7.32a	6.03a	3166a*
شش تن ورمی کمپوست 6 tons of vermicompost	7.97a	34.12a	203ab	7.5a	6.14a	3218a
شش تن کمپوست باگاس نیشکر 6 tons of sugarcane bagasse compost	7.3b	29.53b	206a	7.61a	6.12a	3014a
سطوح گوگرد و Thiobacillus						
Sulfur levels and Thiobacillus						
شاهد (بدون استفاده از گوگرد و Thiobacillus) Control (without using sulfur and Thiobacillus)	6.37c	36.22c	176b	7.08c	5.84b	2711b
۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار 200 kg of sulfur per hectare	7.38b	29.87c	197ab	7.26c	6ab	3085b
۴۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار 400 kg of sulfur per hectare	7.86a	35.78a	219a	8.09a	6.24a	3059b
۱۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری Thiobacillus	7.66ab	31.94b	198ab	7.37bc	6.17a	2969b
100 kg of sulfur per hectare + Thiobacillus bacteria inoculum						
۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری Thiobacillus	7.91a	33.21a	202ab	7.68b	6.23a	3838a
200 kg of sulfur per hectare + Thiobacillus bacteria inoculum						

* Means sharing a common letter do not differ significantly at the 5% probability level according to the LSD test.
میانگین‌های دارای یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ندارند.



شکل ۱- مقایسه میانگین‌های برهم‌کنش عوامل آزمایشی از نظر صفت تعداد شاخه فرعی در بوته

Figure 1- Comparisons of the average interaction of the experimental factors in terms of the number of sub-branches in the plant

ستون‌های دارای یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

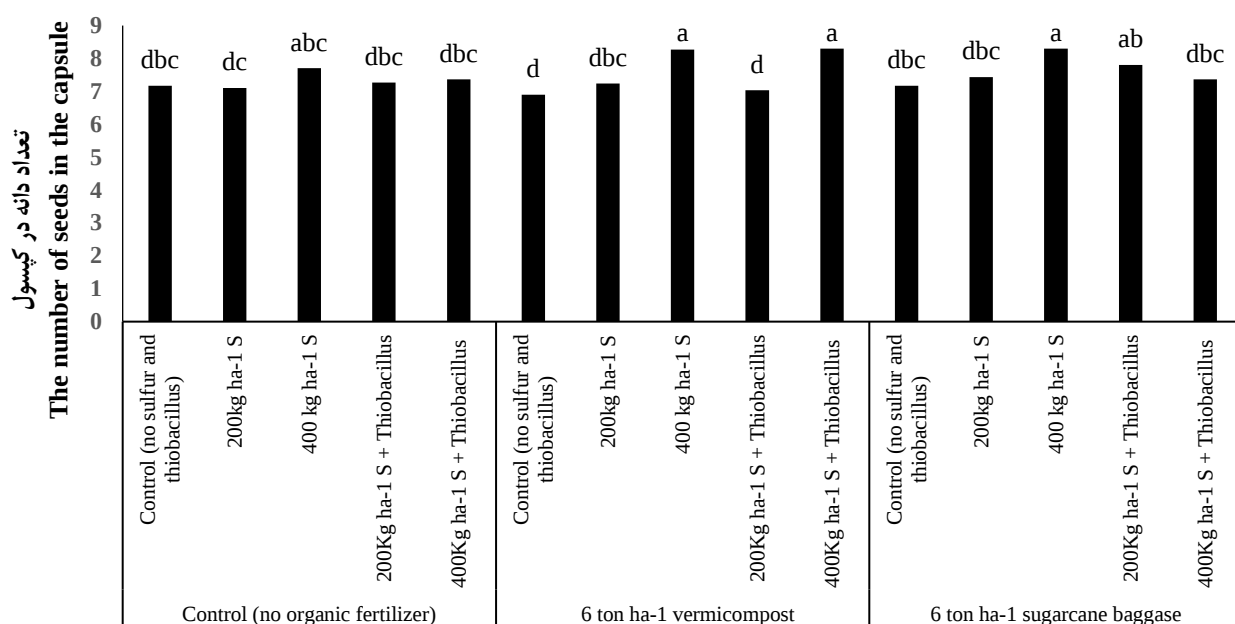
Columns with a common letter do not have a significant difference using the LSD test at the five percent probability level.

تعداد دانه در کپسول

نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد که صفت تعداد دانه در کپسول تحت تأثیر اثر اصلی سطوح گوگرد و *Thiobacillus* و برهم‌کنش کود آلی × گوگرد و *Thiobacillus* به‌ترتیب در سطح پنج و یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین صفات، بیشترین تعداد دانه در کپسول مربوط به سطوح تیماری ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* توأم با کاربرد شش تن ورمی‌کمپوست (به‌ترتیب با میانگین ۸/۲۷ و ۸/۳۰ دانه)، ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد و ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* توأم با کاربرد شش تن کمپوست باگاس نیشکر (به‌ترتیب با میانگین ۸/۳۰ و ۷/۸۰ دانه در کپسول) و تیمار ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد در شرایط عدم کاربرد کود آلی (۷/۷۰ دانه در کپسول) بود و از این نظر نسبت به سایر سطوح تیماری برتری آماری معنی‌داری داشتند (شکل ۲).

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش حاکی از تأثیر مثبت کاربرد ورمی‌کمپوست توأم با کاربرد سطوح ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* بر تعداد دانه در کپسول بود. بر این اساس، مشخص شده است که ظرفیت مخزن‌های گیاه توسط تعداد دانه در کپسول مشخص می‌شود؛ هرچه تعداد دانه‌ها بیشتر باشند، گیاه دارای تعداد مخزن‌های بیشتری برای مواد پرورده تولیدی است و هر

عاملی که این جزء را افزایش دهد باعث افزایش عملکرد نیز خواهد شد. گزارش‌هایی مبنی بر اینکه ورمی‌کمپوست قادر است که فسفر را به‌فرم قابل دسترس برای گیاه تبدیل کند، موجود است و افزایش دسترسی به فسفر از طریق کاربرد ورمی‌کمپوست سبب افزایش تشکیل اندام زایشی و در نتیجه افزایش بذر در گیاه خواهد شد (Arancon et al., 2004). عزیزی و نعمتی (Nemati & Azizi, 2013) نیز بیان کردند که به‌دلیل اینکه عناصر غذایی موجود در ورمی‌کمپوست برای گیاه بیشتر قابل دسترس است، ورمی‌کمپوست باعث بهبود خصوصیات رشدی، عملکرد و اجزای گیاه می‌شود. همچنین تحقیقات نشان داده است که کاربرد کودهای گوگردی، سطح سبز را افزایش داده و در ادامه باعث افزایش فتوسنتز گیاه شده که به‌نوبه خود در انتقال مواد فتوسنتزی و پُر شدن دانه تأثیر مثبتی دارد. با در نظر گرفتن حضور باکتری‌های *Thiobacillus* در کود زیستی بیوسولفور و توانایی آن‌ها در کاهش pH خاک و تولید هورمون‌های استیک اسید و سیتوکینین می‌توان احتمال داد که این باکتری‌ها از طریق افزایش رشد ریشه‌های جانبی، سطح برگ و ریشه سبب افزایش مواد فتوسنتزی شده که به‌نوبه خود باعث بهبود رشد رویشی و در ادامه افزایش سهم اندام‌های زایشی از جمله تعداد دانه در کپسول شده است (Poonia, 2000).



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های برهم‌کنش عوامل آزمایشی از نظر صفت تعداد دانه در کپسول

Figure 2- Comparisons of the average interaction of the experimental factors in terms of the attribute number of seeds in the capsule

میانگین‌های دارای یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Averages with a common letter do not have a significant difference using the LSD test at the five percent probability level.

وزن هزار دانه

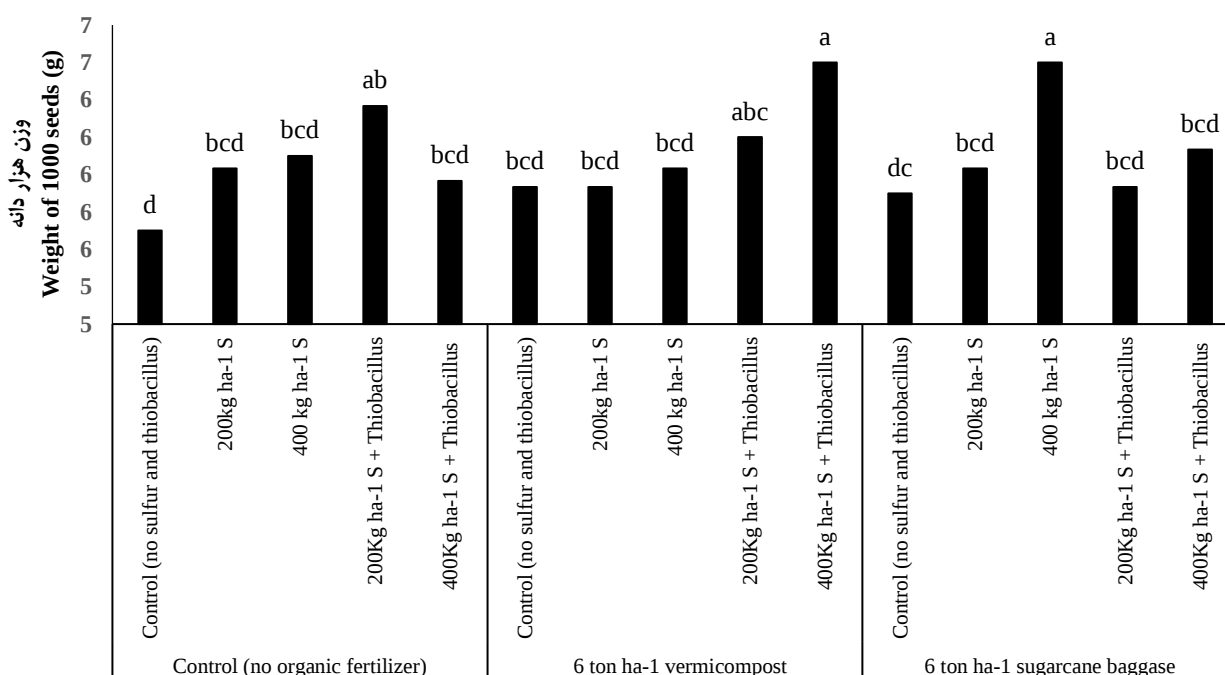
نتایج تجزیه واریانس صفت وزن هزار دانه در جدول ۳ نشان داده شده است. براساس نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی، میانگین وزن هزار دانه تحت تأثیر اثر اصلی سطوح گوگرد و *Thiobacillus* و برهم‌کنش کود آلی × گوگرد و *Thiobacillus* در سطح پنج درصد قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش عوامل آزمایشی نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه مربوط به سطوح تیماری ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* توأم با کاربرد شش تن ورمی کمپوست (۶/۶۰ گرم) و ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد توأم با کاربرد شش تن کمپوست باگاس نیشکر (۶/۶۰ گرم) بود که ۱۶ درصد افزایش را نسبت به تیمار عدم کاربرد کود (۵/۷۰ گرم) نشان داد. با این وجود این دو سطح تیماری اختلاف آماری معنی‌داری با سطوح تیماری ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* توأم با کاربرد عدم استفاده از کود آلی (۶/۳۷ گرم) و ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* توأم با کاربرد شش تن ورمی کمپوست (۶/۲۰ گرم) نداشت. به‌طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد شش تن ورمی کمپوست و شش تن کمپوست باگاس نیشکر به ترتیب منجر به افزایش ۱/۸ و ۱/۴ درصدی وزن هزار دانه نسبت به تیمار عدم کاربرد کود آلی (شاهد) شد (شکل ۳). همچنین سطوح تیماری ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد، ۴۰۰ کیلوگرم

گوگرد، ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* به ترتیب منجر به افزایش ۳، ۷، ۶ و ۷ درصدی نسبت به شاهد (بدون استفاده از گوگرد و *Thiobacillus*) گردید (شکل ۳).

به‌طور کلی نتایج این پژوهش حاکی از تأثیر مثبت و معنی‌دار ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* توأم با کاربرد شش تن ورمی کمپوست بر وزن هزار دانه بود. در این راستا، جهانکار و وهاب (Jashankar & Wahab, 2014) دلیل تأثیر مثبت کمپوست بر وزن هزار دانه را به وجود موادی پیت‌مانند همراه با خلل و فرج، ظرفیت هوا دهی، زهکشی و ظرفیت نگهداری آب بالا که دارای سطوح زیاد برای جذب بالای مواد غذایی می‌باشند، دانستند. هنگامی که نیتروژن کافی در اختیار گیاه قرار گیرد، نیاز به عناصر غذایی اصلی دیگر مانند فسفر و پتاسیم نیز افزایش می‌یابد. این عنصر به رشد سریع گیاه (افزایش ارتفاع و تعداد شاخه‌های فرعی)، افزایش اندازه برگ، تعداد دانه و وزن هزار دانه کمک شایانی می‌کند. بنابراین نیتروژن، تمامی مشخصه‌های مؤثر بر عملکرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. رهمان و همکاران (Rehman et al., 2023) نتیجه گرفتند که ورمی کمپوست از طریق تحریک ریز جانداران مفید خاک و عرضه مداوم و پایدار عناصر معدنی به‌ویژه نیتروژن به گیاه موجب افزایش اجرای عملکرد می‌شوند.

کم مصرف مؤثر واقع شد و در نهایت افزایش وزن هزاردانه را فراهم ساختند (Hassan Belyani et al., 2019). رحیمی و همکاران (Rahimi et al., 2021) نیز بیان کردند که کاربرد توأم گوگرد + بیوسولفور و کاربرد کود شیمیایی گوگرد به صورت جداگانه باعث افزایش وزن هزار دانه کاملینا در مقایسه با شاهد به میزان ۱۵/۷ و ۱۵/۷ درصد شد.

همچنین نتایج این پژوهش حاکی از تأثیر مثبت و معنی دار گوگرد و باکتری *Thiobacillus* بر صفت وزن هزار دانه بود. در این راستا گزارش شده است که گوگرد پس از اکسید شدن در خاک علاوه بر نقش تغذیه ای مستقیم می تواند باعث کاهش موضعی pH خاک شود که این امر به دلیل تولید اسید سولفوریک می باشد. از این رو به صورت غیرمستقیم نیز بر افزایش جذب فسفر و دیگر عناصر غذایی



شکل ۳- مقایسه میانگین های برهم کنش عوامل آزمایشی از نظر صفت وزن هزار دانه

Figure 3- Comparisons of the average interaction of experimental factors in terms of thousand seed weight trait

میانگین های دارای یک حرف مشترک، اختلاف معنی داری با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Averages with a common letter do not have a significant difference using the LSD test at the five percent probability level.

اختلاف آماری معنی داری وجود نداشت (جدول ۴).

از دلایل تأثیر مثبت تیمار گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* می توان به این مورد اشاره نمود که احتمالاً ترشح هورمون های محرک رشد گیاه و افزایش جذب عناصر غذایی توسط باکتری های مورد استفاده، به دلیل کاهش دادن pH خاک و جذب احتمالی بیشتر برخی از عناصر غذایی مثل فسفر و پتاسیم، سبب تحریک رشد گیاه، افزایش ماده خشک، افزایش عملکرد و اجزای عملکرد شده است. کودهای زیستی، علاوه بر افزایش فراهمی عناصر غذایی معدنی خاک از طریق تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، محلول کردن فسفر، پتاسیم و گوگرد، مهار عوامل بیماری زا و تولید هورمون های تنظیم کننده و محرک رشد گیاه، عملکرد گیاهان را تحت تأثیر قرار می دهند (Sturz & Christie, 2003). در واقع گزارش شده است که استفاده از بیوسولفور (باکتری های اکسید کننده گوگرد) نیز به علت افزایش جذب برخی عناصر معدنی سبب افزایش فتوسنتز و به تبع آن

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد که صفت عملکرد دانه تنها تحت تأثیر اثر اصلی سطوح گوگرد و *Thiobacillus* در سطح یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). براساس نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی، میانگین عملکرد دانه در تیمار شاهد (عدم کاربرد گوگرد و *Thiobacillus*) برابر با ۲۷۱۱ کیلوگرم در هکتار بود که تحت سطوح تیماری ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد، ۴۰۰ کیلوگرم گوگرد، ۱۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* و ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* به ترتیب با مقادیر ۱۴، ۱۳، ۱۰ و ۴۲ درصد افزایش به میانگین ۳۰۸۵، ۳۰۵۹، ۲۹۶۹ و ۳۸۳۸ کیلوگرم در هکتار رسید. بر این اساس مشاهده شد که تیمار ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* بالاترین عملکرد دانه را داشت و از این نظر برتری آماری معنی داری نسبت به سایر سطوح تیماری داشت. در مقابل، بین سایر سطوح تیماری

عملکرد دانه و اجزای عملکرد کتان روغنی شد. با توجه به اینکه در راستای کشاورزی پایدار، استفاده از کودهای آلی و زیستی مورد توجه می‌باشد، در این پژوهش کودهای آلی ورمی کمپوست و کمپوست باگاس نیشکر و همچنین استفاده از باکتری *Thiobacillus* به‌عنوان کود زیستی در ترکیب با گوگرد توصیه می‌شود. همچنین اگرچه تیمار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد همراه با باکتری *Thiobacillus* از نظر عددی برتری جزئی نسبت به تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نشان داد، اما این تفاوت در سطح احتمال پنج درصد برای اغلب صفات مهم از قبیل عملکرد دانه تعداد شاخه فرعی و وزن هزار دانه از نظر آماری معنی‌دار نبود. بنابراین، با در نظر گرفتن اصل صرفه‌جویی در نهاده‌ها، تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد به همراه مایه‌تلقیح باکتری به‌عنوان گزینه بهینه و قابل توصیه ارائه می‌شود. به‌طور مشابه، اگرچه تیمار ورمی کمپوست عملکرد بهتری را از خود نشان داد، اما اختلاف آماری معنی‌داری بین آن و تیمار کمپوست باگاس نیشکر در شاخص‌های اصلی مانند تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول مشاهده نشد. از آنجاکه هزینه تهیه و تأمین کمپوست باگاس نیشکر به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از ورمی کمپوست است، و با استناد به نتایج این تحقیق که برتری قطعی برای ورمی کمپوست اثبات نکرد، کمپوست باگاس نیشکر به‌عنوان یک گزینه مقرون‌به‌صرفه و قابل توصیه برای کشاورزان معرفی می‌گردد. انجام مطالعات دقیق‌تر اقتصادی (تحلیل هزینه-فایده) در آینده می‌تواند این استدلال را تقویت کند.

اجزای عملکرد و در نهایت عملکرد دانه گردید. در این راستا، بابایی و همکاران (Babaei et al., 2013) بیان کردند که تأثیر مثبت گوگرد و مایه تلقیح *Thiobacillus* بر عملکرد سویا (*Glycin max* L.) می‌تواند به نقش مستقیم عنصر گوگرد در تغذیه گیاه از یک طرف و به تأثیر گوگرد بر pH خاک و انحلال عناصر در خاک‌های آهکی و قلیایی و در نهایت افزایش جذب این عناصر توسط گیاه از طرف دیگر مربوط باشد. نتایج نشان داد که در این پژوهش، وزن هزار دانه، تعداد شاخه و انشعابات فرعی، مهم‌ترین صفات مرتبط با افزایش عملکرد کتان روغنی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر حاکی از تأثیر مثبت کاربرد کود آلی به‌ویژه ورمی کمپوست بر صفات عملکرد و اجزای عملکرد کتان روغنی بود، به‌طوری که بیشترین وزن هزار دانه و عملکرد دانه، در شرایط کاربرد تیمار شش تن ورمی کمپوست به دست آمد. همچنین در مقایسه سطوح مختلف گوگرد و *Thiobacillus* مشخص شد که بیشترین عملکرد دانه مربوط به تیمار ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* بود. به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر حاکی از تأثیر مثبت و معنی‌دار تیمارهای کاربرد ورمی کمپوست در بین سطوح کود آلی و تیمار ۲۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار + مایه تلقیح باکتری *Thiobacillus* در بین سطوح گوگرد و باکتری *Thiobacillus* بود که کاربرد تلفیقی این تیمار منجر به بهبود

References

- Anandham, R., Sridar, R., Nalayini, P., Poonguzhali, S., & Madhaiyan, M. J. M. R. (2007). Potential for plant growth promotion in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cv. ALR-2 by co-inoculation of sulfur-oxidizing bacteria and Rhizobium. *Microbiological Research*, 162(2), 139-153. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.02.005>
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Welch, C., & Metzger, J. D. (2004). Influences of vermicomposts on field strawberries: 1. Effects on growth and yields. *Bioresource Technology*, 93(2), 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.014>
- Asadu, C. L. A., & Unagwu, B. O. (2012). Effect of combined poultry manure and inorganic fertilizer on maize performance in an ultisol of south-east Nigeria. *Journal of Soil Science*, 22(1), 79-87.
- Babaei, P., Golchin, A., Basharti, H., & Afzali, M. (2013). Effect of microbial sulfur fertilizer on nutrient uptake and yield of soybean in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 26(2), 145-151. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2012.126366>
- Bhatt, M. K., Labanya, R., & Joshi, H. C. (2019). Influence of long-term chemical fertilizers and organic manures on soil fertility-A review. *Universal Journal of Agricultural Research*, 7(5), 177-188. <https://doi.org/10.13189/ujar.2019.070502>
- Devi, K. N., Singh, L. N. K., Singh, M. S., Singh, S. B., & Singh, K. K. (2012). Influence of sulphur and boron fertilization on yield, quality, nutrient uptake and economics of soybean (*Glycine max*) under upland conditions. *Journal of Agricultural Science*, 4(4), 112-120. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n4p1>
- Deyholos, M. K. (2006). Bast fiber of flax (*Linum usitatissimum* L.): Biological foundations of its ancient and modern uses. *Journal of Plant Sciences*, 54(4), 273-280.
- Esmaili behbahani, R., Fateh, E., & Ayneband, A. (2019). Evaluation of growth characteristics of Flax. (*Linum usitatissimum* L.) with application of organic and nitrogen fertilizers. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 29(1), 137-150. (In Persian)

9. Haider, K., & Schaffer, A., (2009). Soil Biochemistry. Science Publishers, Enfield. 116 pp.
10. Hassan Belyani, M., Tadayon, M. R., & Fadaei Tehrani, A. A. (2019). Investigating some growth and performance characteristics of camelina under the influence of biological and chemical fertilizers. *Journal of Production and Processing of Agricultural and Horticultural Products*, 10(1), 39-52. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.47176/jcpp.10.1.209111>
11. Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1999). Soil Fertility and Fertilizers Prentice Hall. New Jersely, p. 345-355.
12. Hu, Z. Y., Zhao, F. J., & McGrath, S. P. (2005). Sulphur fractionation in calcareous soils and bioavailability to plants. *Plant and Soil*, 268, 103-109. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0229-0>
13. Jashankar, S. and Wahab, K. (2014). Effect of integrated nutrient management on the growth, yield components and yield of Sesame. Department of Agronomy, Annamalai University, Annamalainagar, 602-608.
14. Kopriva, S., Malagoli, M., & Takahashi, H. (2019). Sulfur nutrition: Impacts on plant development, metabolism, and stress responses. *Journal of Experimental Botany*, 70(16), 4069-4073. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz319>
15. Lafond, G. P., Irvine, B., Johnston, A. M., May, W. E., McAndrew, D. W., Shirliffe, S. J., & Stevenson, F. C. (2008). Impact of agronomic factors on seed yield formation and quality in flax. *Canadian Journal of Plant Science*, 88(3), 485-500. <https://doi.org/10.4141/CJPS07112>
16. Nemati, H., & Azizi, M. (2013). The effect of different levels of vermicompost and plant density on growth and development factors, seed yield and oil content of evening primrose medicinal plant. *Plant Products*, 36(2), 23-34. (In Persian)
17. Pali, V., & Mehta, N. (2014). Evaluation of oil content and fatty acid compositions of flax (*Linum usitatissimum* L.) varieties of India. *Journal of Agricultural Science*, 6(9), 198. <https://doi.org/10.5539/jas.v6n9p198>
18. Poonia, K. L. (2000). Effect of planting geometry, nitrogen and sulfur on growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Eco-Physiology*, 3(1/2), 59-71. (In Persian)
19. Pramanik, P., Ghosh, G. K., Ghosal, P. K., & Banik, P. (2007). Changes in organic-C, N, P and K and enzyme activities in vermicompost of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants. *Bioresource Technology*, 98(13), 2485-2494. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.017>
20. Prasad, R., & Shivay, Y. S. (2018). Sulphur in soil, plant and human nutrition. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 88, 429-434. <https://doi.org/10.1007/s40011-016-0769-0>
21. Rahimi, A., Khals Ro, Sh., Wafaahed, F., & Zarei, S. (2021). The effect of organic fertilizers and humic acid on the absorption of NPK elements in the medicinal plant fennel. The Fifth National Conference on the Development of New Technologies in Medicinal Plants, Chemistry and Biology of Iran, Tehran, Iran.
22. Rehman, S. U., De Castro, F., Aprile, A., Benedetti, M., & Fanizzi, F. P. (2023). Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. *Agronomy*, 13(4), 1134. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041134>
23. Sharma, A., & Chetani, R. (2017). A review on the effect of organic and chemical fertilizers on plants. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5, 677-680. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.2103>
24. Shojaeian Kish, F., Yadavi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Salehi, A., & Hamidian, M. (2021). Improvement of physiological characteristics and nutrient uptake of linseed (*Linum usitatissimum*) with biofertilizers application under irrigation withholding at different growth stages. *Journal of Plant Process and Function*, 12(44), 67-76. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1400.10.44.9.5>.
25. Solomon, W. G. O., Ndana, R. W., & Abdulrahim, Y. (2012). The comparative study of the effect of organic manure cow dung and inorganic fertilizer NPK on the growth rate of maize (*Zea mays* L.). *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 2, 516-519.
26. Sturz, A. V., & Christie, B. R. (2003). Beneficial microbial allelopathies in the root zone: The management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil and Tillage Research*, 72(2), 107-123. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00082-5)
27. Tadayon, A., Tarabian, Sh., & Tedin, M. (2013). Effect of plant density on yield and quality of four commercial edible linseeds. *Bezra'i Agriculture*, 15(1), 15-26. <https://doi.org/10.22059/jci.2013.35719>
28. Wu, X. Q., Hou, L. L., Sheng, J. M., Ren, J. H., Zheng, L., Chen, D., & Ye, J. R. (2012). Effects of ectomycorrhizal fungus *Boletus edulis* and mycorrhiza helper *Bacillus cereus* on the growth and nutrient uptake by *Pinus thunbergii*. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 385-391. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0638-1>
29. Yang, L., Zhao, F., Chang, Q., Li, T., & Li, F. (2015). Effects of vermicomposts on tomato yield and quality and soil fertility in greenhouse under different soil water regimes. *Agricultural Water Management*, 160, 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.002>



Investigation of Factors Causing Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Yield Gap in Behshahr County Using CPA Method

M. Mahdavi Abdolmaleki¹, A. Soltani^{1*}, E. Zeinali¹, S. Jafar Nodeh¹

1- Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran

(*- Corresponding author's Email: afshin.soltani@gau.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 28 October 2025
Revised: 28 December 2025
Accepted: 28 January 2026
Available Online: 12 May 2026

Mahdavi Abdolmaleki, M., Soltani, A., Zeinali, E., & Jafar Nodeh, S. (2026). Investigation of factors causing cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield gap in Behshahr county using CPA method. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 345-361. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96207.1431>

Introduction

Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) is a strategic industrial crop, vital as the world's primary source of natural fiber and a significant source of edible oil and animal feed. Despite its importance to Iran's economy, a substantial "yield gap" exists between farmer-achieved yields and potential yields under optimal conditions. This gap, largely from suboptimal management, is a critical concern as Iran seeks to regain self-sufficiency in cotton production. While other regions have been studied, the specific agro-ecological conditions and local practices in Behshahr County, Mazandaran, necessitate a dedicated regional investigation. This study aimed to quantify the irrigated cotton yield gap in the Miankaleh region and identify the relative contribution of the most significant management factors using the Comparative Performance Analysis (CPA) method.

Materials and Methods

This survey-based research was conducted over two consecutive growing seasons (2021–2022) across 88 irrigated cotton farms in the Miankaleh district, selected to represent local diversity in management and yield. Data were collected via farmer interviews and field visits, covering farm characteristics, crop establishment, nutrition management, crop protection strategies, and irrigation practices. The Comparative Performance Analysis (CPA) method was employed. A stepwise multiple regression model was developed using SAS software to establish a quantitative function relating final yield to management factors. Qualitative variables were coded as binary (0/1). This model was used to estimate the potential yield (using optimal values for significant variables) and compare it to the average actual yield (using mean observed values), thereby quantifying the total yield gap and the contribution of each limiting factor.

Results and Discussion

The average actual seed cotton yield was 2103 kg ha⁻¹, while the estimated potential yield was 4620 kg ha⁻¹, revealing a substantial yield gap of 2518 kg ha⁻¹. This indicates farmers are realizing only 45.5% of their potential, leaving a 54.5% manageable yield gap. The wide yield variation (649 to 4370 kg ha⁻¹) confirmed the profound impact of management. The stepwise regression analysis ($r = 0.70$) identified four key management variables as the primary determinants. Pest management emerged as the most critical domain. The "number of pesticide applications" was the single most important factor, explaining 55% of the total yield gap. Its strong positive correlation indicated that higher yields were associated with more frequent spraying, a reactive response to severe pest pressure (especially cotton bollworm) reported in 90% of farms. The second most important factor was the "amount of top-dress nitrogen," accounting for 36% of the gap. Its positive coefficient confirmed that



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

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96207.1431>

current nitrogen application rates were, on average, suboptimal. Conversely, the "use of Proclaim Fit" (6% share) and the "use of Fenproximate (Ortus)" (3% share) both showed a significant negative correlation with yield. This paradox was not due to pesticide inefficiency. Instead, these chemicals served as "proxy variables", indicating a critical flaw in management timing. Farmers used these specific chemicals as a late-stage response to severe infestations, after economic damage thresholds had been exceeded.

Conclusion

In conclusion, the cotton yield gap in the Behshahr region is substantial at 54.5% (2518 kg ha⁻¹). This gap is primarily driven by two key management domains: suboptimal pest management (collectively accounting for 64% of the gap) and inadequate nitrogen fertilization (36%). The pest management issue is systemic, characterized by severe outbreaks and a reactive, poorly-timed control strategy. To effectively close this gap, agricultural extension programs must prioritize farmer education in two main areas. First, a shift from reactive spraying to proactive Integrated Pest Management (IPM) is essential, including training in field scouting, economic thresholds, and proper pesticide selection. Second, promoting balanced, soil-test-based nitrogen application strategies is crucial for optimizing plant nutrition. These targeted interventions offer the most practical pathway to enhancing cotton productivity in the region.

Keywords: Integrated Pest Management (IPM), Nitrogen top-dressing, Plant nutrition, Regression analysis, Sustainable production

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص ۳۶۱-۳۴۵

بررسی عوامل ایجادکننده خلأ عملکرد پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) در شهرستان بهشهر به روش CPA

معصومه مهدوی عبدالملکی^{۱*}، افشین سلطانی^{۱*}، ابراهیم زینلی^{۱*}، صفورا جعفر نوده^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸

چکیده

هدف این پژوهش، شناسایی عوامل مدیریتی مؤثر بر خلأ عملکرد پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) آبی در شهرستان بهشهر بود. این تحقیق پیمایشی طی دو سال زراعی (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) در ۸۸ مزرعه پنبه در منطقه میانکاله انجام شد. داده‌های مدیریتی و عملکرد مزارع از طریق مصاحبه و بازدید جمع‌آوری و به روش تحلیل مقایسه کارکرد (CPA) مبتنی بر رگرسیون گام‌به‌گام تحلیل گردید. نتایج نشان داد که بین متوسط عملکرد واقعی کشاورزان (۲۱۰۳ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد پتانسیل (۴۶۲۰ کیلوگرم در هکتار)، خلأ عملکردی برابر با ۲۵۱۸ کیلوگرم در هکتار (معادل ۵/۵۴ درصد) وجود داشت. تحلیل رگرسیونی نشان داد که مدیریت آفات و مدیریت تغذیه نیتروژن، تعیین‌کننده‌ترین عوامل در ایجاد این خلأ بودند. چهار عامل بیشترین تأثیر را داشتند: ۱- دفعات کاربرد آفت‌کش با سهم ۵۵ درصد، مهم‌ترین عامل بود که نشان‌دهنده چالش جدی با طغیان آفات (به‌ویژه کرم غوزه) و واکنش کشاورزان به آن بود. ۲- مقدار نیتروژن سرک با تأثیر مثبت ۳۶ درصدی، بر اهمیت تغذیه بهینه تأکید داشت. ۳- و ۴- استفاده از سموم پروکلیم فیت (سهم شش درصد) و فن پروکسی میت (اورتوس) (سهم سه درصد) همبستگی منفی و معناداری با کاهش عملکرد داشتند. این ارتباط منفی نه به دلیل ناکارآمدی سموم، بلکه به‌خاطر کاربرد نامناسب آن‌ها پس از وقوع خسارت اقتصادی و از بین رفتن حشرات مفید بود که ضعف در زمان‌بندی مبارزه را نشان می‌دهد. جهت کاهش خلأ عملکرد، تمرکز بر اصلاح زمان‌بندی مبارزه با آفات (IPM) و بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز رگرسیون، تغذیه گیاهی، تولید پایدار، مدیریت تلفیقی آفات، نیتروژن سرک

مقدمه

پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) به‌عنوان یکی از راهبردی‌ترین محصولات صنعتی، به‌دلیل سازگاری گسترده با شرایط محیطی متنوع، پتانسیل عملکرد بالا و نقش کلیدی در تأمین مواد اولیه صنایع نساجی، جایگاه ویژه‌ای در اقتصاد کشاورزی جهان دارد (Ijaz et al., 2019). دانه پنبه دارای حدود ۲۰ درصد روغن است و در جهان بعد از سویا، مهم‌ترین دانه روغنی به‌حساب می‌آید. علاوه‌بر کنجاله پنبه، دانه پنبه نیز ۳۵ تا ۴۵ درصد پروتئین داشته که برای خوراک دام استفاده می‌شود. از طرف دیگر، به‌علت اینکه این محصول

ماده اولیه صنعت نساجی می‌باشد و این صنعت از نوع اشتغال‌زا به حساب می‌آید، اهمیت تولید پنبه در شرایط کنونی کشور را بیش از پیش آشکار می‌سازد (Rezaei et al., 2021). سطح زیرکشت و عملکرد پنبه در جهان در سال ۲۰۲۲ به‌ترتیب ۳۱/۴ میلیون هکتار و ۲۲۱۷ کیلوگرم در هکتار بوده است (FAOSAT, 2024). سطح زیرکشت و عملکرد پنبه در ایران در سال زراعی ۱۴۰۱ به‌ترتیب ۱۱۸ هزار هکتار، ۳۱۶۱ کیلوگرم در هکتار و ۳۷۴ هزار تن بوده است. استان‌های خراسان رضوی، فارس، گلستان و اردبیل مهم‌ترین استان‌های تولیدکننده پنبه در ایران محسوب می‌شوند (Agricultural Statistics, 2023). استان مازندران دهمین تولیدکننده پنبه در کشور بوده، به‌طوری که سطح زیرکشت، عملکرد و تولید پنبه استان مازندران در سال ۱۴۰۱ به‌ترتیب ۱۱۷۹ هکتار، ۱۸۰۶ کیلوگرم در هکتار و ۲۱۲۹ تن بوده است (Agricultural Statistics, 2022). شایان ذکر است که بیش از ۹۰ درصد از سطح زیرکشت و

۱- گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
(*) نویسنده مسئول:
(Email: afshin.soltani@gau.ac.ir)

تولید پنبه در استان مازندران مربوط به شهرستان بهشهر می باشد. بیشترین سطح زیرکشت پنبه کشور با حدود ۳۲۰ هزار هکتار مربوط به سال ۱۳۷۵ بوده و پس از آن سطح زیرکشت این محصول در کشور کاهش یافته است. کاهش سطح زیرکشت پنبه باعث شده که ایران از یک صادرکننده به یک واردکننده پنبه تبدیل شود. روند نزولی کشت پنبه در کشور باعث شده که وزارت جهاد کشاورزی، طرح خودکفایی در تولید پنبه تا سال ۱۴۰۴ را در دستور کار خود قرار دهد (Seyyedjalali et al., 2021).

یک راه مهم برای نیل به افزایش تولید این گیاه در کشور، شناسایی میزان خلأ عملکرد این گیاه و دلایل آن در مناطق مهم کشت این گیاه است. به دلیل مدیریت نامطلوب کشاورزان از قبیل تاریخ کاشت نامناسب، مدیریت نامطلوب نهاده‌ها (کود، آب و سموم) و مدیریت نامطلوب آفات و بیماری‌ها معمولاً بین عملکرد واقعی کشاورزان و پتانسیل عملکرد فاصله وجود دارد که یکی از مشکلات اصلی کشاورزی در ایران است (Soltani & Mirzaei, 2022). خلأ عملکرد، به تفاوت میان عملکرد واقعی مزارع کشاورزان و عملکرد پتانسیل اطلاق می شود. عملکرد پتانسیل، بالاترین محصولی است که می توان از یک رقم زراعی خاص در شرایط مدیریت بهینه و بدون محدودیت‌های حیاتی (مانند کمبود آب و مواد مغذی) به دست آورد. در این شرایط، مدیریت شامل تأمین کافی آب و کود و نیز مهار مؤثر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز است تا هیچ‌یک از این عوامل باعث کاهش عملکرد نشوند. این تعریف در شرایط محدودیت منابع آبی نیز کاربرد دارد؛ در این حالت، عملکرد پتانسیل به حداکثر محصولی اطلاق می گردد که با مدیریت بهینه منابع آب محدود، قابل دستیابی است (Soltani & Mirzaei, 2022)؛ دستیابی به حداکثر پتانسیل عملکرد (۱۰۰ درصد) در کشاورزی، به‌ویژه در زمینه کاهش خلأ عملکرد، اغلب از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی بهینه نیست. دلیل این امر، افزایش تصاعدی و نامتناسب مصرف نهاده‌ها و منابع (مانند کود، سموم و آب) برای جبران ۲۰ درصد نهایی خلأ عملکرد است. این راهبرد علاوه بر آنکه نیازمند مدیریت بسیار دقیق و هزینه‌بر است، می تواند منجر به فشار مضاعف بر بوم‌نظام و کاهش توجیه‌پذیری اقتصادی گردد؛ بنابراین، هدف‌گذاری واقع‌بینانه و منطقی در مدیریت کشاورزی، دستیابی به حدود ۸۰ درصد پتانسیل عملکرد است که ضمن حفظ بهره‌وری بالا، تعادل مناسبی میان بازده اقتصادی و پایداری محیط زیست برقرار می کند (van Lobell et al., 2009; Ittersum et al., 2013). واحدهای آخر نهاده‌هایی که مورد استفاده قرار می گیرند تا بالاترین عملکردها به دست آید معمولاً از نظر زیست‌محیطی، آلودگی زیادی به همراه دارند. ۸۰ درصد پتانسیل عملکرد، عملکرد قابل دستیابی است که با برنامه‌ریزی صحیح می توان به آن دست پیدا کرد و اختلاف بین عملکرد قابل دستیابی و عملکرد واقعی را خلأ قابل دستیابی یا خلأ قابل مدیریت

می گویند (Soltani & Mirzaei, 2022). تحقیقات متعددی در زمینه آنالیز خلأ عملکرد در مقیاس‌های مختلف، از سطح مزرعه تا سطح جهانی انجام شده است (Van Ittersum et al., 2013). این تحقیقات نشان داده‌اند که عوامل متعددی مانند کمبود آب، کمبود مواد مغذی، آفات و بیماری‌ها، تنش‌های محیطی، روش‌های نامناسب کشاورزی و محدودیت‌های ژنتیکی، می توانند در کاهش عملکرد محصولات کشاورزی نقش داشته باشند. با شناسایی این عوامل و اعمال راهکارهای مناسب برای رفع آن‌ها، می توان عملکرد واقعی محصولات کشاورزی را به سطح پتانسیل خود نزدیک کرد و تولید غذا را به‌طور پایدار افزایش داد.

آنالیز خلأ عملکرد به‌عنوان ابزاری مفید و کاربردی، می تواند به کشاورزان، سیاست‌گذاران و محققان در برنامه‌ریزی برای افزایش تولید غذا و تأمین امنیت غذایی در سطح ملی و جهانی کمک کند (Van Ittersum et al., 2013). براساس اطلس خلأ عملکرد کشور (Soltani et al., 2018) و نیز گزارش کمری (Kamari, 2021)، در مناطق اصلی کشت پنبه، خلأ عملکرد بین ۴۳ تا ۶۴ درصد با میانگین ۶۱ درصد گزارش شده است. این میزان معادل ۲۵۶۳ کیلوگرم در هکتار خلأ قابل مدیریت است. در این گزارش، استان‌های شمالی ایران به‌ویژه استان گلستان در مقایسه با سایر مناطق اصلی کشت، دارای پایین‌ترین عملکرد واقعی و پایین‌ترین پتانسیل عملکرد هستند. باین‌حال، منطقه غرب استان گلستان، بالاترین پتانسیل بهره‌وری آب پنبه را به خود اختصاص داده است که نشان می دهد، امکان افزایش قابل توجه عملکرد در این منطقه وجود دارد. در ارتباط با دلایل خلأ عملکرد پنبه در شمال کشور، فقط دو مطالعه در منابع یافت شد. شکرگزار دارابی (Shekargozar Darabi, 2016)، خلأ عملکرد پنبه آبی را در استان گلستان بررسی و پتانسیل و خلأ عملکرد پنبه را با روش مقایسه کارکرد به‌ترتیب ۷/۲ و ۳/۳ تن در هکتار گزارش کرد. نتایج این مطالعه حاکی از این بود که کود آلی مصرفی با ۲۵/۴ درصد، بیشترین تأثیر بر افزایش عملکرد پنبه داشت. متغیرهایی نظیر تاریخ کاشت با ۲۰/۱ درصد، فسفر کودی با ۱۵/۷ درصد، مشکل علف‌های هرز با ۱۱/۸ درصد، تعداد آبیاری با ۱۰/۴ درصد، تاریخ برداشت با ۸/۸ درصد، تراکم با ۶/۷ درصد و مصرف علف‌کش با سه درصد تأثیر، سایر عوامل ایجادکننده خلأ عملکرد بودند. عقیلی و همکاران (Aghili et al., 2024) عوامل ایجادکننده خلأ عملکرد پنبه تحت کشت آبی را در کردکوی (غرب استان گلستان) مورد مطالعه قرار داد. نتایج آن‌ها نشان داد که پتانسیل عملکرد و خلأ عملکرد به‌ترتیب ۵۰۶۱ و ۲۸۶۹ کیلوگرم در هکتار بود. در طی این پژوهش، آفات با ۴۹ درصد، ضدعفونی بذر با ۳۱ درصد، آبیاری قبل از کاشت با ۱۰/۲ درصد، حضور علف‌های هرز با ۶/۷ درصد و روش کاشت با ۲/۹ درصد تأثیر، از جمله مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد کشاورزان گزارش شد. همچنین سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2023)،

جمع‌آوری داده‌ها

جهت جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز برای کمی‌سازی تولید و برآورد خلأ عملکرد کشت آبی پنبه، انجام کار میدانی و مصاحبه شخصی (چهره به چهره) با کشاورزان نیاز است. بدین منظور، در سال اول ۵۱ مزرعه و در سال دوم ۳۷ مزرعه پنبه (سعی شد که مزارع انتخابی تکراری نباشند) در منطقه میانکاله در نظر گرفته شد. این تفاوت ناشی از شرایط اجرایی و همکاری کشاورزان در سال‌های مختلف بوده است، اما مجموع داده‌ها برای تحلیل رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفت. براساس اطلاعات موجود از کشاورزان در مرکز جهاد کشاورزی میانکاله، مزارعی انتخاب شدند که از لحاظ سطح زیرکشت، مدیریت‌های مختلف و همچنین عملکرد برداشتی دارای تنوع باشند. مزارع انتخابی در چندین نوبت مورد بررسی قرار گرفته و مشاهدات ثبت شد. جمع‌آوری داده‌ها دوساله (طی سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) صورت گرفت.

اطلاعات مورد نیاز مربوط به کشاورزان (سن، تحصیلات و تجربه)، مزرعه (موقعیت، شیب، وضعیت زه‌کش و آب‌گرفتگی مزرعه)، مدیریت زراعی شامل عملیات تهیه زمین (نوع ادوات، نوع، تعداد و زمان شخم، دیسک و ...)، محصول قبلی، رقم مورد استفاده، مقدار بذر و روش کاشت، زمان کاشت، کود (نوع کود، میزان کود، روش مصرف کود و زمان مصرف کود پایه و سرک)، مبارزه با آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز (میزان مصرف و نوع سموم مصرفی)، تعداد آبیاری، روش آبیاری (سامانه‌های آبیاری سنتی و تحت فشار و غیره) و زمان آبیاری و مسائل مربوط به برداشت (نوع ادوات، زمان برداشت و میزان عملکرد)، اطلاعات مربوط به گیاه زارعی در طول فصل رشد و مشکلات تولید مانند مشکل آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز در هر مزرعه از طریق پرسش از کشاورزان و یا مشاهده و اندازه‌گیری تکمیل شد. در پایان فصل رشد، میزان عملکرد واقعی برداشت‌شده توسط کشاورزان ثبت گردید.

به‌منظور مستندسازی تولید پنبه، از توزیع فراوانی جمعیتی یا نسبی استفاده شد. در این بررسی‌ها، دامنه تغییرات و شیوه انجام هر عملیات مدیریتی انجام‌شده در مزارع پنبه و همچنین نسبتی از کشاورزان که از شیوه‌های مختلف هریک از این عملیات مدیریتی استفاده کرده‌اند، مشخص شد. به‌منظور ارزیابی دلایل خلأ عملکرد در مزارع کشاورزان از روش تحلیل مقایسه کارکرد (CPA) استفاده شد. در این روش، در واقع کارکرد کشاورزان مختلف با یکدیگر مقایسه شده و دلایل خلأ عملکرد استخراج گردید (Soltani et al., 2010). برای تعیین این مدل عملکرد، رابطه بین تمام متغیرهای اندازه‌گیری‌شده کمی و کیفی (متغیرهای کیفی به‌صورت صفر و یک کدگذاری خواهند شد) و عملکرد از طریق روش رگرسیون گام‌به‌گام (Rezaei & Soltani, 1998) مورد بررسی قرار گرفت.

عوامل مدیریتی محدودکننده عملکرد پنبه و برآورد خلأ عملکرد آن را در غرب استان گلستان (شهرستان‌های کردکوی و بندرگز) با استفاده از روش تحلیل مقایسه کارکرد (CPA) بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که خلأ عملکرد ۳۱۱۹ کیلوگرم در هکتار (تفاوت بین میانگین عملکرد واقعی ۱۹۸۸ کیلوگرم در هکتار و عملکرد پتانسیل ۵۱۰۸ کیلوگرم در هکتار) محاسبه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که عوامل مصرف نیتروژن، محلول‌پاشی عناصر ضروری، حجم آبیاری و زمان آبیاری در زمان جوانه زدن (به‌ترتیب با سهم ۳۰، ۱۹، ۱۵ و ۱۰ درصد) بیش‌ترین سهم را در ایجاد خلأ عملکرد داشتند.

اگرچه مطالعات ارزشمندی، از جمله پژوهش سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2023)، در زمینه شناسایی خلأ عملکرد انجام شده است، این مطالعه تنها شهرستان‌های کردکوی و بندرگز در استان گلستان را دربر می‌گیرد. ازاین‌رو، با توجه به تفاوت‌های اقلیمی، مدیریتی و شرایط کشت پنبه در شهرستان بهشهر استان مازندران، انجام پژوهشی مستقل برای شناسایی عوامل بومی مؤثر بر خلأ عملکرد در این منطقه ضروری به نظر می‌رسد تا بتوان براساس نتایج آن، راهکارهای مدیریتی متناسب با شرایط منطقه ارائه کرد. مطالعه حاضر به بررسی و شناسایی عوامل به‌وجودآورنده خلأ عملکرد پنبه آبی در منطقه میانکاله می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در منطقه میانکاله شهرستان بهشهر استان مازندران انجام شد. شهرستان بهشهر از شمال به خلیج میانکاله، از شرق به استان گلستان، از جنوب به منطقه کوهستانی هزارجریب و استان سمنان و از غرب به شهرستان نکا محدود است. این شهرستان ۱۴۱۶/۳ کیلومترمربع وسعت دارد و در ارتفاع ۱۷ متری از سطح دریا واقع شده است. این شهرستان در منطقه‌ای جلگه‌ای و ساحلی و در کوهپایه البرز شرقی قرار دارد. به‌علت پستی و بلندی‌های این منطقه، دو نوع آب‌وهوای گرم و نیمه‌مرطوب و معتدل و نیمه‌مرطوب تا نیمه‌خشک در این ناحیه حکم‌فرما است (Najafi Terojeni et al., 2022).

این پژوهش در ۸۸ مزرعه تحت کشت پنبه دهستان میانکاله انجام گرفت. داده‌های هواشناسی مربوط به دوره رشد پنبه نیز از ایستگاه هواشناسی همدیدی بندر امیرآباد بهشهر جمع‌آوری گردید (جدول ۱). در جدول ۱، آمار هواشناسی فصل رشد پنبه که معمولاً از فروردین آغاز و تا آبان برداشت می‌گردد، ارائه شده است. میانگین بارندگی در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ به‌ترتیب ۲۵/۹ و ۶۱/۴ میلی‌متر می‌باشد که نسبت به میانگین درازمدت ۱۵ ساله (۱۳۸۸-۱۴۰۲) منطقه میانکاله از بارندگی کمتری برخوردار بوده است.

جدول ۱- میانگین مؤلفه‌های آب‌وهوایی در فصل رشد پنبه (فروردین تا آبان) در مقایسه با میانگین آمار بلندمدت ۱۵ ساله (۱۳۸۸-۱۴۰۲)
Table 1- Average weather components in the cotton growing season (April to November) compared to the 15-year long-term average (2009-2023)

ماه Month واحد Unit	سال Year	دمای کمینه Min temp. (°C)	دمای بیشینه Max temp. (°C)	تبخیر و تعرق Evapotranspiration (mm)	ساعت آفتابی Sunshines (hours in month)	رطوبت نسبی Mean humidity (%)	میانگین ماهانه بارندگی Precipitation average monthly (mm)
فروردین April	1401	10.5	18.6	98.5	18	78	176.7
	2022						
	1402	10.7	19.9	86.3	47.8	76	214.2
اردیبهشت May	1401	15.4	22.4	125	27.2	80	172.2
	2022						
	1402	15.2	23.5	127.8	41.4	78	246.7
خرداد June	1401	19.5	27.6	175.7	1.4	74	332.7
	2022						
	1402	20.6	25.6	240	6.32	75	262.3
تیر July	1401	23.2	31.3	226.5	1.2	74	316.3
	2022						
	1402	22.6	28	280	8.4	74	259.9
مرداد August	1401	23.9	32	176.7	17.3	77	254.1
	2022						
	1402	24.7	33.7	225.6	3.2	70	282.1
شهریور September	1401	21.1	31.9	167.2	11.1	73	288.6
	2022						
	1402	21.8	31.5	172.1	20.4	69	249.3
مهر October	1401	19.8	28.4	98.9	29.1	78	183.5
	2022						
	1402	16.6	26.1	74	266.4	76	207
آبان November	1401	11.8	20.8	33	78.8	81	176.1
	2022						
	1402	14.2	24.4	44.7	65.5	79	202
میانگین ۱۵ ساله	1388-1402 2009-2023	14.1	21.83	85.11	52.63	79.2	197.29

شامل شناسایی محدودیت‌های عملکرد و سپس ایجاد یک تابع عملکرد از طریق رگرسیون گام‌به‌گام برای تعیین رابطه بین متغیرهای کمی و کیفی (متغیرهای کیفی به‌صورت صفر و یک کدگذاری می‌شوند) و عملکرد نهایی است. پس از ایجاد مدل، نرمال بودن داده‌ها و ضرایب متغیرها بررسی می‌شود.

در مرحله نهایی تحلیل CPA، جهت برآورد عملکردها، ابتدا مقادیر میانگین متغیرهای مدیریتی و محیطی مشاهده‌شده در مزارع در مدل تولید قرار گرفت تا میانگین عملکرد منطقه محاسبه شود. سپس برای تعیین عملکرد پتانسیل، از مقادیر بهینه هر متغیر در مدل استفاده گردید. این مقادیر بهینه براساس بهترین سطح مدیریت مشاهده‌شده در بین مزارع تحت مطالعه (به‌عنوان مثال، حداکثر مقدار برای متغیرهای دارای ضریب مثبت) تعیین شدند. در نهایت، سهم هر

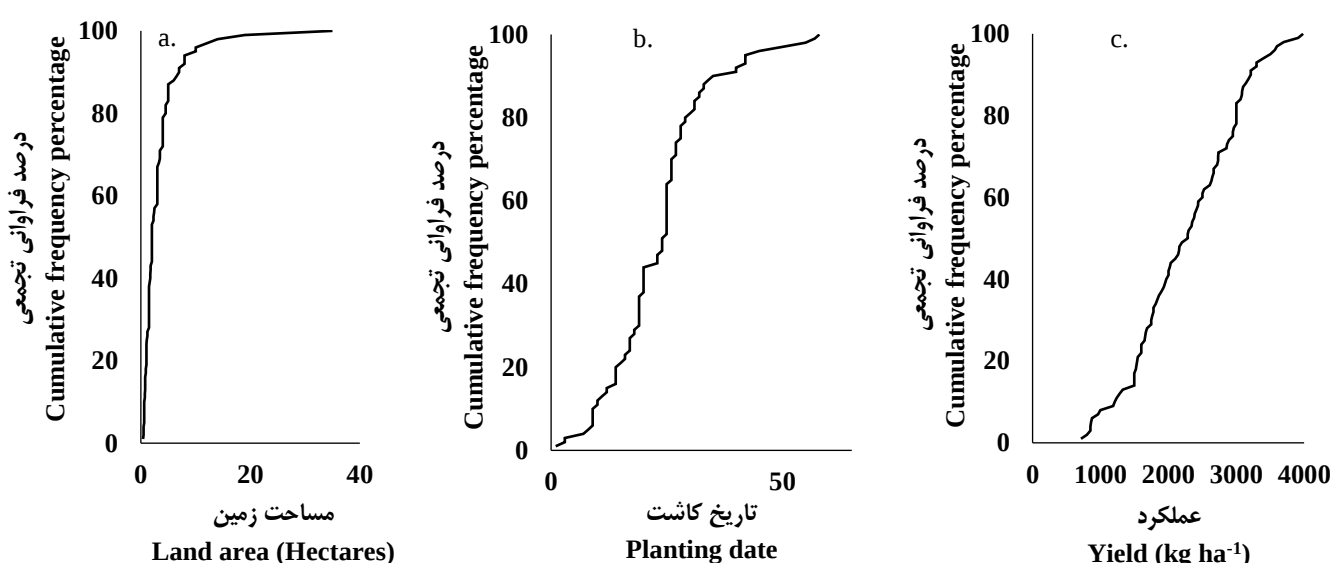
روش CPA که یک ابزار کمی برای بررسی خلأ عملکرد است، توسط دی بی (De Bie, 2000) با هدف شناسایی محدودیت‌های اصلی تولید و ایجاد توابع کمی برای خلأ عملکرد ابداع گردید. این رویکرد در تحلیل عملکرد محصولات مختلفی در سراسر جهان و همچنین در ایران برای محصولاتی نظیر برنج (*Oryza sativa* L.)، کلزا (*Brassica napus* L.) و گندم (*Triticum aestivum* L.) با موفقیت به کار رفته است (Torabi et al., 2011; Hajjarpoor et al., 2017; Yousefian et al., 2021). اساس روش CPA بر این فرض استوار است که کشاورزان در سطوح مختلفی از فناوری (از سنتی تا پیشرفته) فعالیت می‌کنند و با مقایسه عملکرد واقعی مزارع آن‌ها تحت شرایط محیطی و مدیریتی متنوع، می‌توان عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد را استخراج کرد (De Bie, 2000). فرآیند تحلیل

مساحت ۸۰ درصد از مزارع، کم‌تر از سه هکتار بوده است (شکل ۱). سابقه کشاورزان در تولید پنبه بین سه تا ۶۰ سال متغیر بود. ارقام کشت‌شده در مزارع دهستان میانکاله شامل ارقام لطیف، May344، گلستان، تابان و AGN بودند که به‌ترتیب ۷۴، ۱۸، ۴/۵، ۲ و ۱ درصد سطح زیرکشت را به خود اختصاص دادند. ۴۶ درصد بذرهای کرکدار و ۵۴ درصد بدون کرک (دلینته) بودند که تمامی بذور بدون کرک با قارچ‌کش کربوکسین‌تیرام ضدعفونی شده بودند. کشاورزانی که از بذر کرکدار استفاده کرده بودند، به‌دلیل سخت بودن ضدعفونی بذر کرکدار از ضدعفونی بذر صرف نظر کرده بودند.

متغیر در ایجاد خلأ عملکرد، از طریق تفاضل حاصل‌ضرب مقدار میانگین در ضریب رگرسیونی از حاصل‌ضرب مقدار بهینه در همان ضریب، محاسبه و گزارش شد (Torabi et al., 2011). انجام کلیه مراحل فوق با استفاده از نرم‌افزار SAS و دستورات مربوط به رویه‌های نرم‌افزار (Soltani, 2007) و رسم شکل و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

اراضی پنبه انتخاب‌شده دارای مساحت‌های متفاوتی بودند و دامنه مساحت مزارع بین ۳۰۰۰ مترمربع تا ۷۰۰۰۰ مترمربع متغیر بود.



شکل ۱- درصد فراوانی تجمعی در دهستان میانکاله شهرستان بهشهر A: مساحت زمین پنبه، B: تاریخ کاشت پنبه، و C: عملکرد پنبه (کیلوگرم در هکتار)

Figure 1- Cumulative frequency percentage in Miyankaleh rural district, Behshahr county: A) cotton field area, B) cotton planting date, and c) cotton yield (kg ha⁻¹)

شده است. تعداد دفعات کود سرک مصرفی از یک بار تا چهار بار متغیر بوده و در ۶۱ درصد از مزارع، حداقل دو بار کودپاشی سرک انجام شده است. در ۶۷ درصد از مزارع که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند، علف‌کش پیش‌رویشی ترفلان استفاده گردید و در یک درصد از مزارع از علف‌کش پس‌رویشی سوپرگلانت استفاده شد. وجین دستی به‌وسیله فوکا (تیشه) علاوه بر مهار علف‌های هرز جهت سله‌شکنی و تنک کردن بوته‌های پنبه نیز انجام می‌شود که در این منطقه مرسوم می‌باشد؛ بنابراین در مزارعی که پس از آبیاری و یا بارندگی سله ایجاد شده، به‌منظور سله‌شکنی انجام می‌شود. ۲۶ درصد از مزارع یک بار، ۶۵ درصد مزارع دو بار و ۹ درصد از مزارع سه بار وجین شدند. مرحله سوم وجین معمولاً برای مزارعی که آلودگی

کشت پنبه در میانکاله از تاریخ ۵ اردیبهشت آغاز و تا ۱۱ تیر ادامه داشت (۳۶ تا ۱۰۴ روز از اول فروردین‌ماه) (شکل ۱). کشت در ۹۸ درصد از مزارع تا قبل از تیرماه انجام شد. ۴۶ درصد کشاورزان از روش دست‌پاش (سنتی) و ۵۴ درصد از کشاورزان از روش مکانیزه (ردیف‌کار) برای کشت پنبه استفاده نمودند. میزان مصرف بذر پنبه از ۱۰ تا ۴۴ کیلوگرم در هکتار متغیر بود، در ۴۳ درصد مزارع میزان بذری مصرفی ۱۰ تا ۲۰ کیلوگرم در هکتار و در ۵۷ درصد از مزارع میزان بذری مصرفی بین ۲۰ تا ۴۴ کیلوگرم در هکتار بود. تراکم بوته در مزارع مورد بررسی پنبه بین ۴ تا ۱۵ بوته بود که ۴۷ درصد مزارع تراکم هشت تا نه بوته در مترمربع داشته‌اند. در ۶۱ درصد از مزارع، کود پایه استفاده شده است و در ۹۴ درصد از مزارع کود سرک (اوره) مصرف

افزایش یافت. موسوی (Mousavi, 2015) گزارش کرد که حضور علف‌های هرز در مزارع پنبه باعث کاهش عملکرد از ۳۲ تا ۹۸ درصد گردید.

جدول ۳: متغیرهای کیفی مورد بررسی و تأثیر آن‌ها بر عملکرد را نشان می‌دهد. متغیرهایی شامل کشت پاییزه قبلی (کلزا و باقلا)، رقم کشت‌شده (لطیف و مای)، استفاده از کودهای منیزیم و روی، استفاده از سموم لاروین و کنفیدور و آبیاری معنی‌دار شدند.

در بین متغیرهای مدیریتی که اثر آن‌ها بر عملکرد پنبه مورد بررسی قرار گرفت، چهار متغیر مقدار نیتروژن سرک، دفعات کاربرد آفت‌کش، استفاده از پروکلیم فیت و استفاده از فن‌پروکسی میت (اورتوس)، بیشترین تأثیر را بر عملکرد پنبه میانکاله داشتند و به‌عنوان مهم‌ترین متغیرها شناسایی شدند. مدل (معادله) نهایی عملکرد به‌صورت رابطه رگرسیونی زیر (رابطه ۱) بود:

(۱)

$$Y \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = -622.349 + 4.06695X_1 + 275.015X_2 - 289.08X_3 - 515.94X_4$$

که در آن، Y: عملکرد پنبه، X₁: مقدار نیتروژن سرک، X₂: دفعات آفت‌کش، X₃: استفاده از پروکلیم فیت (حشره‌کش) و X₄: استفاده از فن‌پروکسی میت (اورتوس) (حشره‌کش/کنه‌کش) به‌عنوان متغیرهای مستقل و مؤثر بر عملکرد می‌باشند. سهم هر یک از متغیرهای محدودکننده عملکرد در جدول ۴ ارائه شده است و رابطه بین عملکرد مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در شکل ۲ نشان داده شد. براساس نتایج، مدل رگرسیونی به‌دست‌آمده با ضریب تبیین (R²) معادل ۰/۷ توانست ۷۰ درصد از تغییرات عملکرد پنبه در منطقه را به‌خوبی توجیه کند. نتایج مدل نهایی رگرسیون نشان داد که براساس متغیرهای معنی‌دار واردشده به مدل، مدیریت کود نیتروژن و مدیریت آفات در منطقه میانکاله، بیشترین سهم را در افزایش عملکرد پنبه داشتند. میانگین عملکرد برآوردشده با مدل، ۲۱۰۳ کیلوگرم در هکتار و عملکرد پتانسیل ۴۶۲۰ کیلوگرم در هکتار تخمین زده شد. مقادیر برآوردشده با مقادیر واقعی میانگین (۲۱۲۴ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد پتانسیل (۴۳۷۰ کیلوگرم در هکتار) در مزارع نزدیک بودند. براساس نتایج این پژوهش، خلأ عملکرد پنبه در منطقه میانکاله ۲۵۱۸ کیلوگرم در هکتار و معادل ۵۴/۵ درصد محاسبه شد. این نتایج نشان می‌دهد که بین عملکرد واقعی کشاورزان و عملکردی که می‌توانند برداشت کنند، ۲۵۱۸ کیلوگرم فاصله (خلأ) وجود دارد که با بهبود مدیریت قابل رفع خواهد بود.

زیادی به علف‌هرز دارند، انجام می‌شود. در مزارع مورد بررسی به‌دلیل عدم وجود مشکل جدی برای بیماری‌های قارچی از قارچ‌کش استفاده نشد. مشکل آفات در دو درصد از مزارع خیلی شدید، ۸۸ درصد شدید و ۱۰ درصد متوسط بوده است. تعداد سم‌پاشی علیه آفات از دو تا ۱۰ بار متغیر بود و مزارع دیرکاشت بیشترین آفات را داشتند. در دو سال انجام این آزمایش، طغیان آفت کرم غوزه در مزارع دیده شد که باعث استفاده از طیف وسیعی از آفت‌کش‌های مختلف و تعداد زیاد دفعات سم‌پاشی شد. آفت‌کش‌هایی نظیر دیکلروس، فیپرونیل، دوروسبان، کراکرون، کاراته، امامکتین‌بنزوات، آدمیرال، سایپرمتین، لاروین، استامی‌پراید، کنفیدور، دیمیتوات، پروکلیم‌فیت، دانیتول، آبامکتین، فن‌پروکسی میت (اورتوس)، روی‌اگرو، فن‌والریت، دلتامترین، آوانت، آوانت‌اکسترا، بیک‌مک، تبوفنازاید، مالاتیون، تایدفیت، دیازینون و پرمترین (آمبوش) در طی سم‌پاشی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. طبق اطلاعات جمع‌آوری‌شده، تعداد دفعات آبیاری از یک تا شش بار متغیر بود و ۴۱ درصد از مزارع حداقل سه بار آبیاری شدند. در منطقه مورد مطالعه معمولاً انجام آبیاری بعد از کشت مرسوم می‌باشد و قبل از کاشت آبیاری انجام نمی‌شود. برداشت مزارع پنبه در منطقه مورد مطالعه از نیمه دوم شهریور آغاز و تا پایان آبان ماه ادامه داشت. تعداد چین‌ها از یک تا هفت بار متغیر بود و ۴۹ درصد از مزارع حداقل چهار چین داشتند. عملکرد پنبه در مزارع از ۶۴۹ کیلوگرم در هکتار تا ۴۳۷۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بود و عملکرد پنبه در ۱۳ درصد از مزارع بیشتر از ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۱). رابطه رگرسیونی ۳۶ متغیر کمی مدیریتی با عملکرد پنبه مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). از بین این متغیرها، تعداد دیسک، مقدار روی پایه، مقدار منیزیم پایه، مقدار نیتروژن خالص سرک، مقدار اسیدآمین، تعداد دفعات آفت‌کش و تعداد آبیاری بر عملکرد تأثیر مثبت داشتند که با کاربرد مناسب این عوامل می‌توان عملکردهای بالاتری داشت. از طرفی، بین مشکل علف‌هرز و عملکرد رابطه منفی (در سطح احتمال یک درصد) وجود داشت، به‌دلیل تراکم بالای علف‌هرز در مزارعی که علف‌هرز بیشتری دارند، رقابت بین بوته‌های پنبه با علف‌هرز به‌وجود آمده و علف‌هرز سهم بیشتری از عوامل رشد را به خود اختصاص داده و باعث کاهش عملکرد پنبه می‌گردد. نتایج بررسی رحیمی زاده (Rahimizadeh, 2020) که طی دو سال زراعی روی ارزیابی رشد و عملکرد پنبه در رقابت با علف‌های هرز در شرایط مصرف کودهای شیمیایی و بیولوژیک انجام دادند، نشان داد با مهار علف‌های هرز، عملکرد پنبه در سال اول تا ۶۷ درصد و در سال دوم تا ۵۰ درصد

جدول ۲- بررسی معنی‌داری متغیرهای (کمی) مورد مطالعه بر عملکرد پنبه

Table 2- Significant study of the studied (quantitative) variables on cotton yield

متغیر	Variable	a±se	b±se	R ²	Pr>F	معنی‌داری Significance
سن	Age	1930.17±368.9342	4.183486±7.753088	0.003374	0.590874	Ns
سابقه تولید	Production history	2185.702±185.3704	-2.45024±6.58067	0.001609	0.710557	Ns
مساحت کل	Total area	2097.214±146.214	9.860474±44.03017	0.000583	0.823329	Ns
آخرین سال از بقوله	Last year of legumes	2142.816±96.58464	-21.1339±54.73613	0.00173	0.700373	Ns
تعداد شخم	Number of plowing	2025.37±364.6002	97.60501±350.9106	0.000899	0.781567	Ns
تعداد دیسک	Number of disking	1476.332±199.5534	157.9007±44.7616	0.126406	0.000676	**
وضعیت بستر در زمان کاشت	Seedbed condition at planting	1476.332±199.5534	22.63689±105.279	0.000537	0.830262	Ns
رطوبت بستر هنگام کشت	Seedbed moisture at planting	2304.571±277.0123	-155.714±227.9128	0.005398	0.496306	Ns
مقدار بذر	Seed quantity/rate	2356.186±255.1133	-9.21531±9.575942	0.010654	0.338577	Ns
عمق کاشت	Planting depth	1816.553±586.9318	88.44037±167.076	0.003248	0.597932	Ns
شروع فصل تا اولین روز کشت	Start of season to first planting day	2048.156±393.8064	1.118639±5.669796	0.000452	0.844406	Ns
مقدار نیتروژن خالص پایه	Base net nitrogen amount	2116.036±88.01632	3.123227±10.74714	0.000981	0.772049	Ns
مقدار کود پتاس خالص پایه	Base net potassium fertilizer amount	2161.592±90.25366	-6.99268±6.589198	0.012926	0.291555	Ns
مقدار فسفات خالص پایه	Base net phosphate amount	2086.415±105.8699	1.870073±3.235935	0.003868	0.564836	Ns
مقدار کود خالص گوگرد پایه	Base net sulfur fertilizer amount	2102.92±92.87145	1.588504±3.058117	0.003128	0.604789	Ns
مقدار منیزیم پایه	Base magnesium amount	2098.269±79.90782	315.5182±104.1114	0.096491	0.003224	**
مقدار روی پایه	Base zinc amount	2098.269±79.90782	344.2017±113.576	0.096491	0.003224	**
مقدار اسید هیومیک	Humic acid amount	2116.143±83.68179	9.3181±10.46673	0.009132	0.375811	Ns
تعداد کود سرک	Number of top-dress fertilizers	1773.86±213.7051	202.7612±114.2302	0.035341	0.079432	Ns
مقدار نیتروژن خالص سرک	Top-dress net nitrogen amount	1746.604±159.474	4.409398±1.61036	0.080189	0.007509	**
مقدار اسید هیومیک (لیتر)	Humic acid amount (liter)	2139.234±82.65776	-80.3153±46.71075	0.033234	0.089136	Ns
مقدار اسید هیومیک (کیلو)	Humic acid amount (kilogram)	2120.819±84.66314	2.687653±11.21609	0.000667	0.811191	Ns
تعداد دفعات تقویتی	Number of supplemental applications	2255.494±167.9046	-66.4603±73.76009	0.009352	0.370087	Ns
مقدار کود تقویتی (کیلو)	Supplemental fertilizer amount (kg)	2128.317±106.6079	-2.0646±32.2789	4.76E-05	0.949149	Ns
مقدار کود تقویتی (لیتر)	Supplemental fertilizer amount (liter)	2136.83±104.9687	-7.37418±36.75075	0.000468	0.841443	Ns
تعداد اسید آمینه	Number of amino acid applications	2061.346±88.43881	276.0497±146.6592	0.039566	0.063183	Ns
مقدار اسید آمینه (لیتر)	Amino acid amount (liter)	2060.304±85.50191	184.3223±78.73649	0.059907	0.021545	*
مقدار اسید آمینه (کیلو)	Amino acid amount (kg)	2129.434±84.35931	-87.1892±196.6151	0.002281	0.658553	Ns
مقدار کود دامی (گوسفندی)	Manure amount	2133.593±84.22305	-30.6512±40.0048	0.00678	0.445663	Ns
مقدار کود دامی (گاوی)	Cattle manure	2132.407±83.64388	-1831.02±1961.623	0.010029	0.353217	Ns

تعداد دفعات آفت‌کش	Number of pesticide	901.045±266.9577	247.4194±51.86957	0.209219	7.46E-06	**
تعداد آبیاری	Number of irrigations	1386.266±238.9933	230.2412±70.40573	0.110599	0.001547	**
تراکم بوته پنبه در مترمربع	Cotton plant density (per m ²)	2723.738±365.3771	-67.4802±40.0615	0.031938	0.095727	Ns
تعداد چین	Number of pickings	1509.338±353.4298	155.0077±86.68069	0.035851	0.077256	Ns
نمره مشکل آفات	Pest problem score	713.8313±703.0941	357.6434±177.0992	0.045274	0.056554	Ns
مشکل علف هرز	Weed problem	3418.755±536.9022	-438.196±179.6492	0.064705	0.016776	*

*, **, و ns: به ترتیب معنی‌دار در یک درصد، پنج درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

ns, *, and ** are significant at 1%, 5%, and non-significant, respectively.

جدول ۳- بررسی معنی‌داری متغیرهای (کیفی) مورد مطالعه بر عملکرد پنبه
Table 3- Significant study of the studied (qualitative) variables on cotton yield

متغیر	Variable	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS	Pr>	معنی‌داری Significance
کشت پاییزه قبلی: گندم	Previous autumn cultivation: wheat	1	338070	0.46	ns
کشت پاییزه قبلی: کلزا	Previous autumn cultivation: rapeseed	1	3548483	0.01	*
کشت پاییزه قبلی: جو (<i>Hordeum vulgare</i>)	Previous autumn cultivation: barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	1	550211	0.34	ns
کشت پاییزه قبلی: شبدر (<i>Trifolium spp.</i>)	Previous autumn cultivation: clover (<i>Trifolium spp.</i>)	1	1117540	0.18	ns
کشت پاییزه قبلی: باقلا (<i>Vicia faba</i>)	Previous autumn cultivation: faba bean (<i>Vicia faba</i>)	1	2732978	0.03	*
کشت پاییزه قبلی: نخودفرنگی (<i>Pisum sativum</i>)	Previous autumn cultivation: pea (<i>Pisum sativum</i>)	1	40022	0.80	ns
کشت تابستانه قبلی: آیش	Previous summer cultivation: fallow	1	1400674	0.13	ns
کشت تابستانه قبلی: برنج	Previous summer cultivation: rice	1	124460	0.65	ns
کشت تابستانه قبلی: پنبه	Previous summer cultivation: cotton	1	1520651	0.11	ns
کشت تابستانه قبلی: کنجد (<i>Sesamum indicum</i>)	Previous summer cultivation: sesame (<i>Sesamum indicum</i>)	1	418145	0.41	ns
کشت تابستانه قبلی: هندوانه (<i>Citrullus lanatus</i>)	Previous summer cultivation: watermelon (<i>Citrullus lanatus</i>)	1	170435	0.60	ns
کشت تابستانه قبلی: گوجه‌فرنگی (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Previous summer cultivation: tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>)	1	667061	0.30	ns
شخم: انجام‌شده/نشده	Plowing: done/not done	1	109283	0.67	ns
نوع بذر: کرکدار/ دلینته	Seed type: downy/delinted	1	8936	0.90	ns
ضدعفونی: شده/نشده	Disinfected/not disinfected	1	8936	0.90	ns
استفاده از کاربوکسین تیرام داخلی	Use of carboxin-thiram (internal)	1	305752	0.48	ns
استفاده از کاربوکسین تیرام خارجی	Use of carboxin-thiram (external)	1	1266969	0.15	ns
رقم کشت‌شده: لطیف	Cultivar planted: latif	1	3766721	0.01	*
رقم کشت‌شده: مای	Cultivar planted: may	1	2790347	0.03	*
رقم کشت‌شده: گلستان	Cultivar planted: golestan	1	14141	0.88	ns
رقم کشت‌شده: تابان	Cultivar planted: taban	1	814624	0.25	ns
رقم کشت‌شده: AGN	Cultivar planted: AGN	1	215352	0.55	ns
نوع بذر: خودمصرفی/گواهی‌شده	Seed type: farmer-saved/certified	1	10321	0.90	ns
روش کاشت: دست‌پاش	Planting method: broadcast	1	63883	0.75	ns
روش کاشت: ردیف‌کار	Planting method: row planter	1	63883	0.75	ns
استفاده از کود پایه	Use of base fertilizer	1	596902	0.32	ns
استفاده از کود نیتروژن پایه	Use of base nitrogen fertilizer	1	177967	0.59	ns
استفاده از کود پتاس پایه	Use of base potassium fertilizer	1	111905	0.67	ns

استفاده از کود فسفر پایه	Use of base phosphorus fertilizer	1	800084	0.25	ns
استفاده از کود گوگرد پایه	Use of base sulfur fertilizer	1	373852	0.44	ns
استفاده از منیزیم	Use of magnesium	1	5102117	0.00	**
استفاده از روی	Use of zinc	1	5102117	0.00	**
استفاده از هیومیک اسید پایه	Use of base humic acid	1	482852	0.38	ns
استفاده از کود سرک زمین	Use of top dressing fertilizer (soil)	1	607080	0.32	ns
استفاده از اسید هیومیک	Use of humic acid	1	1239307	0.15	ns
استفاده از کود دامی	Use of animal manure	1	17344	0.87	ns
استفاده از آفت کش	Use of pesticide	1	34276	0.81	ns
استفاده از دیکلوروس	Use of dichlorvos	1	395456	0.42	ns
استفاده از فیپرونیل	Use of fipronil	1	153915	0.62	ns
استفاده از دورسبان	Use of dursban (chlorpyrifos)	1	496322	0.37	ns
استفاده از مانکوزب	Use of mancozeb	1	2135135	0.06	ns
استفاده از کر اکرون (پروفنفسوس)	Use of curacron (profenofos)	1	612554	0.32	ns
استفاده از کاراته	Use of karate	1	61170	0.75	ns
استفاده از امامتین بنزوات (کاپتن)	Use of emamectin benzoate (captan)	1	549189	0.34	ns
استفاده از آد میرال	Use of admiral	1	2088460	0.06	ns
استفاده از سایپرمتترین	Use of cypermethrin	1	418732	0.41	ns
استفاده از لاروین	Use of larvin	1	5650625	0.00	**
استفاده از استامی پراید	Use of acetamidrid	1	90911	0.70	ns
استفاده از کنفیدور	Use of confidor	1	2468270	0.04	*
استفاده از دیمیتوات	Use of dimethoate	1	1179952	0.16	ns
استفاده از پروکلیم فیت	Use of proclaim fit	1	164298	0.61	ns
استفاده از دانیتول	Use of danitol	1	667592	0.30	ns
استفاده از آبامکتین	Use of abamectin	1	164276	0.61	ns
استفاده از فن پروکسی میت (اورتوس)	Use of fenprothrin (ortus)	1	667592	0.30	ns
استفاده از روی اگرو	Use of zinc agro	1	1577071	0.11	ns
استفاده از فن والریت	Use of fenvalerate	1	778671	0.26	ns
استفاده از دلتامترین (دسیس)	Use of deltamethrin (decis)	1	2056960	0.07	ns
استفاده از آوانت	Use of avant	1	518743	0.36	ns
استفاده از آوانت اکسترا	Use of avant extra	1	676036	0.29	ns
استفاده از بیک مک	Use of beak mak	1	182055	0.59	ns
استفاده از تبوفنزااید	Use of tebufenozide	1	45854	0.79	ns
استفاده از مالاتیون	Use of malathion	1	172012	0.60	ns
استفاده از تایدفیت	Use of tidefit	1	101087	0.69	ns
استفاده از دیازینون	Use of diazinon	1	54321	0.77	ns
استفاده از پرمترین (آمبوش)	Use of permethrin (ambush)	1	403677	0.42	ns
استفاده از علف کش	Use of herbicide	1	2044121	0.07	ns
استفاده از ترفلان	Use of treflan	1	49.51	0.99	ns
استفاده از سوپر گالات	Use of super galant	1	20695	0.85	Ns
آبیاری: انجام شده/نشده	Irrigation: done/not done	1	447421	0.39	*

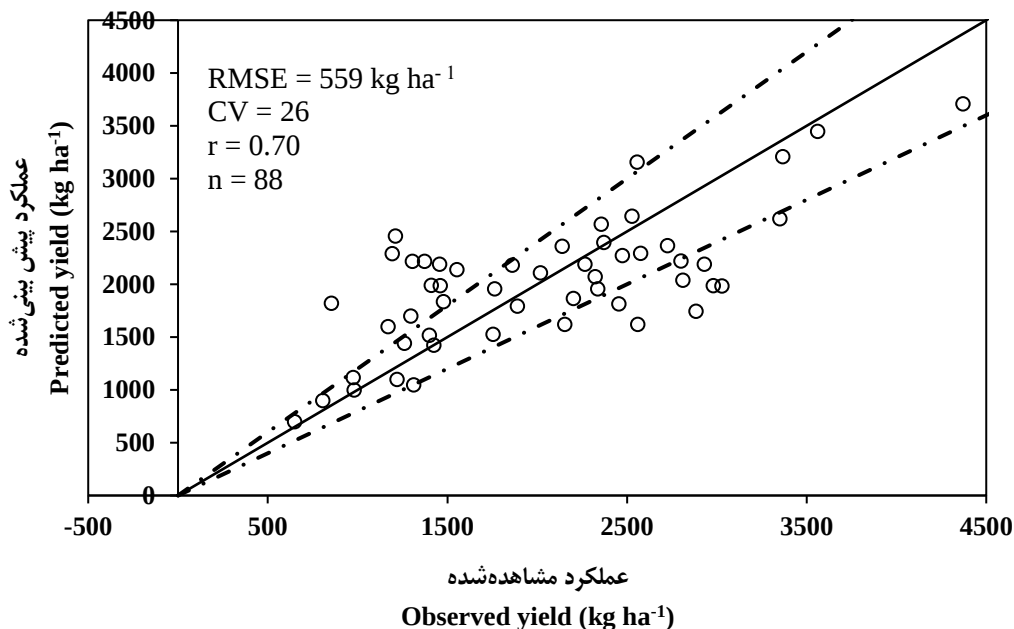
*، ** و ns: به ترتیب معنی دار در یک درصد، پنج درصد و عدم معنی داری می باشد..

ns, * and ** are significant at 1%, 5%, and non-significant, respectively.

جدول ۴- نتایج رگرسیون تأثیر متغیرهای مختلف بر خلأ عملکرد محصول پنبه (۵۴/۵ درصد خلأ)

Table 4- Regression Results of the Impact of Various Variables on the Yield Gap of Cotton Product yield (54.5% Gap)

متغیرها Variables	ضریب Coefficient	شکل متغیر در مدل Form of the variable in the model		عملکرد حاصله با مدل Yield by model		خلأ عملکرد Yield gap	
		میانگین Average	مقدار انتخاب شده Selected amount	میانگین Average	مقدار انتخاب شده Selected amount	مقدار Amount (kg ha ⁻¹)	درصد %
عرض از مبدأ Intercept	622.3486	1	1	622	622	-	-
(X ₁)	4.06695	85.61	306.8	348	1248	900	36
(X ₂)	275.0148	4.94	10	1359	2750	1392	55
(X ₃)	-289.078	0.5	0	-145	0	145	6
(X ₄)	-515.942	0.159	0	-82	0	82	3
میانگین عملکرد Average yield	-	-	-	2103	4620	2518	100

* مقدار نیتروژن سرک (X₁)، دفعات کاربرد آفت کش (X₂)، استفاده از پروکلیم فیت (X₃)، استفاده از فن پروکسی میت (X₄)* Top-dressed nitrogen amount (X₁), number of pesticide applications (X₂), use of proclim fit (X₃), use of fenpropathrin (X₄)

شکل ۲- رابطه بین عملکرد مشاهده شده و پیش بینی شده

Figure 2- Relationship between observed and predicted yield

اهمیت نیتروژن نشان می‌دهد که مدیریت دقیق این نهاده براساس نیاز گیاه و آزمون خاک، یک راهکار کلیدی و مؤثر برای افزایش بهره‌وری مزارع پنبه در منطقه است. در مطالعه‌ای که توسط الوم و سکار (Elum & Sekar, 2015) در ایالت تامیل نادو هند انجام شد، مشخص گردید که خلأ عملکرد در پنبه Bt (۱۶۵۸ کیلوگرم بر هکتار) به دلیل عدم استفاده بهینه از کودها، به ویژه کودهای نیتروژنی و پتاسیمی، به طور چشمگیری نسبت به پنبه معمولی (۵۹۴ کیلوگرم بر هکتار) بالاتر است. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مصرف بیشتر کود نیتروژن باعث افزایش عملکرد می‌شود، درحالی‌که استفاده بیش از حد

مقدار نیتروژن سرک: تأثیر متغیر مقدار نیتروژن سرک با ۳۶

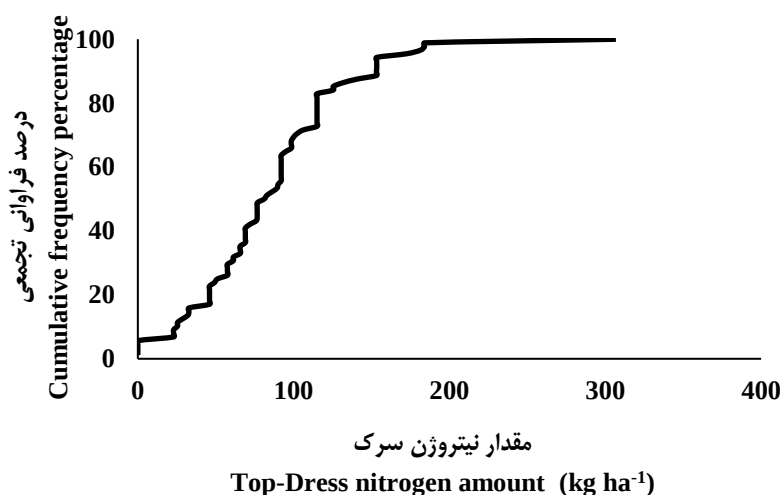
درصد معادل ۳۴۸ کیلوگرم در هکتار مثبت بوده که به معنی افزایش عملکرد با افزایش میزان نیتروژن سرک می‌باشد (شکل ۳). سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2023) در غرب استان گلستان، مصرف نیتروژن را مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد پنبه معرفی کردند که به تنهایی ۳۰ درصد از خلأ عملکرد را توجیه می‌کرد. همچنین در مطالعه عقیلی و همکاران (Aghili et al., 2024) در کردکوی نیز تغذیه به عنوان یکی از عوامل کلیدی شناسایی شد. این تأکید مکرر بر

آفات مهمی مانند سفیدبالک، کنه و کرم غوزه را تشخیص داد، اما دانش کافی در مورد زمان بندی صحیح سمپاشی، شناسایی دشمنان طبیعی و تفکیک گونه های مختلف آفات نداشتند که این امر به کاهش اثربخشی کنترل شیمیایی منجر می شود. مطالعه گوتیرز و همکاران (Gutierrez et al., 2015) نیز به بررسی پنبه دیم در هند پرداخت و بیان کرد که استفاده از بذر پنبه Bt و حشره کش ها در مزارع دیم، به دلیل عملکرد پایین و هزینه های بالا، می تواند به ورشکستگی کشاورزان منجر شود. این نتایج نشان می دهد که در مزارع دیم، مدیریت آفات باید با احتیاط و با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی و محیطی انجام شود تا به افزایش خلأ عملکرد دامن نزنند.

استفاده از سموم پروکلیم فیت و فن پروکسی میت (اورتوس): ورود دو متغیر استفاده از حشره کش پروکلیم فیت (با سهم ۶ درصد) و فن پروکسی میت (اورتوس) (با سهم سه درصد) با تأثیر منفی بر عملکرد، یک یافته پارادوکسیکال (به ظاهر متناقض) است. این ارتباط منفی به معنای ناکارآمدی این سموم نیست، بلکه نشان می دهد که استفاده از آن ها در مزارع، شاخصی برای مدیریت ضعیف و واکنش دیر هنگام به طغیان آفات بوده است. به عبارت دیگر، این سموم متغیرهای نماینده (Proxy Variable) برای شدت بالای خسارت آفات هستند. بررسی های میدانی نشان داد که پروکلیم فیت، به عنوان یک حشره کش قوی و وسیع الطیف، اغلب به عنوان آخرین راهکار و زمانی توسط کشاورزان استفاده شده که آفت کرم غوزه خسارت اقتصادی قابل توجهی را به محصول وارد کرده بود.

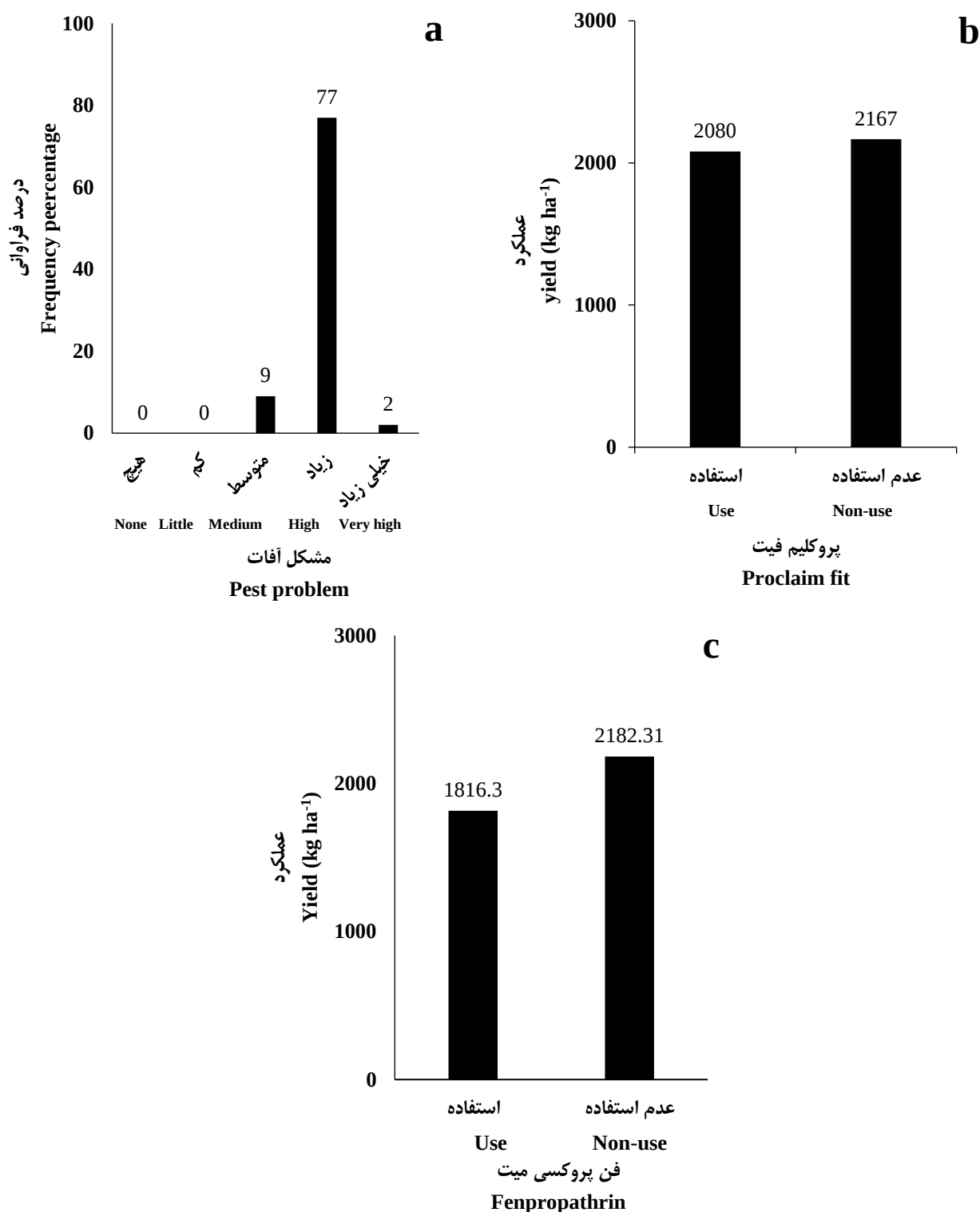
از کود پتاسیم تأثیر منفی بر عملکرد دارد. این امر بر اهمیت مدیریت صحیح تغذیه گیاهی تأکید می کند. همچنین در بررسی کنستابل و بنج (Constable & Bange, 2015)، نیازهای غذایی پنبه برای دستیابی به عملکرد بالقوه بالا، به ترتیب ۳۸۴ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و پتاسیم و ۸۳ کیلوگرم در هکتار فسفر تخمین زده شد که نشان دهنده چالش های مدیریتی در تأمین این نیازها است.

مدیریت آفات: نتایج نشان داد حاصل از این پژوهش نشان داد که که دفعات کاربرد آفت کش با ۵۵ درصد از خلأ معادل ۱۳۵۹ کیلوگرم در هکتار را بر عهده داشته و بیشترین سهم را در خلأ عملکرد دارد، بنابراین مدیریت آفات باید در دستور کار کشاورزان منطقه قرار گیرد. این ارتباط مثبت نشان می دهد که با افزایش تعداد سمپاشی ها، عملکرد نیز افزایش یافته است که خود گواهی بر فشار بالای آفات در منطقه، به ویژه طغیان کرم غوزه طی سال های مطالعه است، بنابراین مدیریت بهینه آفات باید در اولویت اصلی کشاورزان منطقه قرار گیرد. نتایج همچنین نشان داد که درصد فراوانی مشکل آفات در تولید پنبه در ۱۲، ۶۹ و ۷ درصد اراضی به ترتیب متوسط، زیاد و بسیار زیاد بود (شکل ۴). در مطالعه سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2023) نیز خسارت آفات در مزارع پنبه غرب استان گلستان در ۱۸ درصد از مزارع خیلی شدید، ۴۵ درصد شدید و ۲۴ درصد متوسط گزارش شد که نشان دهنده چالشی مشابه در منطقه هم جوار است. پژوهش خان و دامالز (Khan & Damalas, 2015) در منطقه پنجاب پاکستان نشان داد که یکی از دلایل اصلی خلأ عملکرد در کشت پنبه آبی، مدیریت ضعیف آفات است. کشاورزان در این منطقه،



شکل ۳- درصد فراوانی تجمعی مقدار نیتروژن سرک (کیلوگرم در هکتار) در تولید پنبه در دهستان میانکاله شهرستان بهشهر

Figure 3- Cumulative frequency percentage of top-dressing nitrogen amount (kg ha⁻¹) in cotton production in the Miyankaleh Rural District, Behshahr county



شکل ۴- درصد فراوانی مشکل آفات در تولید پنبه در دهستان میانکاله شهرستان بهشهر (A) و مقایسه میانگین عملکرد پنبه تحت استفاده و عدم استفاده از آفت کش (B) پروکلیم فیت و (C) فن پروکسی میت

Figure 4- Percentage of pest problems frequency in cotton production in Miyankaleh Rural District, Behshahr county (A), and comparison of mean cotton yield under use and non-use of pesticides B) Proclaim Fit and C) Fenpropathrin

مصرف کود نیتروژن سرک و مشکل آفات با هم مشترک و در سایر عوامل مدیریتی متفاوت بودند که از دلایل آن می‌توان به تفاوت شرایط اقلیمی سال آزمایش، منطقه مورد مطالعه، انتخاب مزارع و تفاوت مدیریت کشاورزان در مزرعه اشاره نمود.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این پژوهش، خلأ عملکرد پنبه در منطقه میانکاله ۲۵۱۸ کیلوگرم در هکتار و معادل ۵۴/۵ درصد محاسبه شد (متوسط عملکرد واقعی ۲۱۰۳ و عملکرد پتانسیل ۴۶۲۰ کیلوگرم در هکتار). نتایج تحلیل مقایسه کارکرد نشان داد که عوامل محدودکننده اصلی عملکرد در دو حوزه کلیدی قابل طبقه‌بندی هستند: نخست، مدیریت آفات که در مجموع با سهم ۶۴ درصدی (شامل دفعات آفت کش ۵۵ درصد، استفاده از پروکلیم‌فیت شش درصد و استفاده از فن‌پروکسی‌میت سه درصد) مهم‌ترین عامل بود و دوم، مدیریت تغذیه (میزان نیتروژن سرک با سهم ۳۶ درصد). با مدیریت بهینه عوامل یادشده می‌توان به عملکرد چشمگیری دست یافت. اهمیت این یافته‌ها در ارائه یک برنامه قابل اجرا برای کاهش خلأ عملکرد است. این مطالعه نشان می‌دهد که بخش مهمی از پتانسیل تولید پنبه در منطقه عمدتاً به دلیل ضعف در دو حوزه مدیریتی کاملاً مشخص (آفات و نیتروژن) از دست می‌رود. همچنین ترویج و کاربرد صحیح تنظیم‌کننده‌های رشد و هورمون‌های برگ‌ریز (نظیر میکوات کلراید و دف) که در حال حاضر در منطقه مرسوم نیست، می‌تواند به عنوان راهکاری نوین جهت کنترل رشد رویشی و تسهیل برداشت، گامی مؤثر در دستیابی به عملکرد پتانسیل باشد. این نتیجه‌گیری به‌طور قوی بیانگر آن است که تمرکز برنامه‌های ترویجی بر آموزش اصول مدیریت تلفیقی آفات (IPM) - شامل پایش مزرعه، تعیین آستانه اقتصادی و سم‌پاشی به‌موقع - و همچنین بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن براساس آزمون خاک، می‌تواند به سرعت منجر به افزایش معنی‌دار تولید و بهبود سودآوری پنبه‌کاران منطقه شود. شرایط تولید و پتانسیل عملکرد گیاهان زراعی در آینده با تغییر نظام‌های زراعی نظیر یکپارچه سازی اراضی، زهکشی اراضی شور و ماندابی، الگوی کشت، روند تغییر اقلیم جهانی و افزایش دما تغییر می‌کند؛ بنابراین پایش و ارزیابی مزارع به‌صورت گسترده‌تر و مداوم ضرورت دارد.

به‌طور مشابه، استفاده از سم اورتوس (کنه‌کش) نیز در مزارعی رایج بود که به دلیل سم‌پاشی‌های مکرر و غیراصولی علیه کرم غوزه، دشمنان طبیعی کنه‌ها از بین رفته و جمعیت کنه‌ها به‌صورت ثانویه طغیان کرده بود، بنابراین این متغیرها به‌خوبی نشان می‌دهند که راهبرد مدیریت آفات در منطقه بیشتر واکنشی و مبتنی بر سم‌پاشی دیر هنگام بوده تا پیشگیرانه و مبتنی بر اصول مدیریت تلفیقی آفات (IPM). مقایسه میانگین عملکرد پنبه تحت استفاده و عدم استفاده آفت کش پروکلیم‌فیت و فن‌پروکسی‌میت با این نتایج مطابقت دارد (شکل ۴). در سال‌های عادی در مزارع شمال کشور، کرم غوزه که از آفات مهم در مزارع پنبه است بین ۱۰ تا ۱۵ درصد خسارت وارد می‌کند که این خسارت در سال‌های طغیان می‌تواند به ۵۰ تا ۷۵ درصد برسد. با انجام ضدعفونی بذور پنبه با سم گائوچو می‌توان از بوته‌های پنبه در مقابل آفات مکنده تا ۴۰ الی ۴۵ روز بعد از کاشت محافظت نمود (Heravi, 2015). در مناطق مختلف، استانداردهای متفاوتی برای تعیین آستانه کنترل شیمیایی آفت وجود دارد. جمعیت آستانه یعنی تعدادی از آفت که قابل تحمل است. اگر جمعیت بیشتر از آن شود، انجام سم‌پاشی ضروری می‌باشد، در غیر این صورت، خسارت آفت از نظر اقتصادی بیش از هزینه مبارزه خواهد بود (Naderi Arefi and Jokar, 2018). با علف‌های هرز میزبان آفات مکنده و کنه‌ها که در حاشیه مزارع، کانال‌های آب و اراضی بایر رشد می‌کنند باید تا قبل از رسیدن فصل کشت مبارزه شود، در غیر این صورت این آفات تکثیر شده و در طی فصل رشد به محصول زراعی خسارت وارد می‌کند؛ بنابراین مهار علف‌های هرز نقش بسزایی در کاهش خسارت پنبه دارد (Heravi, 2015). برجستگی متغیرهای مرتبط با آفات در این پژوهش با نتایج سایر تحلیل‌های CPA در ایران همسو است. مطالعاتی مانند پژوهش عقلی و همکاران (Aghili et al., 2024) که در آن آفات با سهم ۴۹ درصدی، بزرگ‌ترین عامل خلأ عملکرد پنبه در کردکوی بودند و همچنین پژوهش سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2023) که خسارت آفات را به عنوان یک عامل معنی‌دار شناسایی کردند، همگی بر این نکته تأکید دارند که مدیریت آفات یکی از نکات مهم در تولید پنبه در شمال کشور است و نیازمند توجه ویژه در برنامه‌های تحقیقاتی و ترویجی می‌باشد. نتایج مطالعه حاضر با مطالعات مشابه (Soltani et al., 2023; Aghili et al., 2024) در برخی عوامل مدیریتی مثل

References

1. Aghili, A., Soltani, A., & Jafarnoudeh, S. (2024). Investigating the factors causing the cotton yield gap (Case study: Golestan province - Kordkuy county). *Iranian Journal of Cotton Researches*, 11, 1-22. (In Persian).
2. Agricultural Statistics. (2022). Ministry of Agricultural Jihad. (In Persian). <https://www.maj.ir>
3. Agricultural Statistics. (2023). Ministry of Agricultural Jihad. (In Persian)
4. Constable, G. A., & Bange, M. P. (2015). The yield potential of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Field Crops Research*, 182, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.017>
5. De Bie, C. A. J. M. (2000). Yield gap studies through comparative performance analysis of agro-ecosystems. *Int.*

- Inst. Aerospace Earth Science. (ITC), Enschede, The Netherlands.
6. Elum, Z. A., & Sekar, C. (2015). An empirical study of yield gap in seed cotton production in Tamil Nadu state, India. *Indian Journal of Agricultural Research*, 49, 6. <https://doi.org/10.18805/ijare.v49i6.6684>
7. FAOSTAT. (2024). <https://www.fao.org/>
8. Gutierrez, A. P., Ponti, L., Herren, H. R., Baumgärtner, J., & Kenmore, P. E. (2015). Deconstructing Indian cotton: weather, yields, and suicides. *Environmental Sciences Europe*, 27, 1. 12. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0043-8>
9. Hajjarpoor, A., Soltani, A., Zeinali, E., Kashiri, H., & Aynehband, A. (2017). Evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) yield gap in Golestan province of Iran using comparative performance analysis (CPA) method. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 19, 2. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.15625540.1396.19.2.1.9>
10. Heravi, P. (2015). Advances in Integrated Pest Management of Cotton. Iran Cotton Research Institute Publications. 60 p. (In Persian).
11. Ijaz, B., Zhao, N., Kong, J., & Hua, J. (2019). Fiber quality improvement in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.): quantitative trait loci mapping and marker assisted selection application. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1585. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01585>
12. Kamari, H. (2021). Evaluation of yield gap and cotton production in Iran under current and future climatic conditions. Ph.D. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Persian).
13. Khan, M., & Damalas, C. A. (2015). Farmers' knowledge about common pests and pesticide safety in conventional cotton production in Pakistan. *Crop Protection*, 77, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.07.014>
14. Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740>
15. Mousavi, M. (2015). Weed control: Principles and methods. Marz Danesh Publications. 600 p. Tehran, Iran. (In Persian).
16. Naderi Arefi, A., & Jokar, M. (2018). Cotton Bollworm and Its Integrated Control. Agricultural Education Press. Tehran, Iran. 48 p. (In Persian).
17. Najafi Terojeni, M., Nahibi, S., & Mousavi Fatemi, H. (2022). Presenting revitalization strategies for Safavid gardens of Behshahr with emphasis on green landscape design components. *Sustainability, Development and Environment*, 3, 1-24. (In Persian).
18. Rahimizadeh, M. (2020). The assessment of weed competition effect on growth and yield of cotton with use chemical and biological fertilizers. *Journal of Crops Improvment*, 2, 245-255. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2020.284772.2238>
19. Rezaei, A., & Soltani, A. (1998). An Introduction to Applied Regression Analysis. Isfahan University of Technology Press. Isfahan, Iran. 294 p. (In Persian).
20. Rezaei, M., Dadashi, M., Mokhtarpour, H., & Ajam Norouzi, H. (2021). Yield and yield components of cotton in transplanting and direct seeding systems in Gorgan climatic conditions. *Iranian Journal of Cotton Researches*, 9, 189-208. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijcr.2021.355695.1174>
21. Seyedjalali, A., Eskandari, M., Roshani, G., Navidi, M., Zareian, G., Meymand, A., & Ghasemzadeh Ganjehei, M. 2021. Determining soil and landscape requirements of cotton for using in land suitability evaluation. *Iranian Journal of Cotton Researches*, 9, 69-88. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijcr.2021.352985.1162>
22. Shekargozar Darabi, M. (2016). Analysis of yield gap and ecological sustainability of cotton in the north of Golestan province. Ph.D. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Persian).
23. Soltani, A. (2007). Application of SAS Software in Statistical Analysis (Second ed.). Mashhad Jihad Daneshgahi Press. Mashhad, Iran. 182 p. (In Persian).
24. Soltani, A., & Mirzaei, A. (2022). Analysis of Yield Potential and Yield Gap in Crop Production Systems. Vazhegan Sirang Publications. Gorgan, Iran. 45 p. (In Persian).
25. Soltani, A., Nehbandani, A., Zeinali, E., Torabi, B., Zand, E., Ghasemi, S., Alasti, A., Dadresi, A., Hosseini, R., Alimagham, M., Zahed, M., Fayyazi, H., Kamari, H., Arab-Ameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Pourshirazi, S., Mohammadi, S., & Keramat, S. (2018). Atlas of Yield Gap and Production Potential of Important Crops in the Country under Current and Future Climatic Conditions. Vazhegan Sirang Publications. Gorgan, Iran. 278 p. (In Persian).
26. Soltani, A., Torabi, B., Galeshi, S., & Zeinali, E. (2010). Analysis of wheat yield limiting factors in Gorgan conditions using CPA method. Research Project Report, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Persian).
27. Soltani, S., Nakhzari Moghaddam, A., Bannayan-Aval, M., Keshiri, H., Rahemi Karizaki, A., & Naeimi, M. (2023). Evaluation of management factors affecting cotton yield gap in the semi-arid moderate climate conditions

- using comparative performance analysis (CPA). *Iranian Journal of Cotton Researches*, 11, 35-52. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijcr.2024.363702.1203>
28. Torabi, B., Soltani, A., Galeshi, S., & Zeinali, E. (2011). Analyzing wheat yield constraints in Gorgan. *Electronic Journal of Crop Production*, 4, 1-17. (In Persian).
29. Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittone, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
30. Yousefian, M., Soltani, A., Dastan, S., & Ajamnoroozie, H. (2021). Yield gap assessment in rice-grown fields using CPA and BLA approaches in Northern Iran. *International Journal of Plant Production*, 15, 2. 203-217. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00128-y>



The Response of Some Growth Indices, Yield and Forage Quality of Two Varieties of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to Different Levels of Plant Density in the Bavi region, Khuzestan Province

H. Sharifat¹, M. R. Moradi-Telavat¹, A. Koochekzadeh^{1*}, A. Moshattati¹, H. Aboodeh¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(*- Corresponding author's Email: koochekzadeh@asnrukh.ac.ir)

Received: 04 November 2025
Revised: 04 November 2025
Accepted: 17 February 2026
Available Online: 12 May 2026

How to cite this article:

Sharifat, H., Moradi-Telavat, M. R., Koochekzadeh, A., Moshattati, A. & Aboodeh, H. (2026). The response of some growth indices, yield and forage quality of two varieties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to different levels of plant density in the Bavi region, Khuzestan province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 363-374. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.96318.1432>

Introduction

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) is an annual plant of the legume family, native to Latin America. In addition to its high nutritional value, this plant has a remarkable ability to tolerate a variety of abiotic stresses, including drought, salinity, and cold, as well as to grow on marginal lands. Due to its relative tolerance to drought and salinity stresses, extensive genetic diversity, and ability to adapt to different climatic conditions and high water use efficiency, it is considered a suitable plant for the exploitation of limited water resources and saline soils. In terms of nutritional value, quinoa seeds, the main product of this plant, contain between 14 and 20% protein and are rich sources of essential amino acids such as lysine and methionine, substances that are found in low amounts in most cereals.

Materials and Methods

In order to investigate the effect of different plant densities and cultivars of quinoa on growth, physiology and forage yield, a field experiment was conducted as a factorial experiment in a randomized complete block design with four replications in the fall and winter of the 2023-2024 crop year at the research farm of Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. Experimental factors included plant density at three levels (30, 50 and 70 plants m⁻²) and quinoa cultivars (Rahmat and Sadooq). The evaluated traits were chlorophyll a, b, carotenoid, spad number, leaf area index, forage protein percentage, forage protein yield and forage yield.

Results and Discussion

In this study, neither planting density nor cultivar had a significant effect on chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid content, or SPAD values. However, analysis of variance showed that planting density significantly affected leaf area index, forage protein concentration, and forage protein yield, whereas cultivar significantly affected forage protein yield and dry forage yield. In addition, the interaction between planting density and cultivar had a significant effect on forage protein concentration and forage protein yield. The results showed that the highest and lowest of leaf area index with an average of (3.87) and (3.11) were observed in the density treatment of 70 and 30 plants per square meter, respectively. Also, the highest percentage of forage protein (6.35



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

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.96318.1432>

and 6.03 percent, respectively) was observed in the density of 30 plants per square meter and the lowest were (4.10 and 4.88 percent, respectively) in the density of 70 plants per square meter in two varieties of Sadooq and Rahmat. The highest forage protein yield (1163 kg ha^{-1}) was observed at densities of 30 plants per square meter, in Sadooq cultivar and the lowest (540 kg ha^{-1}) was obtained at densities of 70 plants per square meter, in Rahmat cultivar. Also, the highest dry forage yield with an average of 18259 kg ha^{-1} was observed in the Sadooq cultivar and the lowest dry forage yield with an average of 10633 kg ha^{-1} was observed in the Rahmat cultivar. Therefore, the significant difference between the two studied cultivars were present.

Conclusion

Increasing plant density to the optimum level, without creating intense intraspecific competition, by making optimal use of environmental resources such as light, water, and nutrients, improved leaf area index and increased forage yield in quinoa. The results showed that choosing the right cultivar plays an important role in forage yield, especially through its effect on maturity time and weed resistance. Significant differences in forage yield were observed among the evaluated cultivars, with Sadooq producing the highest forage yield. These findings indicate that selecting an appropriate cultivar in combination with an optimal planting density can be an effective strategy for improving quinoa forage production.

Keywords: Ash, Carotenoid, Chlorophyll, Crude protein, Fiber

واکنش برخی شاخص‌های رشدی، عملکرد و کیفیت علوفه دو رقم کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) به سطوح مختلف تراکم بوته در منطقه باوی، استان خوزستان

حسن شریفیات^۱، محمدرضا مرادی تلاوت^۱، احمد کوچک زاده^{۱*}، علی مشتقی^۱، هنا عبوده^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

چکیده

با هدف بررسی اثرات تراکم‌های مختلف بوته و ارقام کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) بر رشد و عملکرد علوفه، آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار طی سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا شد. عوامل آزمایشی شامل تراکم بوته در سه سطح (۳۰، ۵۰ و ۷۰ بوته در مترمربع) و دو رقم کینوا (شامل رحمت و صدوق) بود. براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تراکم بوته بر شاخص سطح برگ، درصد پروتئین علوفه و عملکرد پروتئین علوفه و اثر رقم بر عملکرد پروتئین علوفه و عملکرد علوفه معنی‌دار بود. همچنین برهم‌کنش تراکم بوته و رقم بر درصد پروتئین و عملکرد پروتئین علوفه معنی‌دار شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین شاخص سطح برگ (به‌ترتیب با میانگین ۳/۸۷ و ۳/۱۱) در تراکم ۷۰ و ۳۰ بوته در مترمربع حاصل شد. همچنین بیشترین درصد پروتئین علوفه در تراکم ۳۰ بوته در مترمربع به‌ترتیب در رقم صدوق (۶/۳۵ درصد) و رقم رحمت (۶/۰۳ درصد) و بیشترین عملکرد پروتئین علوفه (با ۱۱۶۳ کیلوگرم در هکتار) نیز در ۳۰ بوته در مترمربع و رقم صدوق به‌دست آمد. ضمن اینکه بیشترین عملکرد علوفه خشک (با میانگین ۱۸۲۵۹ کیلوگرم در هکتار) در رقم صدوق و کمترین آن (با میانگین ۱۰۶۳۳ کیلوگرم در هکتار) در رقم رحمت مشاهده شد که نسبت به هم اختلاف معنی‌داری داشتند. در مجموع، کاربرد بهینه تراکم بوته موجب افزایش شاخص سطح برگ، درصد و عملکرد پروتئین علوفه گردید. علاوه بر این رقم صدوق عملکرد بهتری را جهت افزایش کمیت و کیفیت علوفه کینوا در شرایط منطقه مورد نظر تولید کرد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین خام، خاکستر، فیبر، کاروتنوئید، کلروفیل

مقدمه

خاک‌های شور محسوب می‌شود (García et al., 2015). از نظر ارزش تغذیه‌ای، دانه‌های کینوا که محصول اصلی این گیاه هستند، دارای ۱۴ تا ۲۰ درصد پروتئین بوده و منبع غنی اسیدهای آمینه ضروری مانند لایسین و متیونین هستند، موادی که در اکثر غلات به‌میزان کم یافت می‌شوند (Iqbal et al., 2019). بنابراین سطح زیرکشت کینوا به‌عنوان یک گیاه مناسب در راستای دستیابی به سیاست‌های جهانی کشاورزی پایدار مورد توجه قرار گرفته است، به‌نحوی که سطح زیرکشت جهانی این گیاه از ۳۶ هزار هکتار در سال ۱۹۸۰ به ۱۶۶ هزار هکتار در سال ۲۰۲۳ رسیده است. در سال ۲۰۲۳، تولید جهانی کینوا حدود ۱۱۲ هزار تن برآورد شده است که نشان می‌دهد میانگین جهانی عملکرد در واحد سطح مزرعه کمتر از یک تن در هکتار (حدود ۶۷۷ کیلوگرم در هکتار) بوده است. کشورهای بولیوی، پرو و اکوادور در قاره آمریکای جنوبی به‌ترتیب مهم‌ترین کشورهای تولیدکننده این محصول به‌شمار می‌روند. در این کشورها،

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) گیاهی یک‌ساله از تیره تاج‌خروس و با خاستگاه آمریکای لاتین است. این گیاه علاوه بر داشتن ارزش غذایی بالا، توانایی قابل توجهی در تحمل انواع تنش‌های غیرزنده از جمله تنش خشکی، شوری و سرما و همچنین رشد در زمین‌های کم‌بازده را دارد (Präger et al., 2018). این گیاه به‌دلیل تحمل نسبی به تنش‌های خشکی و شوری، تنوع ژنتیکی گسترده، قابلیت تطابق با شرایط اقلیمی مختلف و بهره‌وری بالا در مصرف آب، گیاهی مناسب برای بهره‌برداری از منابع آبی محدود و

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
(*) نویسنده مسئول: koochehzadeh@asnrukh.ac.ir (Email: koochehzadeh@asnrukh.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96318.1432>

برای تولید علوفه، ارتفاع بوته بین ۱۵۰ تا ۱۶۴ سانتی متر نیز می‌رسد. همچنین عملکرد ماده خشک بین ۵۵۰۰ تا ۶۸۰۰ کیلوگرم در هکتار و عملکرد علوفه تر بین ۴۵۲۵۰ تا ۶۳۳۸۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (Papastylianou et al., 2014). در بررسی برهم کنش رقم و تراکم بوته، رقم کیو ۱۲^۲ در تراکم ۱۶/۶ بوته و ۳۳/۳ بوته در مترمربع به ترتیب با تولید ۷/۸ و ۷/۵ تن در هکتار بیشترین عملکرد و رقم گیزا یک^۳ کمترین عملکرد علوفه خشک را در مقایسه با سایر ارقام داشتند (Najafinezhad et al., 2021).

این پژوهش با هدف بررسی اثر تراکم‌های مختلف بوته و ارزیابی دو رقم کینوا از نظر برخی شاخص‌های رشدی و عملکرد و کیفیت علوفه، در شرایط آب‌وهوایی اهواز انجام شد.

مواد و روش‌ها

با هدف بررسی واکنش رشد، فیزیولوژی و عملکرد و کیفیت علوفه دو رقم کینوا به سطوح مختلف تراکم بوته در منطقه باوی، استان خوزستان، یک آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار طی پاییز و زمستان سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان با مختصات جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۴ دقیقه و ۴۸ درجه و ۵۲ دقیقه با ارتفاع حدود ۲۰ متر از سطح دریا، در ۳۶ کیلومتری شمال شرقی اهواز اجرا شد. براساس آمار هواشناسی بلندمدت، متوسط بارندگی سالیانه ۲۶۹ میلی‌متر و دمای حداکثر، متوسط و حداقل به ترتیب ۳۶، ۲۳ و ۵/۹ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۱). این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. عوامل آزمایشی شامل تراکم بوته در سه سطح (۳۰، ۵۰، ۷۰ بوته در مترمربع) (Nabipour et al., 2023) و دو رقم کینوا (رحمت و صدوق) بود. هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف کاشت به‌طول سه متر و ۵۰ سانتی‌متر عرض بین ردیف‌ها و ۵۰ سانتی‌متر فواصل بین کرت‌های مجاور بود. کلیه نمونه‌برداری‌ها با رعایت اثر حاشیه از وسط کرت‌ها صورت گرفت. کود شیمیایی نیتروژن از منبع اوره و کود فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل هر کدام به‌میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار طبق آزمون خاک و قبل از کاشت به‌وسیله دیسک با خاک مخلوط شد (جدول ۲). کود نیتروژن به‌میزان یک‌سوم به‌صورت پایه، یک‌سوم در مرحله چهارتا شش برگی و یک‌سوم در مرحله گرده‌افشانی به خاک داده شد. روش کشت به‌صورت جوی و پشته و تراکم بوته براساس تیمارهای آزمایشی (۳۰، ۵۰، ۷۰ بوته در مترمربع) (Nabipour et al., 2023) و فاصله بین بوته‌ها به‌ترتیب ۱۰، شش و چهار سانتی‌متر بود. کشت بر روی داغ آب در هر

بسته به کشت آبی و دیم، میانگین عملکرد کینوا از ۳۲۰ تا ۱۶۰۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بوده است (FAO, 2023). این تنوع در عملکرد در واحد سطح می‌تواند به‌دلیل محدودیت‌های مختلف محیطی، زراعی و ژنتیکی باشد. با توجه به محتوای بالای پروتئین و عناصر معدنی مهم نظیر پتاسیم، سدیم، کلسیم، آهن، کاروتنوئیدها و همچنین اسید آسکوربیک، برگ‌های کینوا به‌عنوان یک منبع علوفه‌ای با ارزش برای تغذیه دام‌ها مورد بررسی و توجه قرار گرفته‌اند (Bhargava et al., 2007). یکی از عوامل تأثیرگذار در تعیین عملکرد گیاهان زراعی، تراکم بوته در واحد سطح است. تراکم بیش از حد بهینه موجب افزایش رقابت درون‌گونه‌ای و در نتیجه کاهش عملکرد می‌گردد. این موضوع در حالی است که در تراکم بوته کمتر از حد بهینه، استفاده از سایر منابع محیطی مانند نور، فضا، آب و خاک به‌طور مطلوب انجام نشده و در نهایت، عملکرد کاهش می‌یابد. مطالعات نشان دادند که تراکم بوته اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه کینوا دارد و بالاترین عملکرد دانه از حداکثر تراکم بوته (۱۶۷ هزار بوته در هکتار) به دست آمد که حدود ۳۴/۷ درصد بیشتر از عملکرد دانه کینوا در تراکم ۵۶ هزار بوته در هکتار بود. همچنین مشاهده شد که افزایش تراکم بوته با کاهش وزن هزاردانه و درصد پروتئین دانه کینوا همراه است (Eisa et al., 2018).

تعیین تراکم بوته بهینه کشت، یکی از عوامل کلیدی در دستیابی به عملکرد نهایی هر رقم به شمار می‌رود. این شاخص تحت تأثیر عواملی نظیر ویژگی‌های ژنتیکی گیاه، خصوصیات رقم، وضعیت حاصلخیزی خاک و شرایط اقلیمی منطقه قرار دارد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در ایالات متحده آمریکا، تراکم بوته پیشنهادشده برای ارقام تجاری کینوا حدود ۱۵۰ هزار بوته در هکتار گزارش شده است (Jacobsen, 2011). این تراکم بوته در کشور شیلی ۲۴۰ هزار بوته در هکتار و در آرژانتین ۳۳۰ هزار بوته در هکتار توصیه شده است (Bertero & Ruiz, 2008). براساس مطالعه‌ای، همواره افزایش تراکم بوته کاشت از ۷۰ هزار تا ۴۶۰ هزار بوته در هکتار منجر به کاهش عملکرد دانه از ۵۳۸۹ کیلوگرم در هکتار به ۳۰۴۹ کیلوگرم در هکتار شد (Erassú et al., 2016). در یک مطالعه انجام‌شده در برزیل، با افزایش تراکم بوته کاشت کینوا از ۱۰۰ هزار تا ۳۰۰ هزار بوته در هکتار، ارتفاع بوته و تعداد روز تا رسیدگی کاهش یافت. با این حال، صفات عملکردی دانه، زیست‌توده کل^۱ و شاخص برداشت تحت تأثیر تراکم کاشت قرار نگرفتند. این مقاومت نسبی به تغییرات تراکم بوته، به ظرفیت بالای کینوا در تولید شاخه‌های فرعی نسبت داده شده است (Spehar & Rocha, 2009).

رابطه بین تراکم بوته و رقم، تأثیر قابل توجهی بر رشد، عملکرد و کیفیت تغذیه‌ای علوفه در محصولات مختلف دارد. در ارقام مناسب

دو طرف پشته در عمق ۱/۵ تا ۲ سانتی‌متری خاک انجام شد، سپس اقدام به پوشاندن بذرها با ماسه و کود پوسیده گردید و در نهایت با انجام اولین آبیاری، تاریخ کاشت آزمایش در ۳۰ مهر ثبت شد. تمامی عملیات داشت برای تمام کرت‌ها به‌طور یکنواخت انجام شد. این عملیات شامل آبیاری، تنک کردن و وجین علف‌های هرز می‌باشد.

جدول ۱- آمار هواشناسی ایستگاه هواشناسی کشت و صنعت نیشکر دهخدا اهواز در سال ۱۴۰۳-۱۴۰۲

Table 1- Meteorological statistics of the Dehkhoda Sugarcane Agricultural and Industrial Meteorological Station of Ahvaz in 2024-2025

ماه‌های سال	حداقل دمای هوا	حداکثر دمای هوا	بارندگی	تبخیر
Months of the year	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Rainfall (mm)	Evaporation (mm)
آبان	15.16	29.28	85.99	2.11
November				
آذر	8.86	21.73	13.06	1.27
December				
دی	7.51	20.96	7.25	1.28
January				
بهمن	8.15	21.46	30.24	2.11
February				
اسفند	9.31	23.12	63.34	3.11
March				
فروردین	14.71	29.8	85.67	6.26
April				
اردیبهشت	18.96	34.72	35.47	8.17
May				
خرداد	23.16	44.18	0	10.70
June				

جدول ۲- خصوصیات خاک مزرعه محل اجرای آزمایش

Table 2- Soil characteristics of the farm where the experiment was conducted

عمق	هدایت الکتریکی	نیترژن	فسفر	پتاسیم	pH	بافت
Depth (cm)	EC (dS m ⁻¹)	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)		Texture
0-30	2.81	0.05	9.36	138	7.5	رسی سیلتی
						Silty clay

اسپد^۳ قرائت شد. سپس عدد کلروفیل در آن کرت به‌وسیله میانگین نه عددی که قرائت گردید، محاسبه شد.

جهت اندازه‌گیری کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها، در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی، نیم گرم برگ تر گیاه کینوا در هاون با استون ۸۰ درصد ساییده شد. در مرحله بعد، به‌مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ^۴ با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت. عصاره حاصل به بالن شیشه‌ای انتقال یافت. مقداری از نمونه داخل بالن را برداشته و مقدار جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر^۵ به‌ترتیب در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر^۶ به‌منظور اندازه‌گیری کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها قرائت شد. در نهایت با استفاده از معادله‌های ۱، ۲ و ۳ میزان کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها به‌دست آمد (Arnon, 1967).

با هدف تعیین عملکرد علوفه، برداشت نهایی از دو خط وسط کرت انجام شد. این عمل در سطحی معادل یک مترمربع و پس از حذف اثر حاشیه ۰/۵ متر از بالا و پایین انجام گردید. پس از برداشت، علوفه تر به محل اندازه‌گیری منتقل و بلافاصله وزن شد. سپس به‌طور تصادفی از بین تمام بوته‌های برداشت‌شده پنج بوته جهت بررسی رطوبت و محاسبه عملکرد بیولوژیک^۱ انتخاب گردید.

شاخص سطح برگ توسط دستگاه پارسنج^۲ (PAR/LAL Ceptometer) مدل DECAGON DEVICES, INC کشور آمریکا اندازه‌گیری شد. به‌منظور اندازه‌گیری عدد کلروفیل در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی از دستگاه کلروفیل‌متر دستی استفاده گردید. بدین منظور، از هر کرت به‌طور تصادفی سه بوته کینوا و از هر بوته، آخرین برگ توسعه‌یافته انتخاب و از سه نقطه به‌طور جداگانه عدد

3- Spade number

4- Centrifuge

5- Spectrophotometer

6- Nanometer

1- Biological yield

2- Parsing

$$(۱) \text{ a} = \text{کلروفیل}$$

$$[(\text{جذب در } 645 \text{ nm}) - 2/69 (\text{جذب در } 663 \text{ nm})] \times 100 / (1000 \times W)$$

$$(۲) \text{ b} = \text{کلروفیل}$$

$$[(\text{جذب در } 663 \text{ nm}) - 4/69 (\text{جذب در } 645 \text{ nm})] \times 100 / (1000 \times W)$$

که در آن، W : حجم نمونه استخراج شده و W : وزن تر نمونه است (Ashraf et al., 1994).

$$(۳) = \text{کاروتنوئیدها}$$

$$100 \times \frac{104 (b) - 3.27 (a) \text{ (میلی گرم کلروفیل)}}{227}$$

به منظور اندازه گیری و تعیین صفات علوفه ای، برداشت علوفه در مرحله آغاز خمیری و پایان مرحله شیری دانه برای هر رقم از دو خط میانی هر کرت در سطحی معادل یک مترمربع پس از حذف اثر حاشیه صورت گرفت. بلافاصله پس از برداشت، وزن علوفه تر اندازه گیری شد. جهت ارزیابی کیفیت علوفه، از هر کرت پنج بوته به صورت تصادفی نمونه برداری گردید. نمونه های جمع آوری شده پس از خشک کردن و آسیاب شدن، به منظور انجام تجزیه های مرتبط با کیفیت علوفه، به آزمایشگاه ارسال شدند. جهت تعیین وزن خشک علوفه، از علوفه تر بلافاصله پس از برداشت، یک نمونه تهیه و پس از توزین، با قرار دادن نمونه ها در آون در دمای ۶۸ درجه سانتی گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک و مجدداً توزین شدند. درصد رطوبت علوفه نیز با استفاده از رابطه ۴ محاسبه گردید. که در آن، FW^1 : وزن تر نمونه و DW^2 : وزن خشک نمونه است (Phillips et al., 2019).

$$(۴) = \text{درصد رطوبت علوفه} = [(FW - DW / FW) \times 100]$$

اندازه گیری ارتفاع بوته و تعداد انشعاب بارور در مرحله آغاز خمیری شدن دانه، با انتخاب تصادفی پنج بوته از هر کرت انجام گرفت. همچنین نسبت برگ به زیست توده کل از طریق پنج بوته تصادفی خشک شده در آون برای هر کرت مورد ارزیابی قرار گرفت. از روش ون سوئست و همکاران (Van Soest et al., 1991) جهت تجزیه ترکیبات دیواره سلولی شامل درصد فیبر نامحلول در شوینده خنثی و درصد فیبر نامحلول در شوینده اسیدی استفاده شد. این روش مستلزم آماده سازی محلول های شوینده خنثی و اسیدی است. پس از تهیه محلول ها، اندازه گیری صفات مذکور با استفاده از دستگاه فایبر تک^۳ مدل TM در آزمایشگاه تجزیه کیفیت علوفه، واقع در بخش تحقیقات دانشکده علوم دامی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام شد. نیتروژن کل نمونه های علوفه خشک نیز به روش

کجلدال^۴ و با بهره گیری از دستگاه کجل تک^۵ اندازه گیری گردید. به منظور محاسبه پروتئین خام، مقدار نیتروژن کل در ضریب ۶/۲۵ ضرب شد (Phillips et al., 2019). در نهایت، عملکرد پروتئین علوفه بر اساس رابطه ۵ محاسبه گردید.

$$(۵) = \text{عملکرد پروتئین علوفه (کیلوگرم در هکتار)}$$

$$\text{محتوای پروتئین کل بوته (درصد)} \times \text{عملکرد علوفه (کیلوگرم در هکتار)}$$

100

تجزیه آماری شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ها با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. مقایسه میانگین ها نیز توسط آزمون دانکن^۶ در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. لازم بذکر است اندازه گیری صفات شاخص سطح برگ، کلروفیل و کاروتنوئیدها و آنالیز آماری آن ها در چهار تکرار انجام شد. در حالی که صفات کمی و کیفی علوفه با استفاده از نمونه برداری از سه تکرار اندازه گیری و مورد آنالیز آماری قرار گرفت.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ: این پژوهش بیانگر این است که شاخص

سطح برگ تحت تأثیر معنی دار تراکم بوته در واحد سطح زمین قرار گرفت (جدول ۳).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین، بیشترین شاخص سطح برگ (با میانگین ۳/۸۷) در تیمار تراکم ۷۰ بوته در مترمربع مشاهده شد. کمترین شاخص سطح برگ (با میانگین ۳/۱۱) نیز در تیمار تراکم ۳۰ بوته در مترمربع به دست آمد (جدول ۴). شاخص سطح برگ، معیاری است که نسبت کل سطح برگ های موجود در واحد سطح زمین زیر کشت بوته ها را نشان می دهد و معمولاً به صورت مترمربع برگ در مترمربع زمین گزارش می شود (Zafari Ghalehrodkhani et al., 2017). فرآیند نمو سطح برگ بیانگر تحولات جمعیت برگ ها در طول دوره رشد بوده و شامل مراحل مختلف از جمله تشکیل برگ های جدید، گسترش برگ های جوان و زوال تدریجی برگ های مسن است (Soltani, 2009). در مطالعه حاضر، افزایش تراکم بوته در واحد سطح زمین، با افزایش معنی دار شاخص سطح برگ همراه بود. این موضوع نشان می دهد که علی رغم افزایش رقابت بین بوته ای در تراکم های بوته بالاتر، افزایش شاخص سطح برگ در واحد سطح مزرعه مشاهده شده است. بر این اساس، شاخص سطح برگ یکی از ابزارهای اساسی رقابت بین بوته ها در یک سایه انداز گیاهی است و بنابراین طبیعی است که گیاهان سعی در جلوگیری از کاهش شاخص سطح برگ در شرایط مختلف داشته باشند. می توان گفت که افزایش

4- Kjeldahl
5- Kjelltech
6- Duncan

1- Fresh weight
2- Dry weight
3- Fibertech

تعداد بوته در واحد سطح در آزمایش حاضر، عامل اصلی افزایش شاخص سطح برگ در هر واحد سطح زمین بوده است و این موضوع کاهش نسبی احتمالی شاخص سطح برگ در هر بوته را به‌نوعی جبران نموده است (Karami et al., 2020).

جدول ۳- تجزیه واریانس برخی صفات فیزیولوژیک کینوا (شاخص سطح برگ، عدد کلروفیل، کلروفیل a و b و کاروتنوئیدها)

Table 3- Analysis of variance of some physiological traits of quinoa (leaf area index, spade, chlorophyll a and b, carotenoids)

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares				
		شاخص سطح برگ LAI	عدد کلروفیل Spad	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنوئیدها Carotenoids
تکرار Replication	3	0.07 ^{ns}	17.12 ^{ns}	0.00011 ^{ns}	0.00056 ^{ns}	0.00050 ^{ns}
تراکم بوته (D) Plant density	2	1.14 ^{**}	4.77 ^{ns}	0.00009 ^{ns}	0.00011 ^{ns}	0.00014 ^{ns}
رقم (C) Cultivar	1	0.007 ^{ns}	16.25 ^{ns}	0.00034 ^{ns}	0.00006 ^{ns}	0.000009 ^{ns}
D × C	2	0.001 ^{ns}	1.69 ^{ns}	0.000002 ^{ns}	0.00020 ^{ns}	0.00016 ^{ns}
خطا Error	15	0.16	32.19	0.00008	0.00023	0.00043
ضریب تغییرات CV (%)		11.6	11.2	3.5	2.7	2.4

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and **: are non-significant, significant at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively

LAI= leaf area index

یکی از عوامل مهم حفظ ظرفیت فتوسنتزی، میزان کلروفیل موجود در گیاهان است. به‌طور کلی هرچه شرایط تغذیه‌ای و محیطی از جمله عناصر غذایی، دما، نور، رطوبت، آفات و بیماری‌ها برای رشد گیاه مناسب‌تر باشد، توان گیاه در تولید کلروفیل در برگ‌ها و تولید انرژی بیشتر می‌شود. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر تمامی تیمارها از جمله اثرات اصلی و اثر دوگانه نیز بر عدد کلروفیل، محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها معنی‌دار نبود (جدول ۳). کلروپلاست‌ها^۳ به‌عنوان اندامک‌های اصلی انجام فرآیند فتوسنتز در گیاهان شناخته می‌شوند و کارایی این فرآیند به‌طور مستقیم با ساختار و سلامت کلروپلاست‌ها مرتبط است. کاهش در تعداد کلروپلاست‌ها و ساختارهای درونی آن‌ها از جمله گرانا^۴ سبب افت میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی^۵ می‌گردد. این پدیده می‌تواند ناشی از رقابت در جذب نور که یکی از عوامل کلیدی در سنتز کلروفیل محسوب می‌شود و یا رقابت در جذب عناصر غذایی از جمله منیزیم باشد. این عنصر نقش مرکزی در ساختمان مولکول کلروفیل ایفا می‌کند. در نتیجه، این رقابت موجب اختلال در سنتز کلروفیل و کاهش تولید آن شده و در پی آن، میزان فتوسنتز، تولید مواد آلی و در نهایت رشد و نمو گیاه کاهش می‌یابد (Antonietta et al., 2014). معنی‌دار نشدن اثر

در پژوهشی روی اثر تراکم بوته بر کینوا، نتایج نشان داد که بیشترین شاخص سطح برگ با میانگین ۴/۴۵ در تیمار با فاصله بین ردیف ۳۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف پنج سانتی‌متر به دست آمد. این تیمار از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارهای مورد بررسی شامل فاصله بین ردیف‌های ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر داشت. همچنین کمترین شاخص سطح برگ نیز با میانگین ۲/۹۱ به تیمار با فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر و روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر تعلق گرفت که اختلاف معنی‌داری با تیمار فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر و روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر با میانگین ۳/۰۲ نشان نداد (Vahedi et al., 2022). نتایج مطالعه‌ای روی کلزا (*Brassica napus* L.) نشان داد که اثر تراکم بوته تنها برای شاخص‌های رشدی ماده خشک کل و شاخص سطح برگ اختلاف معنی‌داری داشت. بیشترین مقدار ماده خشک کل (۹۱۰ گرم در مترمربع) و شاخص سطح برگ (۳/۵۳) در رقم هایولا^۱ ۴۰۱ و در تراکم ۸۸ بوته در مترمربع مشاهده شد. کمترین مقدار ماده خشک کل (۳۹۳ گرم در مترمربع) و شاخص سطح برگ (۲/۲۶) نیز در رقم تراپر^۲ و در تراکم ۴۲ بوته در مترمربع به دست آمد (Alizadeh et al., 2021).

عدد کلروفیل، محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها:

³- Chloroplasts

⁴- Grana

⁵- Photosynthetic pigments

1- Hayola

2- Trapper

شاخص سطح برگ اهمیت به مراتب پایین تری دارد و تنها در صورتی که شرایط رشد گیاه با تنش های محیطی و یا کمبود شدید منابع غذایی به خصوص نیتروژن مواجه باشد، همبستگی بالایی با وضعیت رشد گیاه خواهد داشت (Forghani et al., 2010).

تراکم بوته در واحد سطح و رقم بر محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها در آزمایش حاضر می تواند نشان دهنده وضعیت مطلوب تک بوته از نظر فضای تغذیه ای و تأثیر اندک رقابت بر سر منابع غذایی جهت تشکیل کلروفیل برگ ها باشد. همچنان که در منابع مختلف، اثر میزان کلروفیل برگ بر ویژگی های رشد و عملکرد در مقایسه با صفت

جدول ۴- مقایسه میانگین شاخص سطح برگ براساس اثر اصلی (تیمار تراکم بوته در مترمربع)

Table 4- Mean comparison of leaf area index based on main effect (plant density treatment per square meter)

تراکم Density (plant m ⁻²)	شاخص سطح برگ LAI
30	3.11b*
50	3.42b
70	3.87a

۳۰، ۵۰ و ۷۰: به ترتیب نشان دهنده تراکم بوته در مترمربع می باشند.

* میانگین های با حروف مشترک در هر ستون، اختلاف آماری معنی داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با هم ندارند.

30, 50 and 70: indicate the plant density per square meter, respectively.

LAI= leaf area index

* Means with similar letters in each column are not significantly different based on Duncan test at the 5% probability level

(Najafinezhad et al., 2021).

درصد پروتئین علوفه و عملکرد پروتئین علوفه: اثر

تراکم بوته و برهم کنش تراکم و رقم بر درصد پروتئین علوفه معنی دار بود (جدول ۵). نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین درصد پروتئین علوفه (به ترتیب ۶/۳۵ و ۶/۰۳ درصد) در تراکم های ۳۰ بوته در مترمربع و دو رقم صدوق و رحمت به دست آمد. اما کمترین درصد پروتئین علوفه (به ترتیب ۴/۱۰ و ۴/۸۸ درصد) در تراکم های ۷۰ بوته در مترمربع حاصل گردید (جدول ۶). تغییرات درصد پروتئین علوفه و عملکرد پروتئین علوفه همراه با کاهش تراکم بوته، روند صعودی داشت. تراکم های بوته مختلف نه تنها بر عملکرد بلکه بر کیفیت تغذیه نیز تأثیر می گذارد. احتمالاً این موضوع به دلیل استفاده بهینه از منابع محیطی مانند آب، نور، دما، رطوبت و مواد غذایی باشد. زیرا تراکم های بوته بالاتر اغلب منجر به رقابت برای منابع محیطی می شود که می تواند بر محتوای پروتئین دانه های کینوا تأثیر منفی بگذارد. افزایش درصد پروتئین علوفه و عملکرد پروتئین علوفه با کاهش تراکم بوته در پژوهش های متعددی گزارش شده است (Van Minh et al., 2020; Najafinezhad et al., 2022).

اثر تراکم بوته، رقم و همچنین برهم کنش تراکم بوته و رقم بر عملکرد پروتئین علوفه معنی دار بود (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بین دو رقم مورد بررسی اختلاف معنی داری وجود دارد. به طوری که بیشترین عملکرد پروتئین علوفه (به ترتیب ۱۱۶۳ و ۱۰۴۹ درصد) در تراکم ۳۰ و ۵۰ بوته در مترمربع و رقم صدوق مشاهده شد. کمترین عملکرد پروتئین علوفه (به ترتیب ۵۴۰ و ۵۶۷ درصد) در تراکم ۷۰ و ۵۰ بوته در مترمربع و رقم رحمت حاصل گردید (جدول ۶). در مطالعه ای که توسط پژوهشگران در مصر انجام شد، اثر دو

درصد خاکستر، درصد فیبر نامحلول در شوینده

اسیدی و درصد فیبر نامحلول در شوینده خنثی: نتایج تجزیه واریانس صفات علوفه ای کینوا از جمله خاکستر، درصد فیبر نامحلول در شوینده اسیدی و درصد فیبر نامحلول در شوینده خنثی تحت تأثیر تیمارهای تراکم بوته و رقم و برهم کنش این دو عامل معنی دار نبود (جدول ۵). در مطالعه ای روی کینوا گزارش گردید که میزان خاکستر علوفه ای این گیاه حدود ۱۸/۲ درصد بود. همچنین مقدار فیبر نامحلول در شوینده اسیدی بین ۲۸ تا ۳۲ درصد و میزان پروتئین خام موجود در آن بین ۱۱/۱ تا ۱۴/۷ درصد بود (Najafinezhad et al., 2021). فیبر نامحلول در شوینده خنثی نشان دهنده بخش دیواره سلولی گیاه (سلولز، همی سلولز و لگنین) و به عنوان شاخصی از قابلیت هضم علوفه محسوب می شود. علوفه ای با میزان فیبر کمتر، معمولاً از سرعت هضم بالاتری برخوردار بوده و در نتیجه می تواند انرژی بیشتری برای دام فراهم کند (Waghorn et al., 2007). براساس گزارش باسکوتا و اسلام (Baskota & Islam, 2017)، میانگین پروتئین خام علوفه کینوا بین ۱۳ تا ۲۴ درصد، فیبر نامحلول در شوینده خنثی (سلولز، همی سلولز و لگنین) بین ۳۱ تا ۳۶ درصد و مقدار فیبر نامحلول در شوینده اسیدی (سلولز و لگنین) بین ۲۲ تا ۳۱ درصد بود. همچنین نتایج پژوهش نجفی نژاد و همکاران (Najafinezhad et al., 2014) نشان داد که میزان فیبر نامحلول در شوینده اسیدی و خنثی در ذرت (*Zea mays* L.) سیلویی به ترتیب ۳۰ و ۵۸/۲ درصد و در علوفه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) به ترتیب ۳۴/۳ و ۶۲/۸ درصد بود. مقایسه مقادیر فیبر علوفه کینوا با ذرت و سورگوم بیانگر آن است که علوفه کینوا به دلیل دارا بودن فیبر کمتر، از کیفیت تغذیه ای بالاتری برای مصرف دام برخوردار است

به‌طور معمول، ذخیره پروتئین در دانه پیش از ذخیره کربوهیدرات آغاز می‌شود. بنابراین، می‌توان دلیل درصد بالاتر پروتئین علوفه در تراکم‌های بوته پایین را دسترسی بیشتر به منابع تغذیه‌ای به‌ویژه نیتروژن دانست که این موضوع موجب افزایش سنتز پروتئین در دانه‌ها می‌گردد (Eslami et al., 2024).

سطح تراکم بوته (۱۶۷ هزار و ۶۵ هزار بوته در هکتار) بر کیفیت ترکیبات غذایی گیاه کینوا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تراکم بوته تأثیر معنی‌داری بر عملکرد کمی و کیفی این گیاه داشت، به‌گونه‌ای که افزایش تراکم سبب کاهش درصد پروتئین علوفه، عملکرد پروتئین علوفه و وزن دانه گردید (Eisa et al., 2018).

جدول ۵- تجزیه واریانس برخی صفات علوفه‌ای کینوا درصد خاکستر، درصد فیبر نامحلول در شوینده اسیدی، درصد فیبر نامحلول در شوینده خنثی، درصد پروتئین علوفه، عملکرد پروتئین علوفه و عملکرد علوفه

Table 5- Analysis of variance of some forage traits of quinoa ASH percentage, acid detergent fiber (ADF) percentage, neutral detergent fiber (NDF) percentage, forage protein percentage, forage protein yield (kg ha⁻¹) and forage yield (kg ha⁻¹)

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares					
		درصد خاکستر ASH percentage	درصد فیبر نامحلول در شوینده اسیدی ADF percentage	درصد فیبر نامحلول در شوینده خنثی NDF percentage	درصد پروتئین علوفه FPP	عملکرد پروتئین علوفه FPY (kg ha ⁻¹)	عملکرد علوفه خشک DFY (kg ha ⁻¹)
تکرار Replication	2	0.002 ^{ns}	0.00051 ^{ns}	0.00025 ^{ns}	0.06 ^{ns}	132752.42 ^{**}	45095245 ^{**}
تراکم بوته Plant density (D)	2	3.69 ^{ns}	0.00021 ^{ns}	0.00168 ^{ns}	4.49 ^{**}	99256.21 ^{**}	46803 ^{ns}
رقم Cultivar (C)	1	0.11 ^{ns}	0.00026 ^{ns}	0.00352 ^{ns}	0.03 ^{ns}	745741.16 ^{**}	261674319 ^{**}
D×C	2	1.40 ^{ns}	0.00087 ^{ns}	0.00178 ^{ns}	0.54 [*]	49185.33 [*]	727351 ^{ns}
خطا Error	10	2.93	0.00108	0.00211	0.09	9496.23	4177963
ضریب تغییرات C.V (%)		21.6	8.4	7.7	5.6	12.5	14.1

ns, * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and **: are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively

ADF= acid detergent fiber, NDF= neutral detergent fiber, FPP= forage protein percentage, FPY= forage protein yield, DFY= dry forage yield

جدول ۶- مقایسه میانگین درصد پروتئین علوفه و عملکرد پروتئین علوفه (کیلوگرم در هکتار) تحت تأثیر برهم کنش تراکم بوته (در مترمربع) و رقم (براساس برش دهی فیزیکی)

Table 6- Mean comparison of forage protein percentage and forage protein yield (kg ha⁻¹) as influenced by plant density (per square meter) and cultivar (based on physical harvesting)

تراکم Density (plant m ⁻¹)	رقم Cultivar	درصد پروتئین علوفه FPP	عملکرد پروتئین علوفه FPY (kg ha ⁻¹)
30	صدوق Sadooq	6.35a*	1163a
50		5.69a	1049a
70		4.10b	741b
30	رحمت Rahmat	6.03a	624a
50		5.49b	567b
70		4.88c	540b

۳۰، ۵۰ و ۷۰: به ترتیب نشان‌دهنده تراکم بوته در مترمربع می‌باشند.

* میانگین‌های با حروف مشترک در هر ستون، اختلاف آماری معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با هم ندارند.

FPP: درصد پروتئین علوفه، FPY: عملکرد پروتئین علوفه

30, 50 and 70: indicate the plant density per square meter, respectively.

* Means with similar letters in each column are not significantly different based on Duncan test at the 5% probability level

میانگین ۱۸۲۵۹ کیلوگرم در هکتار) در رقم صدوق به دست آمد. کمترین عملکرد علوفه خشک (با میانگین ۱۰۶۳۳ کیلوگرم هکتار) در رقم رحمت مشاهده شد (جدول ۷). براساس نتایج پژوهش حاضر،

عملکرد علوفه خشک (کیلوگرم در هکتار): اثر رقم بر عملکرد علوفه (کیلوگرم در هکتار) معنی‌دار بود (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین عملکرد علوفه خشک (با

در رقم صدوق مشاهده شود. نجفی‌نژاد و همکاران (Najafinezhad et al., 2021) گزارش کردند که بیشترین عملکرد علوفه کینوا با میانگین به‌ترتیب ۳۸/۴۸ و ۳۵/۱۲ تن در هکتار در رقم کینوا ۱۲ مشاهده شد. کمترین عملکرد علوفه این گیاه نیز با میانگین ۲۳/۱۳ تن در هکتار در رقم گیزا یک به دست آمد. نتایج آزمایش حاضر با یافته‌های برخی محققان هم‌خوانی دارد (Saber, 2024).

این‌گونه می‌توان اظهار نظر نمود که رقم صدوق عملکرد بیشتری نسبت به عملکرد رقم رحمت داشت. برتری رقم صدوق از نظر عملکرد علوفه می‌تواند ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی بین ارقام مورد بررسی باشد که منجر به کارایی بالاتر این رقم در تبدیل منابع موجود به زیست‌توده شده است. از جمله این تفاوت‌ها می‌توان به پتانسیل بالاتر در تولید ماده خشک و پاسخ مناسب‌تر به شرایط محیطی منطقه، آزمایش اشاره کرد. این موضوع باعث شد که بیشترین عملکرد علوفه،

جدول ۷- مقایسه میانگین عملکرد علوفه خشک (کیلوگرم در هکتار) تحت تأثیر رقم

Table 7- Mean comparison of forage yield (kg ha⁻¹) as influenced by cultivar

رقم Cultivar	عملکرد علوفه خشک DFY (kg ha ⁻¹)
صدوق Sadooq	18259a*
رحمت Rahmat	10633b

* میانگین‌های با حروف مشترک در هر ستون، براساس آزمون دانکن اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نسبت به هم ندارند.

DFY= dry forage yield

* Means with similar letters in each column are not significantly different based on Duncan test at the 5% probability level

نتیجه‌گیری

عملکرد پروتئین علوفه (۱۱۶۳ کیلوگرم در هکتار) را به همراه داشت. عملکرد علوفه در رقم صدوق با میانگین ۱۸۲۵۹ کیلوگرم در هکتار به‌طور معنی‌داری بیشتر از رقم رحمت با میانگین ۱۰۶۳۳ کیلوگرم در هکتار بود. بنابراین تراکم ۳۰ بوته در مترمربع همراه با رقم صدوق عملکرد بهتری را جهت افزایش کمیت و کیفیت علوفه کینوا در شرایط منطقه باوی، استان خوزستان تولید کرد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به‌دلیل حمایت از این تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

نتایج این آزمایش نشان داد که افزایش تراکم بوته تا حدی که باعث ایجاد رقابت در جذب منابع محیطی نشود و استفاده از این منابع به‌صورت بهینه انجام شود، همراه با انتخاب رقم مناسب، همواره منجر به افزایش عملکرد علوفه گردید. بهبود عملکرد علوفه کینوا، تابعی از اصلاح ویژگی‌های صفاتی چون شاخص سطح برگ است. افزایش تراکم بوته از ۳۰ به ۷۰ بوته در مترمربع باعث افزایش شاخص سطح برگ شد. بیشترین شاخص سطح برگ با میانگین ۳/۸۷ در تراکم ۷۰ بوته در مترمربع و کمترین آن با میانگین ۳/۱۱ در تراکم ۳۰ بوته در مترمربع مشاهده شد. نتایج نشان داد که تراکم ۳۰ بوته در مترمربع همراه با رقم صدوق بیشترین درصد پروتئین علوفه (۶/۳۵ درصد) و

References

- Alizadeh, F., Zaefarian, F., Torabi, B., & Abbasi, R. (2021). Investigation of the effect of plant density on growth indices of different cultivars of rapeseed (*Brassica napus* L.) in Mazandaran climatic conditions. *Journal of Crop Production*, 14(3), 107-124. (in Persian). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.18883.2409>
- Antonietta, M., Fanello, D. D., Acciaresi, H. A., & Guimet, J. J. (2014). Senescence and yield responses to plant density in stay green and earlier-senescing maize hybrids from Argentina. *Field Crops Research*, 155(1), 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.016>
- Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23(1), 112-121.
- Ashraf, M. Y., Azmi, A. R., Khan, A. H., & Ala, S. A. (1994). Effect of water stress on total phenols, peroxidase activity and chlorophyll content in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 16(3), 185-191.
- Baskota, S., & Islam, A. (2017). Evaluation of forage nutritive value of quinoa cultivars. *Field Days Bulletin*, LREC Long Reports.
- Bertero, H. D., & Ruiz, R. A. (2008). Determination of seed number in sea level quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *European Journal of Agronomy*, 28(3), 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.07.002>
- Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2007). Effect of sowing dates and row spacings on yield and quality

- components of quinoa (*Chenopodium quinoa*) leaves. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 77(11), 748-751.
8. Eisa, S. S., Abd El Samad, E. H., Hussin, S. A., Ali, E. A., Ebrahim, M., González, J. A., & Abdel-Ati, A. A. (2018). Quinoa in Egypt-plant density effects on seed yield and nutritional quality in marginal regions. *Journal of Applied Sciences*, 8(2), 515-522.
9. Erazzú, L. E., González, J. A., Buedo, S. E., & Prado, F. E. (2016). Effects of sowing density on *Chenopodium quinoa* (quinoa). Incidence on morphological aspects and grain yield in Var. CICA growing in Amaicha del Valle (Tucumán, Argentina). *Journal Lilloa Facultad de Agronomía Y Zootecnia*, 53(1), 12-22.
10. Eslami, M., Salek Mearaji, H., Jamshidi, D., Taghavi, A., & Adinevand, I. (2024). Investigation the effect of planting distance on morphological traits, yield and yield components and quality of grain quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Crop Science Research in Arid Regions*, 6(2), 381-394. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.403211.1349>
11. FAO. (2023). FAO Statistic Service, [Online]. Available at: www.FAO.org/crop/statistics.
12. Forghani, A., Khoda Bandeh, N., Habibi, D., & Bankehsaz, A. (2010). Reaction of chlorophylls a and b, proline and yield of corn (SC704) to light stress and different density levels. *Journal of Crop Production Research (Environmental Stresses in Plant Sciences)*, 2(1), 29-37. (in Persian).
13. García, M., Condori, B., & Del Castillo, C. D. (2015). Agroecological and agronomic cultural practices of quinoa in South America. *Quinoa: Improvement and Sustainable Production*, 3(2), 25-46. <https://doi.org/10.1002/9781118628041.ch3>
14. Iqbal, S., Basra, S. M., Afzal, I., Wahid, A., Saddiq, M. S., Hafeez, M. B., & Jacobsen, S. E. (2019). Yield potential and salt tolerance of quinoa on salt-degraded soils of Pakistan. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205(1), 13-21. <https://doi.org/10.1111/jac.12290>
15. Jacobsen, S. E. (2011). The situation for quinoa and its production in southern Bolivia: From economic success to environmental disaster. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(5), 390-399. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00475.x>
16. Karami, R., Farajee, H., Movahedi Dehnavi, M., & Khoshroo, A. (2020). Interaction of nitrogen and plant density on growth and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Crop Production*, 13(1), 111-124. (in Persian). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2020.17603.2296>
17. Nabipour, Z., Zamani, G., & Gheisari, Y. (2023). Effect of different levels of nitrogen application on yield and yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) under different planting densities. *Applied Soil Research*, 10(4), 61-75. (In Persian).
18. Najafinezhad, H., Tahmasebi Sarvestani, Z. A., & Modarres Sanavy, S. A. M. (2014). Evaluation of forage yield and quality of maize and sorghum under water stress and application of barley residue, zeolite and super absorbent polymer in terms of minimum tillage. 1st International and 13th Iranian Crop Science Congress 3rd Iranian Seed Science and Technology Conference. Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran (in Persian).
19. Najafinezhad, H., Shakeri, P., & Amirpour Robat, M. (2021). Effect of planting date and plant density on forage yield and quality of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties in cold temperate region of Kerman province in Iran. *Seed and Plant Journal*, 36(4), 439-460. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/spji.2021.123894>
20. Najafinezhad, H., Koohi, N., & Darvishi, D. (2022). Evaluation of grain yield and quality of quinoa cultivars as affected by planting date and plant density in Jupar region of Kerman. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(1), 113-129. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2021.311672.654761>
21. Papastylianou, P., Kakabouki, I., Tsiplakou, E., Travlos, I., Bilalis, D., Hela, D., Chachalis, D., Anogiatis, G., & Zervas, G. (2014). Effect of fertilization on yield and quality of biomass of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and green amaranth (*Amaranthus retroflexus* L.). *Bulletin Uasvm Horticulture*, 71(2), 288-292. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:10411>
22. Phillips, K. M., Haytowitz, D. B., & Pehrsson, P. R. (2019). Implications of two different methods for analyzing total dietary fiber in foods for food composition databases. *Journal of Food Composition and Analysis*, 84(3), 1-70. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103253>
23. Präger, A., Munz, S., Nkebiwe, P. M., Mast, B., & Graeff-Hönninger, S. (2018). Yield and quality characteristics of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars grown under field conditions in Southwestern Germany. *Agronomy*, 8(10), 1-19. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100197>
24. Saberi, A. (2024). The effects of plant density and irrigation management on forage production of quinoa and forage sorghum. *Journal of Crop Production*, 17(1), 82-98. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2024.21796.2602>
25. Soltani, A. (2009). Mathematical Modeling in Field Crops. Mashhad Scientific Press, Mashhad, Iran. 175 p. (in Persian).
26. Spehar, C. R., & Rocha, J. D. S. (2009). Effect of sowing density on plant growth and development of quinoa, genotype 4.5, in the Brazilian savannah highlands. *Journal of Bioscience*, 25(3), 53-58.
27. Vahedi, M. R., Tohidi Nejad, E., & Pasandi Pour, A. (2022). Evaluation of yield and yield components of quinoa

- (*Chenopodium quinoa Willd.*) in as affected by different planting densities. *Journal of Crop Ecophysiology (Agriculture Science)*, 15(4), 593-608. (In Persian).
28. Van Minh, N., Hoang, D. T., Van Loc, N., & Long, N. V. (2020). Effects of plant density on growth, yield and seed quality of quinoa genotypes under rain-fed conditions on red basalt soil regions. *Australian Journal of Crop Science*, 14(12), 1977-1982. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.12.2849>
29. Van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
30. Waghorn, G. C., Burke, J. L., & Kolver, E. S. (2007). Principles of feeding value. *New Zealand Society of Animal Production: Hamilton, New Zealand*, 42(3), 35-59.
31. Zafari Ghalehrodkhani, B., Soltani, A., Zeinali, E., Kamkar, B., & Firozfar, M. (2017). Effect of plant density on allometric relationships between leaf area and vegetative traits of wheat. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(3), 546-558. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v15i3.46036>



Research Article

Vol. 24, No. 3, Fall 2026, p. 375-388

The Effects of Mycorrhizal Fungi and Plant Growth-Promoting Bacteria on Photosynthetic Pigments, Antioxidant Enzymes, and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Different Irrigation Regimes

A. Tobeh^{1*}, A. Tobeh¹, S. Farzaneh¹

1- Department of Genetics and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(*- Corresponding author's Email: Aydintobeh11@gmail.com)

Received: 27 November 2025
Revised: 23 February 2026
Accepted: 12 April 2026
Available Online: 12 May 2026

How to cite this article:

Tobeh, A., Tobeh, A., & Farzaneh, S. (2026). The effects of mycorrhizal fungi and plant growth-Promoting bacteria on photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 375-388. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.96731.1435>

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is a strategic global cereal, providing over 20% of human calorie intake. However, climate change, increased drought frequency, and declining irrigation water resources seriously threaten sustainable wheat production. In many agricultural regions, including Iran, drought stress is a primary factor limiting wheat yield. Therefore, finding biological strategies to enhance wheat's tolerance to water stress is a research priority in sustainable agriculture. Utilizing low-cost and environmentally friendly approaches to increase plant resilience to environmental stresses is essential. Among these, employing beneficial rhizosymbionts like Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR), such as *Pseudomonas* and *Azospirillum*, has garnered significant research interest. AMF form extensive hyphal networks in the soil, dramatically increasing the root absorption surface area and improving plant access to water and less mobile nutrients like phosphorus. PGPR enhance plant growth and abiotic stress tolerance through various mechanisms, including producing plant growth hormones (e.g., auxins), synthesizing siderophores, fixing nitrogen, and inducing systemic resistance. While many studies have focused on the individual effects of AMF or PGPR, research on their combined impact on wheat growth and performance under limited irrigation condition is scarce. This study aimed to evaluate the individual and combined effects of mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria on photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, biochemical resistance traits, and ultimately, the yield of wheat under different irrigation regimes.

Materials and Methods

This research was conducted during the 2021-2022 growing season at a research farm in the Arshaq region, Meshgin Shahr County, Ardabil Province, Iran. The experiment was arranged as a factorial based on a Randomized Complete Block Design with three replications. The first factor was biofertilizer type at four levels: control, mycorrhizal fungi (*Rhizophagus intraradices*), PGPR (*Pseudomonas fluorescens* and *Azospirillum brasilense*), and a combination of both mycorrhizal fungi and PGPR. The second factor was irrigation regime at three levels: no irrigation (rainfed), irrigation at 50% of plant water requirement, and full irrigation (100% water requirement). Measured traits included root colonization percentage, chlorophyll a, b, and carotenoid content, activities of the antioxidant enzymes catalase (CAT), peroxidase (POX), and superoxide dismutase (SOD), number of grains per spike, thousand-kernel weight, and grain yield. Root colonization was assessed using staining and microscopic examination. Photosynthetic pigments were extracted with acetone and measured spectrophotometrically. Enzyme activities were determined using specific spectrophotometric assays: CAT



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

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.96731.1435>

activity by monitoring H_2O_2 decomposition at 240 nm, POX activity by monitoring guaiacol oxidation at 470 nm, and SOD activity by measuring the inhibition of nitroblue tetrazolium reduction at 560 nm.

Results and Discussion

The analysis of variance indicated that the main effects of biofertilizers and irrigation regimes, as well as their interaction, were significant for all measured traits. The highest root colonization (79.6%) was observed in the full irrigation $\times$ combined biofertilizer treatment. Drought stress reduces carbohydrate allocation to roots, limiting the carbon source for fungi and hindering colonization. Biofertilizers, especially the combination, provided direct inoculation and improved the root environment, facilitating higher colonization. The maximum chlorophyll a (2.55 mg g^{-1}), chlorophyll b (0.85 mg g^{-1}), and carotenoid (0.204 mg g^{-1}) contents were recorded in the full irrigation $\times$ combined biofertilizer treatment. The minimum values were under severe drought without biofertilizers. Drought degrades chloroplasts and activates chlorophyll-degrading enzymes. Biofertilizers, by improving water and nutrient (especially phosphorus) uptake, helped maintain pigment synthesis and protect the photosynthetic apparatus from oxidative damage. The highest activities of CAT (32.5 U mg^{-1}), POX (4.88 U mg^{-1}), and SOD (28.8 U mg^{-1}) were found in the no irrigation $\times$ no biofertilizer treatment. Conversely, the lowest enzyme activities were consistently observed in the full irrigation $\times$ combined biofertilizer treatment. Elevated antioxidant enzyme activity under drought stress without biofertilizers is a physiological response to high oxidative stress caused by increased Reactive Oxygen Species (ROS) production. The application of biofertilizers, particularly the combination, mitigated water and nutrient deficits, thereby reducing ROS generation and the need for high antioxidant enzyme activity, indicating better physiological equilibrium. Increased significantly from $2501.7 \text{ kg ha}^{-1}$ under severe drought without biofertilizers to $4891.6 \text{ kg ha}^{-1}$ under full irrigation with combined biofertilizers. This demonstrates that the synergistic effect of AMF and PGPR in improving water relations, nutrient status, and oxidative stress management translated into superior yield performance.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that the combined application of mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria is an effective strategy for mitigating the adverse effects of drought stress and enhancing wheat yield. This biological combination acted synergistically to significantly increase root colonization, preserve the photosynthetic system by maintaining higher chlorophyll and carotenoid levels, and reduce oxidative stress by modulating antioxidant enzyme activities. These improvements ultimately led to a significant increase in yield components. Therefore, employing these bio-inputs can serve as a sustainable and eco-friendly approach, paving the way for reduced chemical fertilizer use, increased plant resilience to water scarcity, and enhanced food security.

Keywords: Carotenoid, Catalase, Chlorophyll, Colonization, Peroxidase

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص ۳۷۵-۳۸۸

تأثیر قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

آیدین توبه^{۱*}، احمد توبه^۱، سلیم فرزانه^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

چکیده

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات جهان است. تنش خشکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده عملکرد گندم شناخته می‌شود. بنابراین، یافتن راهکارهای زیستی از جمله استفاده از قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد جهت افزایش مقاومت گیاه اهمیت زیادی دارد. این پژوهش طی سال زراعی ۱۴۰۰-۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی جهاد کشاورزی ارسق از توابع شهرستان مشگین‌شهر واقع در استان اردبیل با هدف بررسی اثر کاربرد جداگانه و ترکیبی قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گندم تحت سطوح مختلف آبیاری انجام گرفت. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عامل‌ها شامل چهار سطح کود زیستی (شاهد، قارچ میکوریزا، باکتری‌های محرک رشد و ترکیب هر دو) و سه رژیم آبیاری (آبیاری کامل، آبیاری معادل ۵۰ درصد نیاز آبی و قطع آبیاری) بودند. بیشترین درصد کلونی‌زاسیون ریشه (۷۹/۶ درصد)، محتوای کلروفیل a و b و کاروتنوئیدها (به‌ترتیب ۲/۵۵، ۰/۸۵ و ۰/۲۰۴ میلی‌گرم بر گرم) و عملکرد دانه (۴۸۹۱/۶ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری کامل همراه با کاربرد توأم هر دو کود زیستی به‌دست آمد. در تمامی سطوح آبیاری، کاربرد کودهای زیستی به‌ویژه کاربرد توأم آن‌ها موجب بهبود صفات زراعی و فیزیولوژیکی گیاه شد. یافته‌های این آزمایش نشان داد که کاربرد ترکیبی قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد، از طریق تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و ظرفیت فتوسنتزی راهکاری مؤثر برای کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی است و زمینه کاهش مصرف کودهای شیمیایی را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداز، کاتالاز، کاروتنوئید، کلروفیل، کلونی‌زاسیون

مقدمه

کشت شده که ۷۹ درصد آن‌ها دیم است. با توجه به اینکه اکثر کشت گندم در ایران و استان اردبیل به‌صورت دیم است، تغییر اقلیم و کمبود بارندگی در سالیان گذشته باعث محدودیت در کمیت و کیفیت تولید گندم شده است. در بسیاری از مناطق کشاورزی جهان از جمله ایران، تنش خشکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده عملکرد گندم شناخته می‌شود. تنش کم‌آبی با تأثیر بر رشد ریشه و اندام هوایی، کاهش سطح برگ، اختلال در جذب عناصر غذایی و اختلال در فتوسنتز موجب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Farooq et al., 2009). از این‌رو، یافتن راهکارهای زیستی برای افزایش تحمل گندم به تنش آبی، از اولویت‌های پژوهشی در کشاورزی پایدار به شمار می‌رود.

در این شرایط، بهره‌گیری از راهکارهای کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست برای افزایش تاب‌آوری گیاهان در برابر تنش‌های محیطی، ضرورتی انکارناپذیر است. در بین این راهکارها، استفاده از

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات راهبردی جهان محسوب می‌شود و بیش از ۲۰ درصد کالری مصرفی بشر را تأمین می‌کند. با این حال، تغییرات اقلیمی، افزایش وقوع خشکسالی و کاهش منابع آب آبیاری، تولید پایدار گندم را به‌طور جدی تهدید می‌کند (Adel & Carels, 2023). بیش از ۶۵ درصد اراضی کشاورزی در ایران به کشت گندم اختصاص یافته که حدود دو سوم آن دیم است. در استان اردبیل نیز گندم در حدود ۲۹۰ هزار هکتار (تقریباً نیمی از زمین‌های کشاورزی)

۱- گروه ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(*) - نویسنده مسئول: Email: Aydintobeh11@gmail.com

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.96731.1435>

میکوریزا یا باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه بر گیاهان متمرکز بوده‌اند و بررسی اثرهای هم‌زمان این دو بر رشد و عملکرد گندم تحت شرایط آبیاری محدود، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این شکاف دانشی، لزوم انجام مطالعات جامع‌تر در این زمینه را نشان می‌دهد. این پژوهش با هدف اصلی بررسی اثرات جداگانه و ترکیبی قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و صفات بیوشیمیایی مقاومت در برابر تنش و در نهایت عملکرد گندم تحت سطوح مختلف آبیاری اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر طی سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ در مزرعه نمونه تحقیقاتی جهاد کشاورزی منطقه ارشق از توابع شهرستان مشگین‌شهر واقع در استان اردبیل انجام گرفت. میزان بارندگی سالانه در این منطقه حدود ۳۵۰ میلی‌متر است. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. عامل اول رژیم آبیاری دارای سه سطح (بدون آبیاری، آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه و آبیاری کامل) بود. عامل دوم نوع کود زیستی در چهار سطح بود. این سطوح عبارتند از شاهد، استفاده از کود زیستی قارچ میکوریزا، استفاده از باکتری‌های محرک رشد و استفاده توأم از قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بود. در مجموع، ۱۲ تیمار آزمایشی وجود داشت. این تیمارهای آزمایشی هرکدام در سه تکرار انجام شدند و در مجموع ۳۶ واحد آزمایشی وجود داشت. نیاز آبی کامل گندم براساس گزارش‌های محلی جهاد کشاورزی و با استفاده از روش پنمن-مانتیت و داده‌های هواشناسی منطقه، معادل ۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار برای کل دوره رشد برآورد شد (Allen et al., 1998). آبیاری‌ها از مرحله پنجه‌زنی (حدود ۲۰ روز پس از کاشت) آغاز و تا انتهای مرحله پُر شدن دانه ادامه یافت. آبیاری به‌صورت نوبتی و براساس تبخیر و تعرق تجمعی از تشتک کلاس A محاسبه و اعمال گردید. در تیمار آبیاری کامل، آبیاری هنگامی انجام می‌شد که رطوبت خاک به حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی می‌رسید. در تیمار ۵۰ درصد، آبیاری تنها پس از رسیدن به ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی مجاز انجام شد. کلیه عملیات آبیاری با استفاده از سیستم جوی و پشته و یکنواخت‌سازی شیب زمین به‌منظور توزیع یکنواخت آب انجام پذیرفت. تیمار بدون آبیاری تنها متکی به بارش‌های طبیعی فصل بود. جهت کاهش هرگونه نشت یا خطای احتمالی تمهیدات لازم انجام شد، از جمله این تمهیدات وجود پشته‌های خاکی عریض، حفر کانال‌های زهکشی عمیق در اطراف هر کرت جهت جمع‌آوری و هدایت آب و همچنین وجود ردیف‌های حفاظتی کاشته‌شده در کناره‌های کرت بود که جز مساحت نمونه‌برداری نبود. برای اعمال تیمارهای زیستی، از یک دستورالعمل

ریزوسیمبیونت‌های مفید مانند قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و باکتری‌های محرک رشد گیاه از جمله *Pseudomonas Azospirillum* توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. قارچ‌های میکوریزا با ایجاد شبکه‌های گسترده هیفی در خاک، سطح جذب ریشه را به‌طور چشمگیری افزایش داده و دسترسی گیاه به آب و عناصر کم‌تحرک مانند فسفر را بهبود می‌بخشد (Smith & Read, 2008). افزون‌بر این، قارچ‌های میکوریزا با تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با تنش آبی و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، در سازگاری غلات با خشکی نقش آفرینی می‌کند (Naseri et al., 2021; Ruiz-lozano et al., 2016). این قارچ‌ها در تجزیه مواد آلی خاک و آزادسازی مواد غذایی نقش دارند و آن‌ها را در اختیار گیاه قرار می‌دهند (Lehmann et al., 2020). ژانگ و همکاران در پژوهش خود مشاهده کردند که استفاده از قارچ‌های میکوریزا می‌تواند مقاومت به خشکی، و رشد و عملکرد گندم را در شرایط کم‌آبی افزایش دهد (Zhang et al., 2019). همچنین باکتری‌های محرک رشد با سازوکارهای مختلف از جمله تولید هورمون‌های رشد گیاهی (مانند اکسین)، سنتز سیدروفور، تثبیت نیتروژن و القای مقاومت سیستمیک موجب بهبود رشد و افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های غیرزیستی می‌شوند (Backer et al., 2018). این باکتری‌ها با حل‌کنندگی فسفات و القای مقاومت به تنش‌ها، نقش مهمی در بهبود رشد و عملکرد گیاهان ایفا می‌کنند (Khodadadi & Ghorbani, 2020). یافته‌های تحقیقاتی حاکی از آن است که کاربرد این باکتری‌ها می‌تواند موجب افزایش محتوای کلروفیل، بهبود نرخ فتوسنتز و در نهایت، افزایش عملکرد گندم تحت تنش خشکی شود (Vurukonda et al., 2016). گروهی از این باکتری‌ها می‌توانند نیتروژن موجود در هوا را که گیاه قادر به جذب مستقیم آن نیست، گرفته و به‌شکل قابل استفاده برای گیاه تبدیل کنند (Kuan et al., 2016). این کار بسیار مهمی است و تا حدی نیاز گیاه به کودهای نیتروژنی را کاهش می‌دهد. بسیاری از این باکتری‌ها همچنین موادی به‌نام هورمون‌های رشد تولید می‌کنند که به‌طور مستقیم باعث تحریک تقسیم سلولی، طولی شدن ریشه و گسترش سیستم ریشه‌ای می‌شوند (Karimi et al., 2022). یک ریشه قوی و گسترده، دسترسی گیاه به آب و غذا را بسیار افزایش می‌دهد. جمیل و همکاران در مطالعه خود نتیجه گرفتند که کاربرد *Pseudomonas fluorescens* در گندم تحت شرایط تنش خشکی موجب افزایش طول ریشه و فعالیت رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود (Jamil et al., 2018). طبق پژوهش گالیندو و همکاران (Galindo et al., 2022)، مایه‌زنی با *Azospirillum brasilense* وابستگی به کود نیتروژن را تا ۵۰ درصد کاهش داده و ضمن افزایش عملکرد و سودآوری، به امنیت غذایی و پایداری محیط زیست کمک می‌کند. بیشتر مطالعات انجام‌شده تاکنون بر تأثیر جداگانه قارچ‌های

انجام آزمایش بررسی شده است.

نحوه اندازه‌گیری صفات

پس از رسیدگی کامل گیاه، ناحیه‌ای به مساحت یک مترمربع از ردیف‌های وسط هر کرت انتخاب شد و برداشت به‌منظور اندازه‌گیری صفات عملکردی صورت گرفت. سپس میانگین مربوط به هر صفت در هر کرت به دست آمده و ثبت شد. پس از آن، عملکرد دانه به‌دست‌آمده به هکتار تعمیم داده شد. با توجه به متفاوت بودن تیمارها از نظر سطوح آبیاری و سطوح کودی، زمان برداشت و طول دوره رسیدگی در هر تیمار متفاوت بود. بنابراین تاریخ ثابت و مشخصی برای برداشت وجود ندارد. به این نکته که هر تیمار در زمان رسیدگی کامل برداشت شود، دقت گردید. جهت اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون ریشه در پایان دوره رشد و هم‌زمان با برداشت نهایی، از سیستم ریشه گیاهان در تمامی تیمارها به‌طور تصادفی نمونه‌برداری شد. نمونه‌های ریشه پس از شست‌وشو، در اتانول ۷۰ درصد تثبیت گردیدند. برای ارزیابی درصد کلونیزاسیون ریشه، از نمونه‌های ریشه نازک استفاده شد. به این منظور، نمونه‌ها ابتدا در محلول پتاسیم هیدروکسید ۱۰ درصد به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق شفاف‌سازی و سپس در محلول اسید هیدروکلریک یک درصد خنثی‌سازی شدند. در نهایت، رنگ‌آمیزی با جوهر شفر ۰/۰۵ درصد در محلول اسید لاکتیک-گلیسرول به مدت ۲۴ ساعت انجام پذیرفت. پس از خارج کردن رنگ اضافی با اسید لاکتیک-گلیسرول خالص، نمونه‌ها بر روی لام قرار داده شده و با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند (Trouvelot et al., 2015).

زمان سنجش صفات فیزیولوژیک، مرحله حداکثر رشد رویشی بود. برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم کاتالاز، ابتدا یک گرم از نمونه بافت برگ‌های جوان و کاملاً توسعه‌یافته گیاه در یک بافر فسفات سرد همگن شد. سپس محلول همگن‌شده به مدت ۱۵ دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت تا مواد جامد جدا شوند. فاز مایع شفاف به‌عنوان منبع آنزیم کاتالاز استفاده گردید.

دو مرحله‌ای برای تلقیح بذرها استفاده شد. در تیمارهای شامل باکتری‌های محرک رشد (اعم از تیمار باکتری به‌تنهایی و تیمار ترکیبی)، بذرها با استفاده از سوسپانسیونی حاوی باکتری‌های *Pseudomonas fluorescens* و *Azospirillum brasilense* با غلظت 10^8 CFU ml⁻¹ به‌روش پوشش‌دهی آغشته شدند، به‌طوری که مقدار مصرف سوسپانسیون یک لیتر در هکتار در نظر گرفته شد. در تیمارهای شامل قارچ میکوریزا (اعم از تیمار قارچ به‌تنهایی و تیمار ترکیبی)، از مایه تلقیح قارچی گونه *Rhizophagus intraradices* حاوی ۱۰۰ اسپور زنده در هر گرم از بستر تلقیح (خاک استریل و اجزای زادمایه) استفاده گردید. برای اطمینان از انتقال مؤثر قارچ به بذر و منطقه ریشه، روش پوشش‌دهی بذر با ماده حامل خشک به کار رفت؛ بدین صورت که بذرها (که در تیمار ترکیبی قبلاً با سوسپانسیون باکتریایی مرطوب شده بودند) با مخلوطی از مایه تلقیح قارچ و خاک استریل به‌عنوان ماده حامل، با نسبت مشخص ۱۰۰ گرم اینوکولوم قارچ به‌ازای هر کیلوگرم بذر مخلوط شدند تا اسپورها به‌طور یکنواخت به سطح بذر بچسبند. در نهایت، تمامی بذرها تلقیح‌شده بلافاصله و در همان روز در شرایط مزرعه کشت شدند. ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم سولفات و همچنین ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌عنوان کود پایه استفاده گردید. کود پایه کمتر از نیاز گیاه مصرف شد تا اثر کودهای زیستی و هم‌زیستی میکوریزایی تحت تأثیر قرار نگیرد. عملیات کاشت در ۷ آبان ماه انجام شد. کاشت بذرها با استفاده از بذرکار دستی (ردیف‌کار) و به‌صورت خطی صورت گرفت. بذرها در عمق سه تا چهار سانتی‌متر و با فاصله ردیف‌های ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده شدند. تراکم کاشت معادل ۳۵۰ بذر در مترمربع تنظیم گردید. طول کرت‌ها ۴/۵ متر و عرض آن دو متر بود. همچنین فاصله بین کرت‌ها در یک بلوک نیم متر و فاصله بین بلوک‌ها یک متر بود. فاصله بین ردیف‌های کاشت گندم، ۲۰ سانتی‌متر بود که به‌وسیله پشته‌های خاکی عریض از هم جدا شده بودند. رقم مورد استفاده، آذر ۲ بود که رقمی پاییزه و متحمل به سرما است. بذرها با قوه نامیه بالای ۹۵ درصد و خلوص فیزیکی ۹۸ درصد از ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل تهیه شدند. در جدول ۱، ویژگی‌های خاک محل

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

Table 1- Physicochemical properties of the soil used in the experiment at a depth of 0 to 30 cm

بافت Texture	پتاسیم قابل جذب Potassium available (ppm)	فسفر قابل جذب Phosphorus available (ppm)	ماده آلی Organic matter (%)	نیترژن کل Total nitrogen (%)	اسیدیته خاک pH	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	شن Sand (%)
لومی رسی Clay loam	150	12	1.3	0.08	7.2	25	43	32

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی محل انجام پژوهش

Table 2- Meteorological information of the research site

ماه	بیشینه دما	کمینه دما	میزان بارندگی
Month	T Maximum (°C)	T Minimum (°C)	Precipitation (mm)
مهر October	21.5	10.5	4.3
آبان November	11.7	3.3	26.3
آذر December	8.7	-0.6	18
دی January	7	-2	41
بهمن February	4	-8.5	23.4
اسفند March	12.4	1.9	30.2
فروردین April	14.4	4.2	28
اردیبهشت May	17.5	6.7	80.2
خرداد June	23	10.2	12
تیر July	24	13	1.8
مرداد August	27.1	14.1	0.5
شهریور September	22.8	11	1.1

و یک ماده جاذب انجام شد. سپس مایع شفاف به دست آمده از سانتریفیوژ در دمای چهار درجه سانتیگراد جمع‌آوری گردید. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات، اسید آمینه متیونین، معرف تترازولیوم، ریبوفلاوین و عصاره آنزیمی است. این مخلوط به مدت ۲۰ دقیقه در معرض نور لامپ فلورسنت قرار گرفت و سپس میزان جذب نور در طول موج ۵۶۰ نانومتر خوانده شد. یک واحد فعالیت این آنزیم به عنوان مقداری از آنزیم تعریف می‌شود که موجب ۵۰ درصد مهار کاهش معرف تترازولیوم در شرایط استاندارد شود (Giannopolitis & Ries, 1977).

برای اندازه‌گیری میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، ابتدا نیم گرم از برگ را وزن کرده و در ۲۰ میلی‌لیتر حلال استون ۸۰ درصد همگن‌سازی کرده، سپس نمونه در سانتریفیوژ با ۶۰۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت تا ذرات جامد از محلول جدا شوند. پس از آن، محلول شفاف به دستگاه اسپکتروفتومتر منتقل شده و میزان جذب آن در طول موج‌های خاصی اندازه‌گیری گردید. برای تعیین غلظت کلروفیل و کاروتنوئیدها، جذب نوری در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a، ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b و ۴۷۰ نانومتر برای کاروتنوئیدها اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از فرمول‌های استاندارد،

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم، ۵۰ میکرولیتر از مایع شفاف به ۲/۹ میلی‌لیتر از محلول پراکسید هیدروژن (۱۰ میلی‌مولار در بافر فسفات) اضافه شد. کاهش جذب نور در طول موج ۲۴۰ نانومتر به مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج UV-Vis ثبت گردید. فعالیت کاتالاز براساس میزان کاهش جذب نور و با استفاده از ضریب خاموشی پراکسید هیدروژن (۰/۰۴۳ میلی‌مولار بر سانتی‌متر) محاسبه شد (Hadwan & Abed, 2018).

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز، ۵۰ میکرولیتر از فاز مایع شفاف به ۲/۹ میلی‌لیتر از مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات، گایاکول (۲۰ میلی‌مولار) و پراکسید هیدروژن (۱۰ میلی‌مولار) اضافه شد. افزایش جذب نور در طول موج ۴۷۰ نانومتر به مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج UV-Vis ثبت می‌شود. فعالیت پراکسیداز براساس میزان افزایش جذب نور و با استفاده از ضریب خاموشی تترایاکول (۲۶/۶ میلی‌مولار بر سانتی‌متر) محاسبه گردید (Singh et al., 2017).

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در برگ‌های گندم به روش جیانوپولوتیس و رایز اندازه‌گیری شد. به این منظور، استخراج آنزیم از نمونه‌های برگ خردشده در یک بافر فسفات سرد حاوی ماده محافظ

کودهای زیستی و رژیم آبیاری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر صفت وزن هزاردانه معنی‌دار بود. داده‌های **جدول ۴** نشان می‌دهد که وزن هزاردانه از کمترین مقدار (۳۴/۸ گرم) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۴۳/۵ گرم) در تیمار آبیاری کامل و هر دو کود افزایش یافت. برخی باکتری‌های محرک رشد از جمله *Azospirillum* با تثبیت نیتروژن موجود در جو، قابلیت جذب این عنصر را توسط گیاه بالا برده و باعث افزایش وزن هزار دانه می‌گردند (Dobbelaere et al., 2003). از سوی دیگر، قارچ‌های میکوریزا با بالا بردن مقاومت گیاه در برابر کم‌آبی، به حفظ وزن دانه در شرایط تنش کمک می‌کنند (Gholinezhad & Darvishzadeh, 2015). این در حالی است که در وضعیت خشکی، فرآیند انتقال مواد تولیدشده در فتوسنتز از برگ‌ها به سمت دانه‌ها مختل شده و در نتیجه دانه‌ها به‌خوبی پر نمی‌شوند (Omidi Nasab et al., 2024).

عملکرد دانه

طبق نتایج تجزیه واریانس (**جدول ۳**)، اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و برهم‌کنش آن‌ها بر صفت عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. براساس داده‌های **جدول ۴**، عملکرد دانه از کمترین مقدار (۲۵۰۱/۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۴۸۹۱/۶ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری کامل و هر دو کود رسید. عملکرد دانه به‌عنوان ماحصل و نتیجه نهایی عملکرد هماهنگ و تأثیر متقابل ده‌ها صفت فیزیولوژیک و مورفولوژیک دیگر است. در تیمار بدون آبیاری و بدون کود، عملکرد پایین به‌طور مستقیم با مقادیر نامطلوب سایر صفات مرتبط است. این تیمار بیشترین تنش اکسیداتیو (که از فعالیت بیشتر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مشخص است) و تخریب بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی را در بین تیمارها نشان داد و در نتیجه کمترین میزان عملکرد دانه را نیز ثبت کرد. این شرایط برای تیمار آبیاری کامل و هر دو کود کاملاً برعکس است. کودهای زیستی در این راه با تقویت سیستم دفاعی گیاه و کمک به حفظ هموستازی درونی و پایداری گیاه تحت تنش، بستری فراهم کردند تا پتانسیل ژنتیکی گیاه برای تولید دانه به حداکثر برسد (Nemati et al., 2021). قارچ‌های میکوریزا با شبکه‌های هیفی گسترده خود، ابرراه‌های انتقال مواد را در خاک ایجاد می‌کنند که نه‌تنها آب و مواد معدنی، بلکه سیگنال‌های شیمیایی بین گیاهان را نیز جابه‌جا می‌کنند (Roger et al., 2013). از سوی دیگر، باکتری‌های محرک رشد با تولید سیدروفور و تنظیم هورمونی، بازار مواد غذایی را در ریزوسفر رونق می‌بخشند (Saha et al., 2016). وقتی این دو با هم ترکیب می‌شوند، یک بوم‌نظام میکروبی هم‌افزا شکل می‌گیرد که در آن راندمان تبدیل نهاده‌ها به خروجی به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2018).

مقدار هر یک از این رنگدانه‌ها محاسبه شد (Lichtenthaler & Wellburn, 1983).

به‌منظور تجزیه و تحلیل، داده‌ها ابتدا تست نرمال شدند. سپس داده‌های غیرنرمال با استفاده از روش لگاریتمی تغییر داده‌ها نرمال‌سازی گردید. جهت تجزیه واریانس داده‌ها از نرم افزارهای SAS نسخه ۹/۴ و SPSS نسخه ۲۴ استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) و در سطح احتمال پنج درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

تعداد دانه در سنبله

طبق **جدول ۳**، تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر صفت تعداد دانه در سنبله معنی‌دار بود. داده‌های **جدول ۴** نشان می‌دهد که تعداد دانه در سنبله از کمترین مقدار (۲۲/۳ دانه) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۳۶/۷ دانه) در تیمار آبیاری کامل و مصرف هر دو کود افزایش یافت. این الگوی تغییرات را می‌توان با تأثیر این عوامل بر مراحل حساس نمو گیاه توجیه کرد. تعداد دانه در سنبله عمدتاً در مرحله گرده‌افشانی و تشکیل دانه تعیین می‌شود که از حساس‌ترین دوره‌ها به تنش خشکی محسوب می‌شود. تنش خشکی در این مرحله می‌تواند منجر به نابرابری گرده، کاهش رشد لوله گرده و اختلال در تلقیح شود که همگی به کاهش مستقیم تعداد دانه منجر می‌گردند (Saini & Westgate, 2000). کاهش شدید این صفت در تیمار شاهد خشکی، به‌طور آشکار نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای این مرحله از رشد در برابر کم‌آبی است. در مقابل، در شرایط بهینه (آبیاری کامل و کود زیستی)، گیاه در حالت رفاه قرار دارد. دسترسی به آب و مواد غذایی کافی که توسط کودهای زیستی به‌طور پیوسته و کارآمد تأمین می‌شود، به گیاه این اطمینان و منابع مازاد را می‌دهد که می‌تواند به‌طور حداکثری روی تولیدمثل سرمایه‌گذاری کند (Igihon & Babalola, 2018). در این حالت، گیاه نه‌تنها برای پر کردن دانه‌های بیشتر توانایی دارد، بلکه از نظر فیزیولوژیک انگیزه و پیام لازم برای انجام این کار را دریافت می‌کند. قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌ها با بهبود سلامت کلی و وضعیت تغذیه‌ای گیاه، در واقع بوجه‌بندی گیاه را بهبود می‌بخشند و منابع کافی را برای سرمایه‌گذاری روی فرآیند پرهزینه تولید دانه‌های بیشتر فراهم می‌کنند (Bitterlich et al., 2018).

وزن هزاردانه

طبق **جدول ۳**، تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی

درصد کلونیزاسیون ریشه

با توجه به **جدول ۳**، تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری و همچنین برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر صفت درصد کلونیزاسیون ریشه معنی‌دار بود. طبق **جدول ۴**، مقایسه میانگین اثر متقابل کودهای زیستی و رژیم آبیاری نشان داد که بیشترین میزان کلونیزاسیون ریشه مربوط به اثر متقابل آبیاری کامل و کاربرد توأم هر کود قارچ و باکتری‌های محرک رشد به میزان ۷۹/۶ درصد بود. همچنین کم‌ترین میزان ثبت‌شده نیز مربوط به اثر متقابل سطح شاهد کودی و سیستم بدون آبیاری به میزان ۱۷/۵ درصد بود. در شرایط تنش خشکی، گیاه میزان کربوهیدرات‌ها (به شکل قند) کمتری را به ریشه خود منتقل می‌کند. از آنجاکه این ترشحات، ماده غذایی اصلی برای قارچ‌ها به شمار می‌روند، کاهش آن‌ها، انگیزه و ظرفیت قارچ برای استقرار و کلونیزه کردن ریشه را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، خشکی به لحاظ فیزیکی، رشد و توسعه ریشه و همچنین گسترش هیف قارچ را با کندی مواجه می‌سازد (Mathur et al., 2018). کودهای زیستی مؤثر (مانند قارچ‌های میکوریز یا باکتری‌های سودمند) به طور مستقیم با فراهم آوردن منبع اولیه تلقیح، به طور چشمگیری موجب افزایش کلونیزاسیون ریشه می‌شوند. همچنین این کودها می‌توانند با بهبود وضعیت تغذیه و تأمین آب در دسترس ریشه، محیط بهینه‌تری را برای فعالیت و رشد قارچ‌ها فراهم کنند (Begum et al., 2019). باکتری‌های محرک رشد نیز می‌توانند نقش کمک‌کننده به هم‌زیستی میکوریزایی ایفا نمایند (Battini et al., 2017). این باکتری‌ها با ترشح هورمون‌های خاص یا ایجاد تغییر در ترکیب ترشحات ریشه، بستری مناسب برای جوانه‌زنی اسپور قارچ و نفوذ مؤثر هیف به درون بافت ریشه ایجاد می‌کنند که این امر، توجیه‌کننده اثر سینرژیستیک و متقابل مثبت آن‌ها است. قارچ‌های میکوریز با توسعه شبکه‌های گسترده هیفی در خاک، دسترسی ریشه به آب و مواد مغذی را حتی در مناطق دور از دسترس خاک افزایش می‌دهند که این مزیت به‌ویژه در شرایط محدودیت آبی بسیار حائز اهمیت است (Smith & Smith, 2011). علاوه بر این، کودهای زیستی ممکن است با القای تولید برخی پیام‌های مولکولی در ریشه (مانند پیام‌های مربوط به اکسین، ژبیرلین و اتیلن)، زمینه را برای پذیرش و استقرار بهتر قارچ فراهم ساخته و فرآیند هم‌زیستی را تسهیل نمایند (Gutjahr & Parniske, 2013).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

براساس نتایج تجزیه واریانس **جدول ۳**، اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم آبیاری و اثر متقابل آن‌ها بر تمامی صفات رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید) در سطح احتمال یک

درصد معنی‌دار بود. طبق جدول مقایسه میانگین (**جدول ۵**)، بیشترین مقدار این رنگیزه‌ها در تیمار ترکیبی آبیاری کامل × مصرف هر دو کود زیستی (با مقادیر ۲/۵۵، ۰/۸۵ و ۰/۲۰۴ میلی گرم بر گرم به ترتیب برای کلروفیل a، b و کاروتنوئید) مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار مربوط به تیمار بدون آبیاری × عدم مصرف کود بود. خشکی باعث تخریب ساختار کلروپلاست‌ها، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و فعال شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل مانند کلروفیلاز می‌شود (Hosseini & Heidari, 2025). در چنین شرایطی، کاروتنوئیدها نیز که نقش محافظتی در برابر پرتوهای مضر و جلوگیری از پراکسیداسیون دارند، تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Hasanuzzaman et al., 2020). کاربرد کودهای زیستی (قارچ میکوریزا و باکتری) به طور معنی‌داری از تخریب رنگیزه‌ها جلوگیری می‌کنند. این موجودات با ایجاد رابطه هم‌زیستی با ریشه گیاه، سطح جذب آب و عناصر غذایی به‌ویژه فسفر را که برای سنتز مولکول‌های کلروفیل و ساختار فتوسنتزی ضروری است، افزایش می‌دهند (Rouphael & Colla, 2020). این نتایج با داده‌های مربوط به فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در این پژوهش هم‌خوانی کامل دارد. در تیمار بدون آبیاری × عدم مصرف کود، که کمترین میزان رنگیزه را شاهد بودیم، فعالیت این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در بالاترین سطح خود بود. این موضوع نشان می‌دهد که گیاه تحت تنش اکسیداتیو شدیدی قرار داشته و سعی در مقابله با رادیکال‌های آزاد تولیدشده داشته است. تولید این رادیکال‌ها به‌طور مستقیم به مولکول‌های کلروفیل آسیب می‌زند. در مقابل، در تیمار آبیاری کامل × هر دو کود، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به کمترین حد خود رسید که نشان از شرایط فیزیولوژیک مطلوب و عدم تنش اکسیداتیو شدید دارد. این محیط آرام، امکان حفظ و انباشت بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی را فراهم کرده است. کاربرد کودهای زیستی با حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی سبب پایداری ساختار و عملکرد دستگاه فتوسنتزی شده و از تخریب رنگیزه‌ها جلوگیری می‌کند (Fayazi et al., 2018). بنابراین کودهای زیستی به‌ویژه کاربرد هم‌زمان هر دو نوع کود زیستی، در تمامی سطوح آبیاری موجب بهبود شرایط رنگیزه‌های فتوسنتزی شده و از این طریق باعث افزایش مقاومت گیاه شده‌اند.

فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس **جدول ۳** نشان داد که اثر اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. براساس مقایسه میانگین‌ها در **جدول ۵**، بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۳۲/۵ واحد بر میلی گرم) در تیمار شاهد (بدون آبیاری و بدون مصرف کود زیستی) مشاهده شد. همچنین کمترین فعالیت این آنزیم (۲۲/۳ واحد بر میلی گرم) مربوط به تیمار آبیاری کامل همراه با کاربرد توأم هر دو

عامل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این نتایج حاکی از آن است که تغییرات سطوح مختلف آبیاری و کاربرد انواع کودهای زیستی به‌طور مستقل و نیز در کنش با یکدیگر، تأثیر معنی‌داری بر فعالیت این آنزیم آنتی‌اکسیدانی داشته‌اند. براساس مقایسه میانگین اثرات متقابل، بیشترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز (۴/۸۸ واحد بر میلی‌گرم) در تیمار بدون آبیاری و عدم مصرف کود زیستی مشاهده شد. در مقابل، کمترین فعالیت این آنزیم (۳/۰۸ واحد بر میلی‌گرم) مربوط به تیمار آبیاری کامل به همراه کاربرد توأم قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بود. در شرایط تنش خشکی شدید (تیمار شاهد)، کاهش پتانسیل آب گیاه و بسته شدن روزنه‌ها منجر به کاهش ظرفیت فتوسنتزی و در نتیجه تجمع الکترون‌های اضافی در زنجیره انتقال الکترون کلروپلاست می‌شود. این امر باعث افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند یون سوپراکسید و پراکسید هیدروژن در سلول‌های گیاهی می‌گردد (Choudhury et al., 2017).

کود زیستی بود. افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی و عدم استفاده از کودهای زیستی را می‌توان پاسخ فیزیولوژیک گیاه به تنش اکسیداتیو ناشی از خشکی دانست (Sofa et al., 2015). تحت این شرایط، تولید گونه‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد و گیاه برای محافظت از سلول‌ها، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز را افزایش می‌دهد (Nasrollahzade Asl et al., 2017). در مقابل، کاربرد کودهای زیستی به‌ویژه ترکیب قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد، با بهبود وضعیت آبی و تغذیه‌ای گیاه و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد موجب کاهش نیاز به فعالیت بالای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده و در نتیجه گیاه در وضعیت فیزیولوژیک متعادل‌تری قرار می‌گیرد (Chandra et al., 2018).

فعالیت آنزیم پراکسیداز

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ برای فعالیت آنزیم پراکسیداز نشان داد که اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم آبیاری و اثر متقابل این دو

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات بررسی شده در پژوهش
Table 3- Analysis of variance of the traits studied in the research

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares									
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoids	درصد کلونی‌زاسیون ریشه Root colonization percentage	تعداد دانه در سنبله Grains per spike	وزن هزار دانه Thousand seed weight	عملکرد دانه Seed yield	پراکسیداز POX	کاتالاز CAT	سوپر اکسید دیسکوتاز SOD
تکرار Repetition	2	0.045	0.012	0.003	8.45	1.25	0.85	4256.3	0.008	0.35	0.28
کودهای زیستی Biofertilizer (a)	3	1.84**	0.58**	0.15**	1245.8**	85.41**	15.62**	358742.6**	1.92**	92.4**	71.83**
رژیم آبیاری Irrigation regime (b)	2	3.21**	1.02**	0.27**	287.3**	120.3**	22.14**	512389.2**	3.84**	184.2**	143.1**
a × b	6	0.29**	0.093**	0.025**	63.21**	25.64*	6.98*	102543.7*	0.35**	17.02**	13.22**
خطای آزمایش Error	22	0.038	0.012	0.002	15.08	6.21	2.34	18542.7	0.009	0.43	0.34
ضریب تغییرات CV (%)	-	6.8	7.1	6.9	8.9	7.7	6.0	6.2	6.9	7.1	7.2

ns: عدم معنی‌داری، * و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns: non-significant, * and **: significant at five and one percent probability levels, respectively

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرهای متقابل کودهای زیستی و رژیم‌های آبیاری بر صفات عملکردی و مورفوفیزیولوژیکی گندم
Table 4- Comparison of the means of interaction effects between bio-fertilizers and irrigation regimes on yield and morpho-physiological traits of wheat

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	درصد کلونیزاسیون ریشه Root colonization (%)	تعداد دانه در سنبله Grains per spike (no/plant)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)
بدون آبیاری × بدون کود No irrigation × no fertilizer	17.5 e*	22.3 h	34.8 g	2501.7 h
بدون آبیاری × قارچ میکوریزا No irrigation × mycorrhizal fungi	48.3 c	24.8 g	36.5 f	2850.3 g
بدون آبیاری × باکتری No irrigation × bacteria	23.6 de	26.1 fg	37.2 ef	2981.2 fg
بدون آبیاری × هر دو کود No irrigation × both bio-fertilizers	51.4 c	27.8 f	38.1 cde	3150.4 f
آبیاری ۵۰ درصد × بدون کود 50% irrigation × no fertilizer	20.8 de	27 f	36.9 f	3450.5 e
آبیاری ۵۰ درصد × قارچ میکوریزا 50% irrigation × mycorrhizal fungi	61.2 b	30.2 e	38.7 cde	3765.2 d
آبیاری ۵۰ درصد × باکتری 50% irrigation × bacteria	28.5 d	31.5 de	39.1 cd	3884.7 d
آبیاری ۵۰ درصد × هر دو کود 50% irrigation × both bio-fertilizers	65.1 b	32.8 cd	40.5 bc	4022.9 cd
آبیاری کامل × بدون کود Full irrigation × no fertilizer	25.6 d	30.8 de	39.5 cd	4203.4 c
آبیاری کامل × قارچ میکوریزا Full irrigation × mycorrhizal fungi	66.6 b	34.5 bc	41.3 b	4568.9 b
آبیاری کامل × باکتری Full irrigation × bacteria	25.7 d	35.2 ab	42 ab	4712.3 ab
آبیاری کامل × هر دو کود Full irrigation × both bio-fertilizers	79.6 a	36.7 a	43.5 a	4891.6 a

* میانگین‌های با حروف متفاوت در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری می‌باشند

* Means with different letters in each column indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD's test

باکتری‌ها می‌توانند با تولید هورمون‌هایی مانند اکسین و ژیرلین موجب توسعه سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و در نتیجه جذب آب و مواد معدنی بیشتر شوند (Kudoyarova et al., 2019).

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

نتایج تجزیه واریانس برای فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز نشان داد که اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم آبیاری و همچنین اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این امر حاکی از آن است که مدیریت آبیاری و استفاده از کودهای زیستی، هم به صورت جداگانه و هم در تعامل با یکدیگر، تأثیر عمیقی بر سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه داشته‌اند. براساس مقایسه میانگین‌های اثر متقابل، بیشترین فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز (۲۸/۸ واحد بر میلی گرم) در تیمار بدون آبیاری و عدم مصرف کود زیستی مشاهده شد. در مقابل، کمترین فعالیت این آنزیم (۱۹/۷ واحد بر میلی گرم) به تیمار آبیاری کامل به همراه کاربرد توأم قارچ میکوریزا

پراکسیداز در چرخه آنتی‌اکسیدانی گیاه، نقش محوری در تجزیه پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به آب و اکسیژن دارد (Askari, 2025). بنابراین، افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم در شرایط تنش خشکی، پاسخی سازشی و ضروری برای جلوگیری از آسیب‌های اکسیداتیو به ماکرومولکول‌های سلولی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA است (Laxa et al., 2019). قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با گسترش شبکه هیفی خود در خاک، به طور مؤثری حجم خاک در دسترس ریشه برای جذب آب را افزایش می‌دهند و از طریق بهبود وضعیت آبی گیاه، به طور غیرمستقیم از تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌کاهند (Begum et al., 2019). علاوه بر این، این قارچ‌ها با بهبود جذب عناصر غذایی کم‌تحرک مانند فسفر و روی که از اجزای کلیدی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی هستند، به گیاه در مدیریت بهتر تنش اکسیداتیو کمک می‌کنند (Sedaghati et al., 2021). باکتری‌های محرک رشد نیز از طریق سازوکارهای مستقیم و غیرمستقیم در کاهش تنش اکسیداتیو نقش دارند. این

و باکتری‌های محرک رشد تعلق داشت. این الگوی تغییرات را می‌توان با نقش بیوشیمیایی منحصربه‌فرد این آنزیم تفسیر کرد. سوپر اکسید دیسموتاز، نخستین خط دفاعی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن محسوب می‌شود و وظیفه دارد یون سوپراکسید که از اولین رادیکال‌های آزاد تولیدشده در طی تنش‌هایی مانند خشکی است را به پراکسید هیدروژن و اکسیژن تبدیل کند (Alscher et al., 2002). در شرایط تنش خشکی شدید، اختلال در زنجیره انتقال الکترون کلروپلاست‌ها و میتوکندری منجر به تولید انبوه یون سوپراکسید می‌شود. در پاسخ به این هجوم، گیاه فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را به شدت افزایش می‌دهد تا از تجمع این رادیکال خطرناک جلوگیری کرده و از بروز آسیب‌های بعدی به غشاها و ساختارهای سلولی ممانعت به عمل آورد (Gill & Tuteja, 2010). بنابراین، سطح بسیار بالای این آنزیم در تیمار شاهد خشکی، نشان‌دهنده اوج‌گیری تنش اکسیداتیو در سلول‌های گیاه است. کاهش پلکانی و معنی‌دار فعالیت این آنزیم با بهبود شرایط آبیاری و به‌ویژه با کاربرد

کودهای زیستی، از کاهش تولید اولیه رادیکال سوپراکسید در این تیمارها حکایت دارد. قارچ‌های میکوریزا با بهبود وضعیت آبی گیاه از طریق شبکه هیفی گسترده و همچنین با افزایش جذب عناصری مانند مس و روی که از کوفاکتورهای ضروری برای سوپر اکسید دیسموتاز هستند، هم نیاز به تولید آنزیم را کاهش می‌دهند و هم کارایی سیستم دفاعی موجود را افزایش می‌دهند (Chandrasekaran et al., 2019). از سوی دیگر، باکتری‌های محرک رشد نه تنها با بهبود وضعیت ریشه، بلکه از طریق القای مقاومت سیستمیک در گیاه باعث می‌شوند گیاه قبل از مواجهه با تنش، تا حدی خود را برای مقابله آماده کند و در نتیجه، هنگام بروز تنش، تولید گونه‌های فعال اکسیژن با شدت کمتری صورت گیرد (Ma et al., 2020). همچنین برخی از گونه‌های *Pseudomonas* قادر به تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز به‌طور مستقیم در محیط ریزوسفر هستند که به کاهش بار اکسیداتیو کل گیاه کمک می‌کند (Kang et al., 2014).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرهای متقابل کودهای زیستی و رژیم‌های آبیاری بر صفات عملکردی و مورفوفیزیولوژیکی گندم

Table 5- Comparison of the means of interaction effects between bio-fertilizers and irrigation regimes on yield and morpho-physiological traits of wheat

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	پراکسیداز POX (u mg ⁻¹)	کاتالاز CAT (u mg ⁻¹)	سوپر اکسید دیسموتاز SOD (u mg ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g ⁻¹)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹)	کاروتنوئید Carotenoids (mg g ⁻¹)
بدون آبیاری × بدون کود No irrigation × no fertilizer	4.88 a*	32.5 a	28.8 a	1.21 g	0.38 g	0.102 g
بدون آبیاری × قارچ میکوریزا No irrigation × mycorrhizal fungi	4.12 de	28.7 d	25.4 de	1.58 ef	0.5 ef	0.132 e
بدون آبیاری × باکتری No irrigation × bacteria	4.27 cd	30 c	26.3 cd	1.52 f	0.48 f	0.127 ef
بدون آبیاری × هر دو کود No irrigation × both bio-fertilizers	3.66 hi	26.4 f	23.2 g	1.78 cd	0.57 cd	0.15 c
آبیاری ۵۰ درصد × بدون کود 50% irrigation × no fertilizer	4.57 b	31.2 b	27.6 b	1.45 f	0.46 f	0.122 f
آبیاری ۵۰ درصد × قارچ میکوریزا 50% irrigation × mycorrhizal fungi	3.92 efg	27.6 e	24.4 f	1.85 c	0.59 c	0.156 c
آبیاری ۵۰ درصد × باکتری 50% irrigation × bacteria	3.97 ef	28.1 de	24.7 ef	1.82 c	0.58 c	0.153 c
آبیاری ۵۰ درصد × هر دو کود 50% irrigation × both bio-fertilizers	3.47 i	25 g	22 h	2.01 b	0.64 b	0.17 b
آبیاری کامل × بدون کود Full irrigation × no fertilizer	4.38 bc	29.8 c	26.5 c	1.68 de	0.53 de	0.141 d
آبیاری کامل × قارچ میکوریزا Full irrigation × mycorrhizal fungi	3.72 gh	26.1 f	23 g	2.03 b	0.65 b	0.172 b
آبیاری کامل × باکتری Full irrigation × bacteria	3.77 fgh	26.5 f	23.3 g	2 b	0.64 b	0.169 b
آبیاری کامل × هر دو کود Full irrigation × both bio-fertilizers	3.08 j	22.3 h	19.7 i	2.55 a	0.85 a	0.204 a

* میانگین‌های با حروف متفاوت در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری می‌باشند

* Means with different letters in each column indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD's test

نتیجه گیری

براساس یافته‌های این پژوهش، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که استفاده هم‌زمان از کودهای زیستی شامل قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد، راهبردی مؤثر و کارآمد برای کاهش پیامدهای منفی تنش خشکی و افزایش عملکرد گندم به شمار می‌رود. این ترکیب بیولوژیک با ایجاد همکاری و هم‌افزایی موجب افزایش چشمگیر کلونیزاسیون ریشه، حفظ و پایداری سامانه فتوسنتزی از طریق افزایش محتوای رنگدانه‌های کلروفیل و کاروتنوئید، و همچنین

کاهش تنش اکسیداتیو با تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گردید. این بهبودها در نهایت به افزایش معنی‌دار اجزای عملکرد یعنی تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و در نتیجه عملکرد نهایی دانه منجر شد. بنابراین، به‌کارگیری این نهادهای زیستی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و سازگار با محیط زیست، زمینه را برای کاهش مصرف کودهای شیمیایی، افزایش تاب‌آوری گیاه در برابر کم‌آبی و تضمین امنیت غذایی فراهم نماید.

References

- Adel, S., & Carels, N. (2023). Plant tolerance to drought stress with emphasis on wheat. *Plants*, 12(11), 2170. <https://doi.org/10.3390/plants12112170>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>
- Alscher, R. G., Erturk, N., & Heath, L. S. (2002). Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53(372), 1331-1341. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.372.1331>
- Askari Foroshani, F., Rahnama, A., Meskarbashe, M., & Kamranfar, I. (2025). Effect of waterlogging duration at different growth stages on some photosynthetic characteristics, antioxidant activity, and yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 171-186. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.88492.1335>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Battini, F., Grønlund, M., Agnolucci, M., Giovannetti, M., & Jakobsen, I. (2017). Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. *Scientific Reports*, 7(1), 4686. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04959-0>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Bitterlich, M., Sandmann, M., & Graefe, J. (2018). Arbuscular mycorrhiza alleviates restrictions to substrate water flow and delays transpiration limitation to stronger drought in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 9, 154. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00154>
- Chandra, D., Srivastava, R., Glick, B. R., & Sharma, A. K. (2018). Drought-tolerant *Pseudomonas* spp. improve the growth performance of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) under non-stressed and drought-stressed conditions. *Pedosphere*, 28(2), 227-240. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60013-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60013-X)
- Chandrasekaran, M., Chanratana, M., Kim, K., Seshadri, S., & Sa, T. (2019). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthesis, water status, and gas exchange of plants under salt stress—a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 10, 457. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00457>
- Choudhury, F. K., Rivero, R. M., Blumwald, E., & Mittler, R. (2017). Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *The Plant Journal*, 90(5), 856-867. <https://doi.org/10.1111/tpj.13299>
- Dobbelaere, S., Vanderleyden, J., & Okon, Y. (2003). Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22(2), 107-149. <https://doi.org/10.1080/713610853>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Fayazi, H., Abdali Mashhadi, A., Koochekzadeh, A., Papzan, A., & Arzanesh, M. H. (2018). Effect of organic and biological fertilizers on nitrogen, phosphorous and potassium contents, photosynthetic pigments and active ingredient in coneflower (*Echinacea purpurea* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16(2), 283-298. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i2.49182>
- Galindo, F. S., Pagliari, P. H., Fernandes, G. C., Rodrigues, W. L., Boleta, E. H. M., Jalal, A., & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Improving sustainable field-grown wheat production with *Azospirillum brasilense* under

- tropical conditions: A potential tool for improving nitrogen management. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 821628. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.821628>
16. Gholinezhad, E., & Darvishzadeh, R. (2015). Effect of mycorrhizal fungi on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) landraces under different irrigation levels. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25(3), 119–135. (In Persian).
17. Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2), 309–314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
18. Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
19. Gutjahr, C., & Parniske, M. (2013). Cell and developmental biology of arbuscular mycorrhiza symbiosis. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 29, 593–617. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-101512-122413>
20. Hadwan, M. H., & Abed, H. N. (2018). Simple spectrophotometric assay for measuring catalase activity in biological tissues. *BMC Biochemistry*, 19, 7. <https://doi.org/10.1186/s12858-018-0097-5>
21. Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfikar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
22. Hosseini, R., & Heidari, M. (2025). Impact of drought stress on biochemical and molecular responses in lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.): Effects on essential oil composition and antibacterial activity. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1506660. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1506660>
23. Igiehon, N. O., & Babalola, O. O. (2018). Rhizosphere microbiome modulators: contributions of nitrogen fixing bacteria towards sustainable agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 574. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040574>
24. Jamil, M., Ahamd, M., Anwar, F., Zahir, Z. A., Kharal, M. A., & Nazli, F. (2018). Inducing drought tolerance in wheat through combined use of l-tryptophan and *Pseudomonas fluorescens*. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(2). <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/18.4980>
25. Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., You, Y. H., Kim, J. H., Kim, J. G., Hamayun, M., & Lee, I. J. (2014). Plant growth-promoting rhizobacteria reduce adverse effects of salinity and osmotic stress by regulating phytohormones and antioxidants in *Cucumis sativus*. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 673–682. <https://doi.org/10.1080/17429145.2014.894587>
26. Karimi, E., Mohammadi, S., & Esfandyari, E. (2022). The effect of biofilm forming growth promoting bacterium and tryptophan on root characteristics of rye and their relationship with root cadmium accumulation. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(2), 253–268. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/saps.2021.45695.2671>
27. Khodadadi, R., & Ghorbani Nasrabadi, R. (2020). Mechanisms of plant growth promoting rhizobacteria on growth indices, physiology, nutrient uptake and production of secondary metabolites in medicinal plants. *Technology of Medicinal and Aromatic Plants of Iran*, 2(2), 52–69. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/mpt.2020.127462.1047>
28. Kuan, K. B., Othman, R., Abdul Rahim, K., & Shamsuddin, Z. H. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilisation of maize under greenhouse conditions. *Plos One*, 11(3), e0152478. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152478>
29. Kudoyarova, G., Arkhipova, T., Korshunova, T., Bakaeva, M., Loginov, O., & Dodd, I. C. (2019). Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1368. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01368>
30. Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K., & Dietz, K. J. (2019). The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. *Antioxidants*, 8(4), 94. <https://doi.org/10.3390/antiox8040094>
31. Lehmann, A., Zheng, W., Ryo, M., Soutschek, K., Roy, J., Rongstock, R., & Rillig, M. C. (2020). Fungal traits important for soil aggregation. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2904. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02904>
32. Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11(5), 591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
33. Ma, Y., Dias, M. C., & Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11, 591911. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591911>
34. Mathur, S., Sharma, M. P., & Jajoo, A. (2018). Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 180, 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.02.002>
35. Naseri, R., Mirzaei, A., & Abbasi, A. (2021). Effect of application of different fertilizer sources on physiological and biochemical traits of new cultivars of barley under dryland conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(2), 121–140. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2021.37177.0>

36. Nasrollahzade Asl, V., Moharramnejad, S., & Yusefi, M. (2017). Grain yield, chlorophyll content, osmolyte accumulation, total phenolics and catalase activity in maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 12(46), 1-14. (In Persian).
37. Nemati, A., Alilou, A., & Sedghi, M. (2021). Evaluation of yield and yield components of some rapeseed cultivars with endophyte *P. indica* and *A. siccitolerans* under drought stress. *Journal of Crop Production*, 13(4), 87-110. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.18408.2364>
38. Omid Nasab, D., Meskarbashee, M., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2024). The effect of deficit irrigation on grain yield and some physiological indicators of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(1), 71-88. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2023.83198.1258>
39. Roger, A., Colard, A., Angelard, C., & Sanders, I. R. (2013). Relatedness among arbuscular mycorrhizal fungi drives plant growth and intraspecific fungal coexistence. *The ISME Journal*, 7(11), 2137-2147. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.112>
40. Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>
41. Ruiz-Lozano, J. M., Aroca, R., Zamarreño, A. M., Molina, S., Andreo-Jiménez, B., Porcel, R., & López-Ráez, J. A. (2016). Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato. *Plant, Cell & Environment*, 39(2), 441-452. <https://doi.org/10.1111/pce.12631>
42. Saha, M., Sarkar, S., Sarkar, B., Sharma, B. K., Bhattacharjee, S., & Tribedi, P. (2016). Microbial siderophores and their potential applications: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(5), 3984-3999. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4294-0>
43. Saini, H. S., & Westgate, M. E. (2000). Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*, 68, 59-96. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60843-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60843-3)
44. Sedaghati, E., Ahmadzadeh, M., Sabri-Rise, R., Rahimi, A., Hatami, N., & Mohammadi Mirik, A. (2021). The effect of application of arbuscular mycorrhizal fungi with some microorganisms and chemical compounds on the antioxidant enzymes activity and phenolic compounds of corn under drought stress. *Journal of Plant Biological Sciences*, 13(2), 53-76. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/ijpb.2022.129942.1258>
45. Singh, S., Tripathi, D. K., Singh, S., Sharma, S., Dubey, N. K., Chauhan, D. K., & Vaculík, M. (2017). Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 177-193. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.005>
46. Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
47. Smith, S. E., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, 62, 227-250. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846>
48. Sofo, A., Scopa, A., Nuzzaci, M., & Vitti, A. (2015). Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(6), 13561-13578. <https://doi.org/10.3390/ijms160613561>
49. Trouvelot, S., Bonneau, L., Redecker, D., Van Tuinen, D., Adrian, M., & Wipf, D. (2015). Arbuscular mycorrhiza symbiosis in viticulture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1449-1467. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0329-7>
50. Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003>
51. Zhang, H., Xie, X., Kim, M. S., Korniyev, D. A., Holaday, S., & Paré, P. W. (2019). Effects of mycorrhizal fungi and PGPR on drought tolerance of wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(2), 558-571.
52. Zhang, L., Feng, G., & Declerck, S. (2018). Signal beyond nutrient, fructose, exuded by an arbuscular mycorrhizal fungus triggers phytate mineralization by a phosphate solubilizing bacterium. *The ISME Journal*, 12(10), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0171-4>



Research Article

Vol. 24, No. 3, Fall 2026, p. 389-402

Evaluation of the Combined Effect of Biochar-Based Organic Fertilizer and Chemical Fertilizer on the Yield of Cumin (*Cuminum cyminum* L)Gh. Amini¹, M. A. Behdani^{1*}, M. Askary², M. H. Sayyari Zahan³, M. Khazaei¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Research on Medicinal and Crop Plants, Iran

3- Department of Agronomy and Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

(*- Corresponding author's Email: mabehdani@birjand.ac.ir)**How to cite this article:**

Received: 07 December 2025

Revised: 24 January 2026

Accepted: 10 February 2026

Available Online: 12 May 2026

Amini, Gh., Behdani, M. A., Askary, M., Sayyari Zahan, M. H., & Khazaei, M. (2026). Evaluation of the combined effect of biochar-based organic fertilizer and chemical fertilizer on the yield of cumin (*Cuminum cyminum* L). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 389-402. (In Persian)<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96886.1437>**Introduction**

Cumin (*Cuminum cyminum* L.) is one of the most important medicinal plant. It has high demand in Asia in the treatment of gastrointestinal problems and is used as condiments. It is also recognized for possessing powerful immunomodulatory properties. *Cuminum cyminum* is an important plant due to export benefits, its cultivation utilizes and revitalizes arid and semi-arid lands, and low water demand. Considering the importance of *Cuminum cyminum* as a medicinal plant, therefore, it is essential to better understand the determining factors on the yield of cumin. Therefore, proper nutritional management through utilizing organic and chemical fertilizers is considered essential in growing *Cuminum cyminum* for exploiting the potential of the environment and achieving maximum yield. Organic inputs can guarantee both agricultural production and nature conservation. The current approach is to find an appropriate substitute of chemical fertilizers by organic compounds that are cost-effective and eco-friendly. This study aimed to improve the yield and biodiversity by selecting the most appropriate way of medicinal plants cultivation that in addition to creating plants with high quantitative and qualitative yield, can increase the profitability through enhanced nitrogen use efficiency. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the effects of biochar, and chemical fertilizers (NPK) on Cumin's growth and yield. This study provided physiological insights into the agronomic benefit mechanism of biochar utilization.

Materials and Methods

In order to investigate the effects of biochar, NPK complete fertilizer, and their combination on the yield and yield components of two local cumin population (*Cuminum cyminum* L), a factorial experiment in a randomized complete block design (RCBD) with three replications at the Agricultural Research Field of the University of Birjand at 32°53' N and longitude of 59° and 13 East and at an altitude of 1480 m a.s.l. Birjand, Iran. The experimental treatments consisted of three levels of chemical fertilizer (20-20-20 NPK at 0, 40, and 80 kg ha⁻¹), two levels of biochar (0 and 10 ton ha⁻¹), and two local cumin cultivars (Khusf and Sarayan). Before preparing the seed bed, for measuring the physical and chemical properties and other required parameters of the soil, sampling was done from 0 to 30 cm depth from the experimental site. The measured traits included the morphophysiological traits, yield and yield components.

Results and Discussion

The results indicated that biochar and NPK fertilizer significantly affected the studied morphological and yield traits, and there was a statistically significant difference between the levels of biochar and NPK fertilizer

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96886.1437>

treatments. Significant differences were also observed between the two cumin cultivars. The Khusf cultivar exhibited superior growth and yield traits compared to the Sarayan cultivar. The highest grain and biological yields were obtained with the Khusf cultivar under the combined application of 10 ton ha⁻¹ of biochar and the application of 40 kg ha⁻¹ of NPK. Furthermore, no significant difference was observed between the 40 and 80 kg ha⁻¹ of NPK fertilizer application rates. Therefore, the application of 40 kg ha⁻¹ of NPK is recommended for optimal yield, reduced input costs, and minimized environmental impact.

Conclusion

The expansion of intensive crop production systems for long terms caused several problems, such as the reduction of biodiversity and the environmental contamination. The increasing concern regarding the negative impacts of these conventional agricultural methods on the ecosystems suggests the exploration of alternative methods endowed with improved efficiency and sustainability as well as high productivity. Application of organic fertilizers may be one appropriate way to reach this goal. The present experiment findings suggest that biochar application, in combination with reduced chemical fertilizer inputs, offers a promising approach for the sustainable production of medicinal plants while minimizing adverse environmental impacts.

Keywords: Biological yield, Cultivars, Grain yield, NPK

ارزیابی اثر تلفیقی کود آلی مبتنی بر بیوجار و کود شیمیایی بر عملکرد زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.)

غلامرضا امینی^۱، محمدعلی بهدانی^{۱*}، مهدیه عسکری^۲، محمدحسن سیاری زهان^۳، مسعود خزاعی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده:

به منظور بررسی اثر بیوجار و کود کامل NPK و تلفیق آن‌ها بر عملکرد و اجزاء عملکرد دو توده محلی زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.)، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند طی سال زراعی ۱۴۰۴ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کود شیمیایی (۲۰-۲۰-۲۰) NPK در سه سطح (صفر، ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار)، بیوجار در دو سطح (صفر و ۱۰ تن در هکتار) و دو توده محلی زیره سبز خوسف و سرایان بودند. نتایج نشان داد که صفات ریخت‌شناسی و عملکردی مورد مطالعه تحت تأثیر بیوجار و کود NPK قرار گرفتند و بین سطوح تیمارهای کودی بیوجار و NPK اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت. همچنین نتایج نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین دو توده مورد مطالعه بود. نتایج نشان‌دهنده برتری توده خوسف نسبت به توده سرایان با دارا بودن بیشترین میزان صفات رشدی و عملکردی بود. بیشترین میزان عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک از توده خوسف، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوجار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که بین سطوح ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. از آنجایی که کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK منجر به افزایش ۲۴ درصدی عملکرد دانه توده خوسف نسبت به شاهد گردید، بنابراین کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK برای حصول عملکرد قابل قبول توصیه می‌گردد که ضمن کاهش هزینه‌های مصرفی (نسبت به کاربرد ۸۰ کیلوگرم در هکتار) از آلودگی زیست‌محیطی نیز جلوگیری می‌گردد. با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوجار ضمن کاهش مصرف کودهای شیمیایی و کم شدن اثرات سوء زیست‌محیطی، روش مناسبی برای تولید سالم و پایدار گیاه دارویی زیره سبز باشد.

واژه‌های کلیدی: ارقام، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، NPK

مقدمه

2017). گسترش سیستم‌های تولید فشرده محصولات کشاورزی برای مدت طولانی باعث ایجاد مشکلات متعددی از جمله کاهش تنوع زیستی و آلودگی محیط زیست شده است. نگرانی فزاینده در مورد تأثیرات منفی این روش‌های کشاورزی مرسوم بر بوم‌نظام‌ها، جست‌وجو برای روش‌های جایگزین با کارایی و پایداری بهبودیافته و همچنین بهره‌وری بالا را امری لازم و ضروری به شمار می‌آورد (Amani Machiani et al., 2017). نظام‌های کشاورزی پایدار مبتنی بر راهبردهای تولید متنوع برای تولید محصولات با کیفیت بالا با حداقل مصرف منابع هستند، درحالی‌که هدف کشاورزی مدرن برای افزایش بهره‌وری در کشت مرسوم اغلب با مفهوم پایداری در تضاد است (Bedoussac et al., 2015). اثرات منفی و مضر کشاورزی مرسوم (به‌عنوان مثال، استفاده بیش از اندازه از نهاده‌های شیمیایی از جمله کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها) بر زیست‌بوم، نیاز

امروزه کشاورزی با چالش‌های جدی مانند کاهش زمین‌های زراعی، کمبود آب، فقر مواد مغذی خاک، تغییرات اقلیمی و استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی مواجه است (Gruda, 2019). بنابراین، سیستم‌های کشاورزی سنتی، اگرچه بازده بالایی تولید می‌کنند، اما این کار را با استفاده از منابع تجدیدناپذیر انجام می‌دهند و به‌طور فزاینده‌ای مورد سؤال قرار می‌گیرند (Duchene et al., 2019).

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- محقق گیاهان دارویی و زراعی، ایران

۳- گروه زراعت و علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(Email: mabehdani@birjand.ac.ir)

*) نویسنده مسئول: <https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96886.1437>

۷۰ درصد از کود نیتروژن از سیستم‌های کشاورزی هدر می‌رود که منجر به مجموعه‌ای از مشکلات بوم‌شناختی و زیست‌محیطی مانند اسیدی شدن خاک، کاهش تنوع زیستی و انتشار گازهای نیتروژنی می‌شود (Carneiro et al., 2021). برای افزایش کارایی مصرف نیتروژن و کاهش تهدیدات سلامت گیاه، رویکردهای کشاورزی پایدار، مانند بهینه‌سازی میزان مصرف کود نیتروژن، افزودن کود نیتروژن با رهایش آهسته و استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی، باید توسعه یابند. کاربرد ترکیبی کود نیتروژن و بیوپچار به دلیل مزایای متمایز آن در افزایش محتوای نیتروژن خاک و افزایش کارایی مصرف نیتروژن، توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است (Carneiro et al., 2021). کاربرد ترکیبی بیوپچار و کود نیتروژن مزایای زیادی از جمله موارد زیر را به همراه دارد: ۱- آزادسازی ماده مغذی نیتروژن؛ که منجر به آزادسازی تدریجی نیتروژن برای جذب و استفاده گیاه می‌شود (Liu et al., 2021; Jeffery et al., 2017)؛ ۲- افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی بالای بیوپچار (Farahani et al., 2020)؛ ۳- افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک (Farahani et al., 2020)؛ ۴- بهبود رطوبت خاک در لایه سطحی خاک، که به جلوگیری از تبخیر نیتروژن کمک می‌کند (Borchard et al., 2019)؛ و ۵- بهبود رشد میکروبی‌های خاک و معدنی شدن نیتروژن (Phares et al., 2022). به‌طور کلی، حاصلخیزی خاک برای دستیابی به تولید بالا و سودآوری گیاهان دارویی در واحد سطح ضروری است. عملکرد گیاهان دارویی به شدت تحت تأثیر کودهای آلی و شیمیایی قرار دارد. کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای نیتروژنه، با افزایش تعداد شاخه‌های جانبی و گل در هر بوته، عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارویی را بهبود می‌بخشند (Askary et al., 2024). فسفر مشابه نیتروژن از جمله عناصر اصلی و ضروری برای رشد و نمو گیاه می‌باشد و کاربرد آن برای دستیابی به تولید مطلوب بسیار مهم است (Mosapour & Feizian, 2024). این عنصر تشکیل‌دهنده مولکول‌های حیاتی DNA، RNA و ATP است و همچنین در فتوسنتز، تنفس و توسعه رشد نقش بسزایی دارد (Mosapour & Feizian, 2024). فسفر در اثر واکنش‌های پیچیده در خاک (به دلیل بالا و یا پایین بودن pH خاک و رقابت در جذب فسفر) به صورت غیرقابل استفاده تبدیل می‌شود. کودهای آلی به صورت مستقیم و غیرمستقیم، تأثیر قابل توجهی بر فسفر قابل استفاده دارند. به همین دلیل، مدیریت فسفر (به دلیل فرآیندهای جذب و تثبیت فسفر به شکل‌های غیرقابل دسترس) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و شناسایی منابع شیمیایی و آلی جایگزین فسفر الزامی می‌باشد (Lashari et al., 2014). بیوپچار می‌تواند به عنوان مخزنی برای فسفر عمل کرده و نسبت خاصی از فسفر که برای گیاه مناسب است را فراهم نماید (Dari et al., 2016). تان و همکاران (Tan et al., 2018) بیان کردند که تبدیل بقایای گیاهی به بیوپچار سبب تبدیل ترکیبات پیچیده پتاسیم به شکل‌های ساده‌تر می‌شود که

به نظام‌های جدید سازگار با محیط زیست با بهره‌وری بالاتر، کارایی بهبودیافته و پایداری را نشان می‌دهد. استفاده از کودهای آلی می‌تواند یکی از راه‌های مناسب برای رسیدن به این هدف باشد (Amani Machiani et al., 2021). در بین این روش‌ها، استفاده از بیوپچار به عنوان یک راهبردی بالقوه برای افزایش رشد، تاب‌آوری و تولید متابولیت‌های ثانویه گیاهان دارویی پدیدار شده است (Mafakheri & Asghari, 2025). مطالعات علمی نشان داده‌اند که بیوپچار نقش مهمی در دستیابی به پایداری زیست‌محیطی کشاورزی دارد (Ayaz et al., 2021; Kumar & Bhattacharya, 2021). بیوپچار، یک محصول جانبی غنی از کربن حاصل از پیرولیز است که از تجزیه حرارتی مواد آلی مانند بقایای محصولات کشاورزی، تراشه‌های چوب یا کود در شرایط محدود اکسیژن حاصل می‌شود (Lu et al., 2020; Li et al., 2023; Sayed et al., 2024). براساس آیین‌نامه اروپایی که از سال ۲۰۲۰ لازم‌الاجرا شده است، بیوپچار به عنوان ماده‌ای مطابق با اهداف، معیارها و اصول تولید ارگانیک در کشاورزی اتحادیه اروپا شناخته شده و در فهرست کودها/اصلاح‌کننده‌های خاک که می‌توانند در کشاورزی ارگانیک مورد استفاده قرار گیرند، پذیرفته شده است (European Commission, 2020). نشان داده شده است که استفاده از بیوپچار در خاک، ساختار خاک را بهبود می‌بخشد، و همچنین جذب آب و دسترسی به مواد مغذی را افزایش می‌دهد (Rivelli & Libutti, 2022). در واقع، بیوپچار به عنوان یک اصلاح‌کننده مفید خاک برای کاهش تغییرات اقلیمی از طریق ترسیب کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پیشنهاد می‌شود (Rivelli & Libutti, 2022). این اثرات قابل توجه بر خواص خاک می‌تواند تأثیر مستقیمی بر شاخص‌های رشد گیاه از جمله ارتفاع گیاه، تجمع زیست‌توده و تعداد شاخه‌ها در هر گیاه داشته باشد که برای به حداکثر رساندن عملکرد در گیاهان دارویی بسیار مهم هستند (Akhtar et al., 2021). برای افزایش تأثیر بیوپچار بر رشد گیاه و خواص خاک، باید آن را در ترکیب با منبعی از مواد مغذی گیاهی، مانند کودهای معدنی یا آلی، یا ترکیبی از هر دوی آن‌ها استفاده کرد (Bai et al., 2022; Hannet et al., 2021). ریولی و لیبوتی (Rivelli & Libutti, 2022)، بهبود قابل توجهی در حاصلخیزی خاک و عملکرد محصول هنگام استفاده هم‌زمان از بیوپچار و کود معدنی گزارش کردند. ژو و همکاران (Zhu et al., 2015)، افزایش ۷۵ درصدی زیست‌توده ذرت (*Zea mays* L.) را هنگام ترکیب بیوپچار و کود NPK گزارش کردند. گاثورن-هاردی و همکاران (Gathorne-Hardy et al., 2009) پس از ترکیب بیوپچار و کود نیتروژن، افزایش بیش از ۳۰ درصدی عملکرد جو (*Hordeum vulgare*) را مشاهده کردند.

نیتروژن به دلیل نقش منحصربه‌فرد در فرآیندهای ژنتیکی و متابولیکی گیاه، یکی از ضروری‌ترین مواد مغذی برای رشد گیاه و بهره‌وری محصول محسوب می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که ۵۰ تا

و بادام در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد تهیه شده بود؛ کود شیمیایی NPK (۲۰+۲۰+۲۰) (در سه سطح عدم کاربرد، ۴۰ و ۸۰ کیلو گرم در هکتار NPK) و توده‌های محلی زیره سبز (توده خوسف و توده سرایان که به لحاظ ظاهری و دوره رشدی هیچ تفاوتی بین آنها وجود ندارد) بودند. هر بلوک دارای ۱۲ کرت و جوی آب مجزا جهت آبیاری به روش سیفونی (به دلیل استفاده از تیمار کودها) بود، فاصله بین کرت‌ها دو متر و فاصله بین بلوک‌ها سه متر در نظر گرفته شد. هر کرت شامل پنج ردیف با فاصله ردیف ۵۰ سانتی متر به طول پنج متر و عرض ۲/۵ متر بود. قبل از تهیه بستر کاشت، نمونه برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی متری خاک محل آزمایش برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه خاک‌شناسی منتقل شده و میزان شاخص‌های مورد نیاز اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). پس از انجام کرت‌بندی، عملیات کوددهی و کاشت بذر به صورت دستی انجام شد. به طوری که در محل کاشت بذر روی پشته‌ها شیار به عمق پنج سانتی متر ایجاد شده و کود مورد نیاز به مقدار مشخص شده داخل شیارها ریخته و روی آن با لایه‌ای به قطر دو تا سه سانتی متر از خاک پوشیده و سپس عملیات کاشت بذر به صورت دستی انجام شد. تراکم زیره سبز ۱۲۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد (Azizi et al., 2008). اولین آبیاری پس از کاشت به روش سیفونی انجام گردید. وجین علف‌های هرز به صورت دستی در دو مرحله (۲۰ فروردین و اول اردیبهشت) انجام شد. عملیات واکاروی هم‌زمان با اولین وجین علف‌های هرز انجام گردید. قبل از تهیه بستر کاشت، نمونه برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی متری خاک محل آزمایش برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه خاک‌شناسی منتقل شده و میزان شاخص‌های مورد نیاز اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). همچنین نتایج آنالیز بیوجار پسته استفاده شده، در جدول ۲ ارائه شده است.

صفات مورد مطالعه شامل ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد چتر در بوته، تعداد دانه در چتر، وزن دانه در بوته، وزن خشک بوته، وزن هزاردانه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه بودند. صفات مورد مطالعه در مرحله رسیدگی کامل انجام شد و برای این منظور پس از حذف اثر حاشیه‌ای، دو مترمربع از هر کرت انتخاب و برداشت شدند. بوته‌ها در پاکت‌های مجزا بسته‌بندی و به آزمایشگاه منتقل گردید. پس از اندازه‌گیری صفات ریخت‌شناختی، نمونه‌های متعلق به تیمارهای مختلف در پاکت‌های مجزا در آون به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شده و سپس صفات عملکردی اندازه‌گیری شدند. در پایان، صفات اندازه‌گیری شده بر مبنای آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند و برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم شکل‌ها از نرم‌افزارهای SAS (V9.1) و Excel استفاده گردید. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون FLSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

به راحتی قابل جذب گیاه می‌باشند. بنابراین مدیریت تغذیه گیاهان دارویی با استفاده از کودهای آلی می‌تواند آن‌ها را در برابر شرایط تنش‌زا مقاوم‌تر کرده و پایداری تولید آن‌ها را افزایش دهد (Askary et al., 2018). بنابراین، شناخت عوامل مؤثر بر کیفیت و کمیت اجزای فعال زیستی گیاهان دارویی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا کیفیت دارویی این گیاهان به مدیریت صحیح چرخه مواد مغذی و استفاده صحیح از منابع آلی و زیستی بستگی دارد.

زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) از نظر اقتصادی یک محصول دارویی مهم محسوب می‌شود. این گیاه در آسیا برای درمان مشکلات گوارشی تقاضای زیادی دارد و به عنوان چاشنی استفاده می‌شود (Alqethami & Aldhebiani, 2021). همچنین به دلیل داشتن خواص ویژه، به عنوان تعدیل‌کننده سیستم ایمنی شناخته شده است (Pelvan et al., 2022). زیره سبز به دلیل مزایای صادراتی، استفاده و احیای زمین‌های خشک و نیمه‌خشک و نیاز کم به آب، گیاهی مهم است (Alqethami & Aldhebiani, 2021). این گیاه به طور گسترده در فرمولاسیون داروهای گیاهی و طب سنتی استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت زیره سبز به عنوان یک گیاه دارویی، کشت صحیح و بهینه آن از طریق مدیریت‌های مختلف کشاورزی باید جایگزین کشت فعلی آن شود. بنابراین، مدیریت صحیح تغذیه‌ای از طریق استفاده از کودهای آلی و شیمیایی در کشت زیره سبز برای بهره‌برداری از پتانسیل محیط و دستیابی به حداکثر عملکرد ضروری است. نهاده‌های ارگانیک می‌توانند هم تولید محصولات کشاورزی و هم حفاظت از طبیعت را تضمین کنند. رویکرد فعلی، یافتن جایگزین مناسب کودهای شیمیایی با ترکیبات آلی است که مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست باشند. بنابراین، هدف از این مطالعه، ارزیابی اثرات بیوجار و کودهای شیمیایی (NPK) بر رشد و عملکرد زیره سبز است. این مطالعه، بینش فیزیولوژیکی در مورد سازوکار سودمندی زراعی استفاده از بیوجار را ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش طی سال زراعی ۱۴۰۴ به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه، ۵۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا انجام شد. منطقه مورد آزمایش با میانگین درجه حرارت بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در ۱۴۲ روز از سال (در نیمی از فصل بهار و فصل تابستان) و میانگین بارندگی سالیانه ۱۷۰ میلی‌متر، به لحاظ آب‌وهوایی جزء مناطق گرم و خشک محسوب می‌شود. عامل‌های آزمایش شامل دو سطح بیوجار (عدم مصرف و ۱۰ تن در هکتار. بیوجار مورد استفاده از شاخه‌ها و ضایعات درختان پسته

نتایج

ارتفاع بوته

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر اصلی بیوپچار بر ارتفاع بوته می‌باشد و بقیه اثرات اصلی، اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه معنی‌دار نشد (جدول ۳). بین سطوح تیمار بیوپچار به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود داشت و کاربرد بیوپچار باعث افزایش ارتفاع بوته زیره سبز گردید، به طوری که ارتفاع بوته در شاهد (عدم کاربرد بیوپچار) نسبت به تیمار کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوپچار ۶/۵ درصد کاهش یافت (شکل ۱).

تعداد شاخه فرعی در بوته

نتایج آنالیز واریانس داده‌های حاصل از آزمایش داده‌ها

جدول ۱- تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک

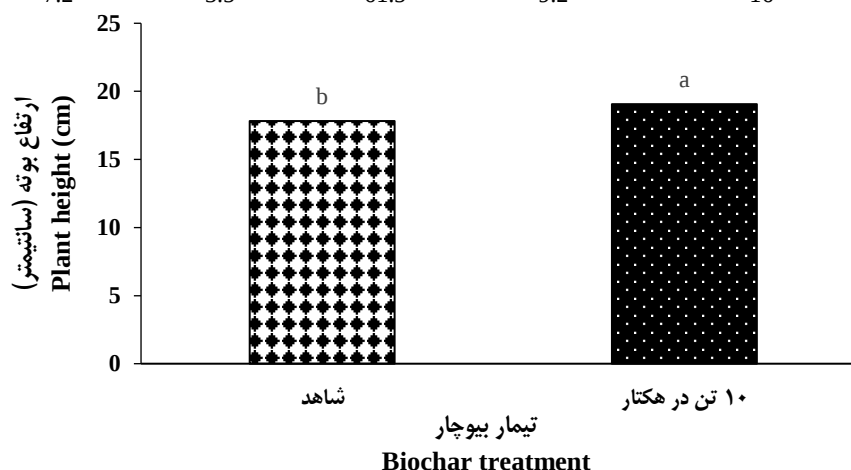
Table 1- Physical and chemical analysis of field soil at a depth of 0-30 cm

عمق Depth (cm)	رس Clay (%)	سیلت Loam (%)	شن Sand (%)	بافت Texture	چگالی ظاهری Db (g cm ⁻³)	فسفر P (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Exchangeable K (meq L ⁻¹)	نیتروژن N (%)	درصد اشباع SP (%)	ظرفیت زراعی FC	ماده آلی Organic matter	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	اسیدیته pH
0-30	12	38	50	لومی Loam	1.2	12	250	0.03	32	17	0.29	5.2	8.16

جدول ۲- نتایج آنالیز بیوپچار پسته

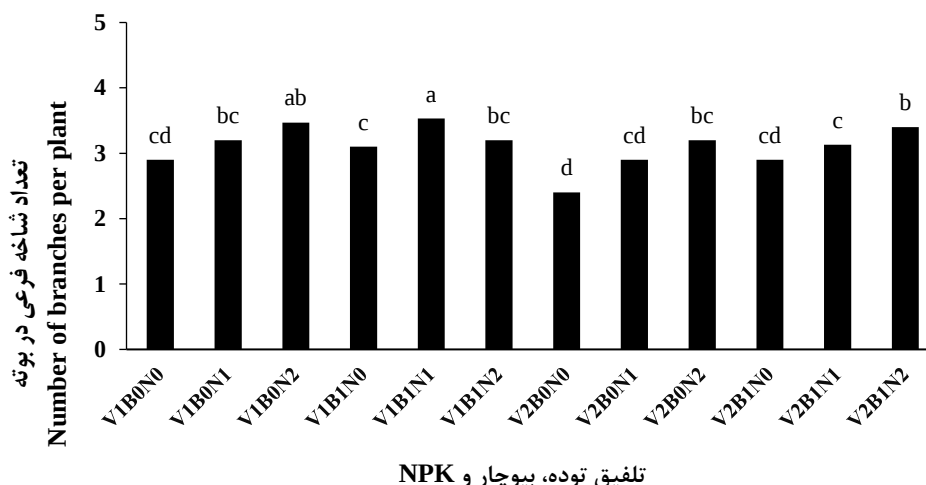
Table 2- Pistachio biochar analysis

درصد اشباع Sp (%)	اسیدیته خاک pH	هدایت الکتریکی Ec (dS m ⁻¹)	پتاسیم K (meq lit ⁻¹)	کربن آلی Organic C (%)	ماده آلی Organic matter (%)	فسفر P (mg kg ⁻¹)
100	7.2	3.5	61.5	9.2	16	49.4



شکل ۱- اثر اصلی تیمار بیوپچار بر ارتفاع بوته (سانتی‌متر)

Figure 1- Main effect of biochar treatment on plant height (cm)



تلفیق توده، بیوچار و NPK

The interaction of variety, biochar, NPK

شکل ۲- اثر متقابل توده، بیوچار و NPK بر تعداد شاخه فرعی در بوته

Figure 2- Interaction effect of variety, biochar, and NPK on number of branches per plant

تعداد چتر در بوته

در بین تیمارهای مورد مطالعه، اثرات اصلی توده، بیوچار و NPK بر تعداد چتر در بوته معنی‌دار گردید ولی اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی توده نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار بین توده‌های مورد مطالعه بود، به طوری که توده خوسف تعداد چتر در بوته بیشتری نسبت به توده سرایان داشت (شکل ۳ الف). همچنین نتایج بیانگر تفاوت معنی‌دار بین سطوح بیوچار بود و کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار منجر به افزایش تعداد چتر در بوته گردید (شکل ۳ ب). نتایج نیز نشان داد که کاربرد کود شیمیایی NPK منجر به افزایش تعداد چتر در بوته نسبت به شرایط شاهد گردید، هرچند بین تیمارهای ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۳ ج).

تعداد دانه در چتر

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر اصلی بیوچار در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد دانه در چتر می‌باشد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK نشان داد که در هر دو توده مورد آزمایش بین سطوح کودی بیوچار و NPK اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت. اگرچه بیشترین تعداد دانه در چتر از تیمار V1B1N1 (توده خوسف، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK) به دست آمد، ولی به لحاظ آماری با تیمارهای V1B1N2 (توده خوسف، ۱۰ تن در هکتار بیوچار و ۸۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن) و

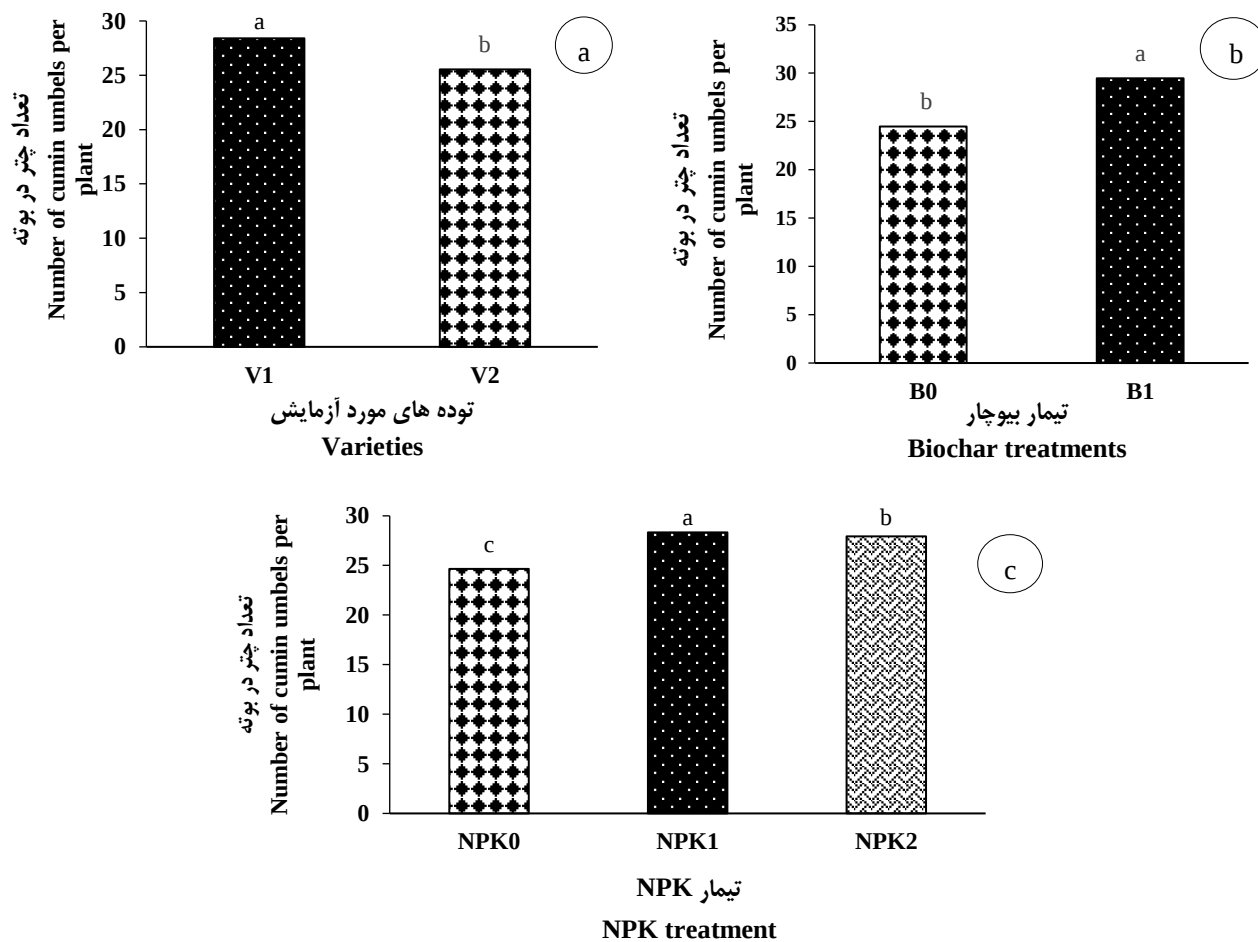
V2B1N1 (توده سرایان، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار، و ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۴). کمترین تعداد دانه در چتر متعلق به تیمار V2B0N0 (توده سرایان، عدم کاربرد بیوچار و NPK) بود (شکل ۴).

وزن خشک بوته در هکتار (عملکرد بیولوژیک)

نتایج آنالیز واریانس نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر اصلی بیوچار و اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK بر وزن خشک بوته در هکتار (عملکرد بیولوژیک) در سطح احتمال یک درصد بود، ولی بقیه اثرات اصلی و دوگانه بر این صفت معنی‌دار نگردید (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK نشان داد که بیشترین وزن خشک بوته از تیمار V1B1N2 (توده خوسف کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK) به دست آمد و کمترین وزن خشک بوته نیز متعلق به تیمار V2B0N0 (توده سرایان، عدم کاربرد بیوچار و عدم کاربرد کامل NPK) بود که با تیمار V2B0N1 (توده سرایان، عدم کاربرد بیوچار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK) اختلاف آماری معنی‌داری نداشت (شکل ۵).

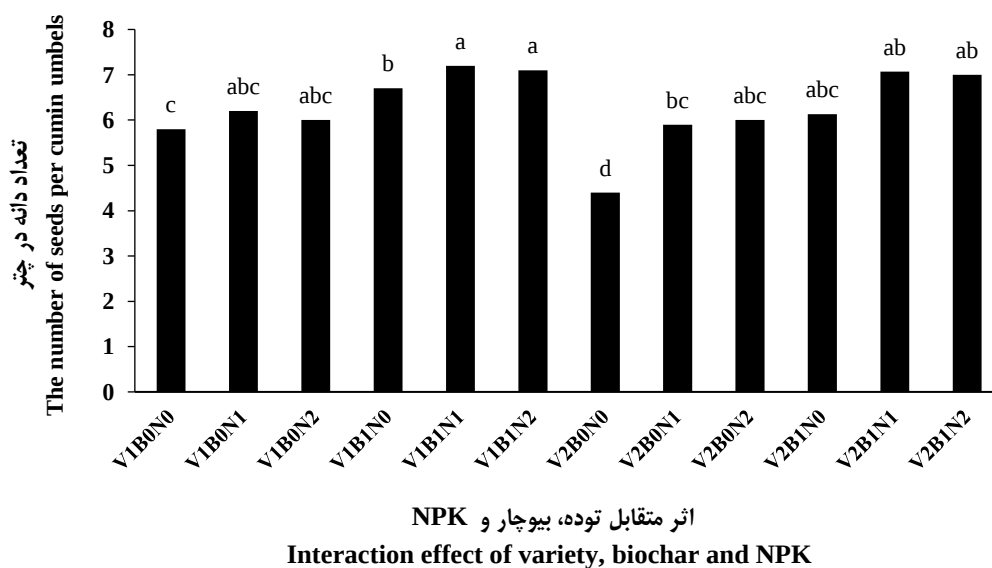
وزن هزاردانه

نتایج نشان داد که وزن هزاردانه فقط تحت تأثیر اثر معنی‌دار NPK قرار گرفت و بقیه اثرات اصلی، اثرات متقابل دوگانه و اثر متقابل سه‌گانه بر وزن هزاردانه معنی‌دار نگردید (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین و کمترین وزن هزاردانه به ترتیب از تیمارهای ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK و شرایط شاهد (عدم کاربرد NPK) به دست آمد (شکل ۶).



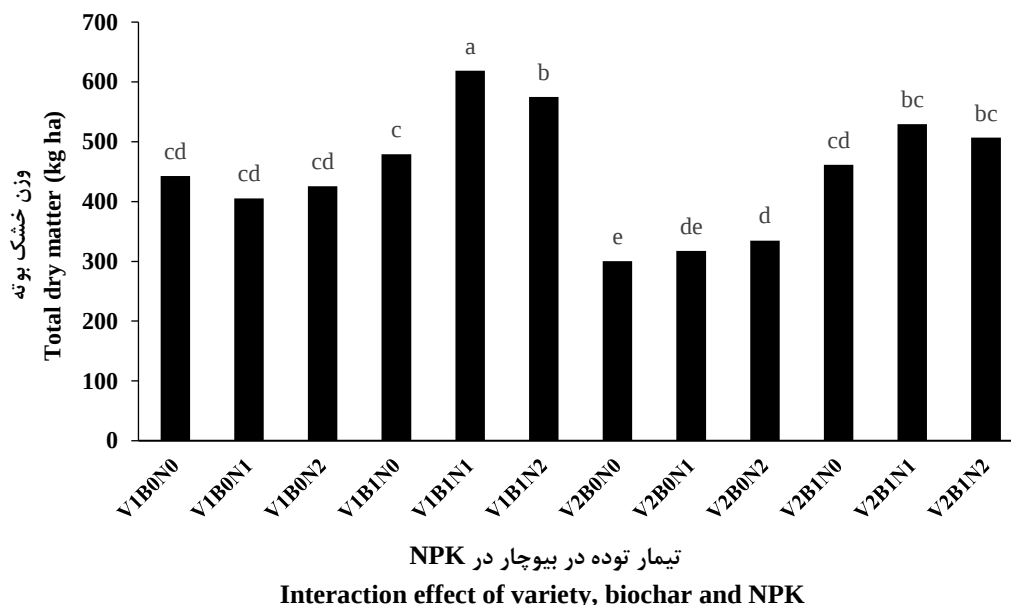
شکل ۳- اثرات اصلی توده (الف)؛ بیوچار (ب) و NPK (ج) بر تعداد چتر در بوته

Figure 3- Main effects of variety (a); biochar (b) and NPK (c) on the number of cumin umbels per plant

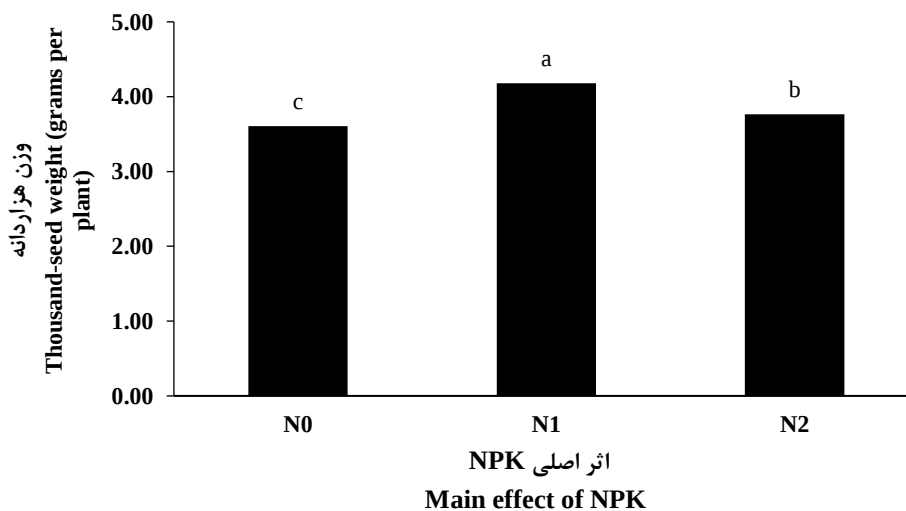


شکل ۴- اثر متقابل توده، بیوچار و NPK بر تعداد دانه در چتر

Figure 4- Interaction effect of variety, biochar and NPK on the number of seeds per cumin umbels



شکل ۵- اثر متقابل توده، بیوچار و NPK بر وزن خشک کل بوته (کیلوگرم در هکتار)
Figure 5- Interaction effect of variety, biochar and NPK on total dry matter (kg ha)

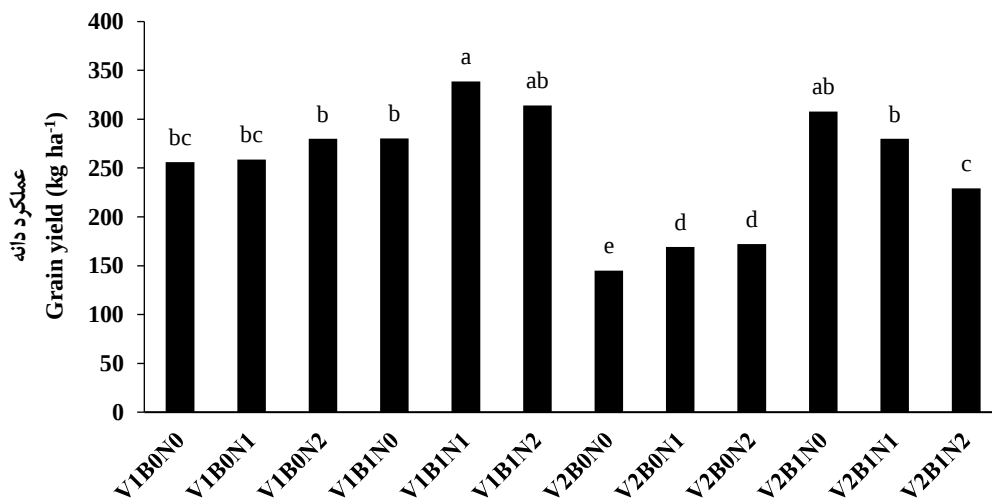


شکل ۶- اثر اصلی NPK بر وزن هزاردانه (گرم در بوته)
Figure 6- Main effect of NPK on thousand-seed weight (grams per plant)

عملکرد دانه در هکتار

در بین تیمارهای مورد مطالعه، اثر اصلی بیوچار در سطح احتمال یک درصد، اثر متقابل دوگانه توده و NPK و اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK به‌ترتیب در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد بر عملکرد دانه در هکتار معنی‌دار گردید (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه توده، بیوچار و NPK نشان داد که در هر دو توده مورد بررسی، بین سطوح بیوچار و NPK اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت (شکل ۷). بیشترین عملکرد دانه در هکتار از تیمار V1B1N1 (توده خوسف، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در

هکتار کود کامل NPK) به دست آمد که به‌لحاظ آماری با تیمارهای V1B1N2 (توده خوسف کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK) و V2B1N1 (توده سرایان، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار کود کامل NPK) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۷). همچنین کمترین عملکرد دانه در هکتار متعلق به تیمار V2B0N0 (توده سرایان، عدم کاربرد بیوچار و عدم کاربرد کامل NPK) بود که با تیمار V2B1N0 (توده سرایان، کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار و عدم کاربرد کود کامل NPK) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۷).



تیمار توده در بیوچار در NPK

Interaction effect of variety, biochar and NPK

شکل ۷- اثر متقابل توده، بیوچار و NPK بر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)

Figure 7- Interaction effect of variety, biochar and NPK on grain yield (kg ha⁻¹)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار و NPK بر عملکرد دو توده محلی زیره سبز

Table 3- Results of analysis of variance of the effect of biochar and NPK on the yield of two studied cumin varieties.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد شاخه فرعی Number of branch	تعداد چتر در بوته Number of umbels per plant	تعداد دانه در چتر Number of seeds per umbels	وزن خشک بوته (عملکرد بیولوژیک) Plant dry weight (biological yield) (kg ha ⁻¹)	وزنه هزار دانه Weight of 1000-grains (g)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)
تکرار Replication	2	21.82**	2.71**	639.2**	13.48**	102473**	3.82**	31434**
توده‌های زیره Cumin varieties (V)	1	0.0044ns	0.0044ns	73.38*	0.26ns	14641ns	0.016ns	6084ns
بیوچار Biochar (B)	1	13.69**	0.75**	224**	11.67**	114469**	0.082ns	37636**
NPK	2	0.65ns	0.18*	94.01*	1.62ns	6520ns	1.05**	1401ns
توده در بیوچار V × B	1	1.13ns	0.53**	3.36ns	0.09ns	7685ns	0.016ns	1877ns
توده × NPK V × NPK	2	0.22ns	0.087ns	17.74ns	0.026ns	25608ns	0.1ns	8281*
بیوچار × NPK B × NPK	2	1.84ns	0.32**	9.36ns	0.63ns	1375ns	0.18ns	465ns
توده × بیوچار × NPK V × B × NPK	2	1.19ns	0.27**	19.48ns	1.75*	56523**	0.075ns	23411**
خطا	22	0.64	0.05	12.58	0.5	9077	0.1	2356.23
ضریب تغییرات C.V (%)		4.3	6.8	13.1	11.2	21.1	8.2	20.3

***: معنی‌داری در سطح یک درصد؛ *: معنی‌داری در سطح پنج درصد و ns: عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

***: Significance at the 1% level; *: Significance at the 5% level and ns: indicate non-significance.

بحث

بیوجار از جمله مهم‌ترین کودهای آلی مؤثر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به شمار می‌رود. این مواد از جرم مخصوص ظاهری پایین و ساختار متخلخل برخوردار بوده (Guo et al., 2014; Mukherjee et al., 2016) و با توجه به اثرات مثبت متعدد بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، به ثبات و افزایش تولید و کیفیت محصول کمک می‌کند. این ماده به‌عنوان ابزاری جهت بهبود باروری خاک، کارکردهای بوم‌نظام و ترسیب کربن جهت کاهش تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود (Saah et al., 2022). کاربرد این مواد به‌تنهایی یا به‌صورت مخلوط با هم سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش تولید در محصولات مختلف شده است (Mukherjee et al., 2014; Agegnehu et al., 2016). بیوجار با وجود خصوصیات مثبت ذکر شده به‌خصوص از نظر اثرات مثبت بر خصوصیات فیزیکی خاک، از محتوای عنصری پایین برخوردار بوده و در نتیجه کاربرد آن به‌تنهایی از پتانسیل اندکی برای بهبود رشد و تغذیه گیاه برخوردار است (Fischer & Glaser, 2012). تلفیق بیوجار و کودهای شیمیایی به‌ویژه NPK اثر هم‌افزایی داشته و منجر به تأثیرات مثبت بیشتری نسبت به تیمارهای جداگانه آن‌ها شده است. در واقع، تیمار تلفیقی در قیاس با تیمارهای جداگانه آن‌ها توانسته میزان کافی نیتروژن مورد نیاز گیاه را فراهم کند و به‌دنبال آن خصوصیات رشدی و عملکردی گیاه افزایش یافته است (Peng et al., 2015; Rezaei Chiyaneh et al., 2021). در مطالعه چندساله خود نشان دادند که استفاده از بیوجار موجب کاهش تلفات نیتروژن، بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش کربن آلی خاک، تثبیت نیتروژن و افزایش جذب نیتروژن توسط ذرت شده است و بنابراین ماده مؤثری برای بهبود بوم‌نظام کشاورزی است. همچنین فلوی و همکاران (Faloye et al., 2020) گزارش کردند که کاربرد ترکیبی بیوجار و کود نیتروژن باعث بهبود مواد مغذی خاک، افزایش جذب مواد غذایی و کاهش آب‌شویی مواد معدنی در همه تیمارها شده است. به‌دلیل دوام بسیار بالای بیوجار در خاک (برای قرن‌های متمادی)، این کود قابلیت بالایی برای بهبود تولیدات کشاورزی دارد. توانایی بالای این ماده آلی در جذب و نگهداری عناصر غذایی و کودهای شیمیایی نظیر نیتروژن و فسفر و جلوگیری از آب‌شویی آن‌ها، باعث افزایش رشد گیاهان می‌شود (Lu et al., 2020). چادری و همکاران (Chaudhry et al., 2016) در مطالعات خود به تأثیر بیشتر تیمارهای حاوی تلفیق کود شیمیایی و بیوجار نسبت به تیمارهای مجزای آن‌ها اشاره کردند و دلیل این امر را جلوگیری از آب‌شویی عناصر غذایی در تیمارهای حاوی بیوجار عنوان کرد. در همین رابطه گزارش شده است که تلفیق تیمارهای کودهای آلی با کودهای شیمیایی منجر به حداکثر فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی در

ریحان (Ocimum basilicum L.) (Pandey et al., 2016)، گیاهان جعفری معطر (Tagetes minuta L.) (Pandey et al., 2015) و شمعدانی معطر (Pelargonium graveolens) (Pandey & Patra., 2015) شده است.

در مطالعه حاضر نیز بیشترین میزان عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در هر دو توده مورد مطالعه از تلفیق کودهای بیوجار و NPK به دست آمد. نتایج نشان‌دهنده آن است که استفاده از تلفیق کود بیوجار و نیتروژن باعث شده نیتروژن به‌صورت بهینه در اختیار گیاه قرار گیرد و کارایی استفاده از نیتروژن بیشتر شود. همچنین نتایج نشان‌دهنده برتری کاربرد بیوجار نسبت به عدم کاربرد آن بود و کاربرد بیوجار موجب بهبود صفات رشدی و عملکردی زیره سبز شد که می‌تواند به‌دلیل فراهمی بهینه عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم باشد. به‌طور کلی نیتروژن پرمصرف‌ترین عنصر غذایی در تغذیه گیاهان محسوب می‌شود و اثر مستقیم بر عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارد (Eskandari et al., 2021). کشاورزان معمولاً برای تأمین کمبود این عنصر، از کودهای شیمیایی حاوی این عنصر استفاده می‌کنند تا نیاز گیاه به این عنصر را جبران کنند (Nikbakht et al., 2020). مصرف بیش از حد نیتروژن باعث اسیدی شدن خاک، کاهش فعالیت میکروبی خاک، طولانی‌تر شدن دوره رشد گیاه، افزایش هزینه‌های تولید و مسائل زیست‌محیطی مانند آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌گردد (Eskandari et al., 2021). بنابراین مصرف بهینه نیتروژن و راه‌های افزایش بهره‌وری این عنصر برای گیاهان از اولویت‌های تحقیقاتی بخش کشاورزی می‌باشد (Nikbakht et al., 2020).

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقی در مورد گیاهان دارویی، بررسی شرایط مختلف محیطی تأثیرگذار بر میزان عملکرد کمی و کیفی آن‌ها است. شاید بتوان بیان کرد که یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های تولیدکنندگان گیاهان دارویی علاوه بر میزان کمی محصول، تولید گیاهی با کیفیت بالا است. از آنجاکه هدف نهایی از کشت آن‌ها، استفاده از مواد مؤثره موجود در آن‌ها است و مسلماً هرچه مقدار این مواد مؤثره و متابولیت‌های ثانویه در واحد وزن گیاه بیشتر باشد از نظر اقتصادی نفع بیشتری حاصل خواهد شد. بنابراین بررسی و به‌دست آوردن بهترین شرایط محیط کشت که بتواند منجر به تولید گیاهی با بیشترین عملکرد کمی و کیفی گردد از جمله مهم‌ترین اهداف تحقیقات مربوط به کشت گیاهان دارویی می‌باشد. در مطالعه حاضر، بیشترین عملکرد کمی و عملکرد دانه از توده خوسف با کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوجار و کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK به دست آمد. اصلاح خواص فیزیکی خاک و قابلیت

توصیه می‌گردد که ضمن کاهش هزینه‌های مصرفی، از آلودگی زیست‌محیطی (آلودگی خاک و آب) نیز جلوگیری می‌گردد. با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوپچار ضمن کاهش مصرف کودهای شیمیایی، می‌تواند روش مناسبی برای تولید سالم و پایدار گیاهان دارویی باشد.

دسترسی گیاه زیره سبز به عناصر غذایی بیشتر می‌تواند دلیل عمده افزایش عملکرد تحت شرایط کاربرد کود بیوپچار باشد. به همین دلیل مصرف کود بیوپچار در مدیریت منابع غذایی جهت حصول عملکرد کمی قابل قبول توصیه می‌شود. از آنجایی که بین کاربرد ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار NPK تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نگردید، کاربرد ۴۰ کیلوگرم در هکتار NPK برای حصول عملکرد قابل قبول

References

1. Akhtar, S. S., Andersen, M. N., & Liu, F. (2021). Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 219, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.016>
2. Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543, 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>
3. Alqethami, A., & Aldhebiani, A. Y. (2021). Medicinal plants used in Jeddah, Saudi Arabia: Phytochemical screening. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 805-812. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.013>
4. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedlood, M. R., & Maggi, F. (2017). Evaluation of yield, essential oil content and compositions of peppermint (*Mentha piperita* L.) intercropped with faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Cleaner Production*, 171, 529-537. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.062>
5. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M. R., Aghaee, A., & Maggi, F. (2021). Funnelformis mosseae inoculation under water deficit stress improves the yield and phytochemical characteristics of thyme in intercropping with soybean. *Scientific Reports*, 11, 15279. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94681-9>
6. Askary, M., Behdani, M. A., Parsa, S., Mahmoodi, S., & Jamialahmadi, M. (2018). Water stress and manure application affect the quantity and quality of essential oil of *Thymus daenensis* and *Thymus vulgaris*. *Industrial Crops & Products*, 111, 336-344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.056>
7. Askary, M., Behdani, M. A., Mollaei, H., Fallahi, H. R., Azarmi-Atajan, F., & Mokhtari Macinaei, H. (2024). Bioactive compounds and apoptotic effects of saffron (*Crocus sativus* L.) in different fertilizer conditions. *Biochemical Systematics and Ecology*, 114, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2024.104806>
8. Ayaz, M., Feiziene, D., Tilvikiene, V., Akhtar, K., Stulpinaite, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. *Sustainability*, 13, 1330. <https://doi.org/10.3390/su13031330>
9. Azizi, K., Amini, M., Sabouri, B., & Shabani, G. (2008). Effect of different levels of nitrogen fertilizer and plant density on quantitative and qualitative cumin function in Lorestan. In 10th Congress of Agronomy and Plant Breeding, Tehran, Iran. (In Persian).
10. Bai, S. H., Omidvar, N., Gallart, M., Kämper, W., Tahmasbian, I., Farrar, M. B., Singh, K., Zhou, G., Muqadass, B., Xu, C. Y., Koech, R., Li, Y., Nguyen, T. T. N., & Zwieten, L. V. (2022). Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 808, 152073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152073>
11. Bedoussac, L., Journet, E. P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., Prieur, L., & Justes, E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 911-935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>
12. Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M., Kammann, C., Wrage-Monnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizábal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J. A., & Novak, J. (2019). Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 651, 2354-2364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>
13. Carneiro, J. S. S., Ribeiro, I. C. A., Nardis, B. O., Barbosa, C. F., Filho, J. F. L., & Melo, L. C. A. (2021). Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. *Science of the Total Environment*, 760, 143955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143955>
14. Chaudhry, U. K., Shahzad, S., Naqqash, M. N., Saboor, A., Yaqoob, S., Abbas, M. S., & Saeed, F. (2016). Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 9(1), 348-358. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1631>
15. Dari, B., Nair, V. D., Harris, W. G., Nair, P. K. R., Sollenberger, L., & Mylavarapu, R. (2016). Relative influence of soil- vs. biochar properties on soil phosphorus retention. *Geoderma*, 280, 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.018>
16. Duchene, O., Vian, J. F., & Celette, F. (2017). Intercropping with legume for agroecological cropping systems:

- complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.019>
17. Eskandari, Z., Taab, A., Eshghizadeh, H. R., & Khorvash, M. (2021). Growth characteristics and yield evaluation of dual-purpose corn hybrids in two levels of urea fertigation. *Journal of Crop Production and Processing*, 11(3), 111-124. (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jcpp.11.3.36172>
18. European Commission. (2020). Farm to Fork Strategy. for a Fair, Healthy and Environmentally-Friendly Food System; European Commission: Brussels, Belgium. pp. 1–23.
19. Faloye, O. T., Ajayi, A. E., Alatise, M. O., Ewulo, B. S., & Horn, R. (2020). Nutrient uptake, maximum yield production, and economic return of maize under deficit irrigation with biochar and inorganic fertiliser amendments. *Biochar Journal*, 1, 375–388. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00032-3>
20. Farahani, S. S., Asoodar, M. A., & Moghadam, B. K. (2020). Short-term impacts of biochar, tillage practices, and irrigation systems on nitrate and phosphorus concentrations in subsurface drainage water. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 761–771. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-06942-W>
21. Fischer, D., & Glaser, B. (2012). Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. In Management of organic waste. In Tech, Rijeka and Shanghai, p. 167-198. <https://doi.org/10.5772/31200>
22. Gathorne-Hardy, A., Knight, J., & Woods, J. (2009). Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertilizer to improve barley yields in the UK. In IOP Conference Series. Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, 6, p. 372052.
23. Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(6), 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
24. Guo, L., Wu, G., Li, Y., Li, C., Liu, W., Meng, J., Liu, H., Yu, X., & Jiang, G. (2016). Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in eastern China. *Soil and Tillage Research*, 156, 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.010>
25. Hannet, G., Singh, K., Fidelis, C., Farrar, M. B., Muqaddas, B., & Bai, S. H. (2021). Effects of biochar, compost, and biochar-compost on soil total nitrogen and available phosphorus concentrations in a corn field in Papua New Guinea. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 27411–27419. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12477-w>
26. Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., Van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
27. Kumar, A., & Bhattacharya, T. (2021). Biochar: A sustainable solution. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 6642–6680. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00970-0>
28. Lashari M. S., Ye Y., Ji H., Li L., Kibue G. W., Lu H., Zheng J., & Pan G. (2014). Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from Central China: A two-year field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 1321-1327. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6825>
29. Li, C., Zhao, C., Zhao, X., Wang, Y., Lv, X., Zhu, X., & Song, X. (2023). Beneficial effects of biochar application with nitrogen fertilizer on soil nitrogen retention, absorption and utilization in maize production. *Agronomy*, 13(1), 113. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010113>
30. Liu, B., Li, H., Li, H., Zhang, A., & Rengel, Z. (2021). Long-term biochar application promotes rice productivity by regulating root dynamic development and reducing nitrogen leaching. *GCB Bioenergy*, 13(1), 257–268. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12766>
31. Lu, L., Yu, W., Wang, Y., Zhang, K., Zhu, X., Zhang, Y., & Chen, B. (2020). Application of biochar-based materials in environmental remediation: From multi-level structures to specific devices. *Biochar*, 2, 1–31. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00041-7>
32. Mafakheri, M., & Asghari, M. (2025). Optimization of growth and biochemical production in *Dracocephalum moldavica* L. through biochar and salicylic acid application in a pot experiment. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*, 03, 222–229. <https://doi.org/10.22034/jmpb.2024.366761.1742>
33. Mukherjee, A., Lal, R., & Zimmerman, A. R. (2014). Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment*, 487, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.141>
34. Mosapour, M., & Feizian, M. (2024). The effect of humic acid and biochar in sheep manure on the concentration of some nutrient elements in aerial parts and the yield of the summer savory plant (*Satureja hortensis* L.). *Plant Process and Function*, 13(59), 24. <https://doi.org/10.22034/13.59.417>
35. Nikbakht, J., Eshghi, V., Barzegar, T., & Vaezi, A. (2020). Interaction of urea fertilizer and magnetized water on

- yield and water and fertilizer use efficiency in cucumber (*Cucumis sativus* cv. Kish F1). *Water and Soil*, 34(3), 675-688. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i3.83971>
36. Pandey, V., & Patra, D. D. (2015). Crop productivity, aroma profile and antioxidant activity in *Pelargonium graveolens* L'Hér. under integrated supply of various organic and chemical fertilizers. *Industrial Crops and Products*, 67, 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.042>
 37. Pandey, V., Patel, A., & Patra, D. D. (2015). Amelioration of mineral nutrition, productivity, antioxidant activity and aroma profile in marigold (*Tagetes minuta* L.) with organic and chemical fertilization. *Industrial Crops and Products*, 76, 378-385. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.023>
 38. Pandey, V., Patel, A., & Patra, D. D. (2016). Integrated nutrient regimes ameliorate crop productivity, nutritive value, antioxidant activity and volatiles in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*, 87, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.035>
 39. Pelvan, E., Karaoglu, O., Firat, E. O., Kalyon, K. B., RoS, E., & Alasalvar, C. (2022). Immunomodulatory effects of selected medicinal herbs and their essential oils: A comprehensive review. *Journal of Functional Foods*, 94, 105108. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105108>
 40. Peng, J., Han, X., Li, N., Chen, K., Yang, J., Zhan, X., Luo, P., & Liu, N. (2021). Combined application of biochar with fertilizer promotes nitrogen uptake in maize by increasing nitrogen retention in soil. *Biochar Journal*, 3, 367-379. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00090-6>
 41. Phares, C. A., Amoakwah, E., Danquah, A., Akaba, S., Frimpong, K. A., & Mensah, T. A. (2022). Improved soil physicochemical, biological properties and net income following the application of inorganic NPK fertilizer and biochar for maize production. *Acta Ecologica Sinica*, 42(4), 289-295. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.12.002>
 42. Rezaei Chiyaneh, I., Pirzad, A., & Farjami, A. (2015). Effect of nitrogen, phosphorus and sulfur supplier bacteria on seed yield and essential oil of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(4), 71-83.
 43. Rivelli, A. N., & Libutti, A. (2022). Effect of biochar and inorganic or organic fertilizer co-application on soil properties, plant growth and nutrient content in Swiss Chard. *Agronomy*, 12, 2089. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092089>
 44. Saah, K. J. A., Kaba, J. S., & Abunyewa, A. A. (2022). Inorganic nitrogen fertilizer, biochar particle size and rate of application on lettuce (*Lactuca sativa* L.) nitrogen use and yield. *All Life*, 15(1), 624-635. <https://doi.org/10.1080/26895293.2022.2080282>
 45. Sayed, Y. A., Ali, A. M., Ibrahim, M. F., Fadl, M. E., Casucci, C., Drosos, M., Scopa, A., & Al-Sayed, H. M. (2024). Impact of poultry manure-derived biochar and bio-fertilizer application to boost production of black cumin plants (*Nigella sativa* L.) grown on sandy loam soil. *Agriculture*, 14, 1801. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101801>
 46. Tan, Z., Ye, Z., Zhang, L., & Huang, Q. (2018). Application of the 15N tracer method to study the effect of pyrolysis temperature and atmosphere on the distribution of biochar nitrogen in the biomass-biochar-plant system. *Science of The Total Environment*, 622-623, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.341>
 47. Zhu, Q., Peng, X., & Huang, T. (2015). Contrasted effects of biochar on maize growth and N use efficiency depending on soil conditions. *International Agrophysics*, 29, 257-266. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0023>



Contrasting Agronomic Responses of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) Native Landraces to Planting Date: A Risk Management Strategy for Drought Stress

S. R. Amiri^{1,2*}, Kh. Salimi¹, N. Zakeri³, T. Yousefi⁴, S. Nazarzaei¹

1- Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Saravan, Saravan, Iran

2- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran

3- Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

4- Research Expert, University of Saravan, Saravan, Iran

(*- Corresponding author's Email: R.amiri@saravan.ac.ir, R.Amiri@ujiroft.ac.ir)

Received: 20 December 2025
Revised: 13 February 2026
Accepted: 18 April 2026
Available Online: 12 May 2026

How to cite this article:

Amiri, S. R., Salimi, Kh., Zakeri, N., Yousefi, T., & Nazarzaei, S. (2026). Contrasting agronomic responses of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) native landraces to planting date: A risk management strategy for drought stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 403-417. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.97109.1438>

Introduction

Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) is a highly important drought-tolerant legume crop with considerable potential for cultivation in arid and semi-arid regions. Beyond its intrinsic value as a food and forage crop, guar seed contains galactomannan gum, which is extensively utilized across the food, pharmaceutical, textile, paper, and oil industries. Expanding guar cultivation in water-limited environments like Sistan and Baluchestan Province, particularly the Saravan region, can significantly contribute to crop diversification and sustainable production systems. However, this region's hot and dry climate, coupled with limited water resources and temperature fluctuations, strongly influences guar's vegetative and reproductive growth phases. Planting date is a critical agronomic factor determining the environmental conditions experienced by the crop. Delayed planting often exposes reproductive stages to severe terminal drought and high temperatures. Native landraces, having evolved under specific environmental constraints, are valuable genetic resources that possess desirable traits for adaptation, earliness, and yield stability. Identifying the optimum planting date and the most adaptable native landrace is therefore essential for mitigating risks. Consequently, this study aimed to evaluate the interaction effects of planting dates and native landraces on guar phenology, yield components, and seed yield under Saravan's climatic conditions.

Materials and Methods

The field experiment was conducted during the 2024–2025 cropping season in Saravan, Sistan and Baluchestan Province, Iran. A factorial experiment based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications was implemented. The experimental factors comprised three planting dates (March 6, April 6, and May 5; corresponding approximately to 15 Esfand, 15 Farvardin, and 15 Ordibehesht) and three native guar landraces (Garmbit, Saravan, and Sarbaz). The experimental site featured a sandy loam soil with an electrical conductivity of 1.9 dS m⁻¹, a pH of 8.7, and 0.65% organic carbon. Soil total nitrogen was 0.07%, while available phosphorus and potassium were 12 and 210 mg kg⁻¹, respectively. Standard land preparation, including primary plowing, perpendicular disking, and leveling, was performed. Fertilization was applied based on soil test results, and all plots received uniform irrigation and standard agronomic management. Phenological traits, including vegetative and reproductive growth durations, were meticulously recorded. Furthermore, leaf area, number of pods



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

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.97109.1438>

per plant, number of seeds per pod, number of seeds per plant, 100-seed weight, and final seed yield (kg ha^{-1}) were evaluated. Data were subjected to analysis of variance, and treatment means were compared using appropriate mean comparison procedures to assess main and interaction effects.

Results and Discussion

The results demonstrated that planting date, landrace, and their interaction significantly affected all evaluated traits, including phenology, yield components, and final seed yield. This significant interaction implies that the native landraces exhibited distinct responses to planting date variations. The Sarbaz landrace displayed the highest yield potential under early planting conditions, producing a maximum seed yield of 2689 kg ha^{-1} on March 6. This indicates its substantial genetic potential to exploit favorable early-season environmental conditions. However, its performance declined drastically under delayed planting. At the May 5 planting date, its seed yield dropped to 1033 kg ha^{-1} , representing a severe 62% reduction compared to early planting. This vulnerability was linked to the exposure of its critical reproductive stages to high terminal temperatures. In contrast, the Garmbit landrace exhibited exceptional yield stability across all planting dates. Its seed yield decreased from 2393 kg ha^{-1} under the first planting date to 1535 kg ha^{-1} under delayed planting, equating to a moderate reduction of only 36%. The superior stress tolerance of Garmbit was primarily attributed to its early maturity (ranging from 84 to 94 days), which facilitated a stress-escape strategy before the onset of severe late-season heat. Additionally, Garmbit successfully maintained an active photosynthetic source through a stable leaf area and preserved essential yield components, such as pod and seed production, under stress. Conversely, the Saravan landrace generally showed lower productivity and was more susceptible to terminal stress due to its later maturity.

Conclusion

The findings underscore the critical importance of matching planting dates with the specific genetic and phenological characteristics of guar landraces. The earliest planting date, March 6, provided the optimal environmental window for maximizing yield potential, particularly for the high-yielding but sensitive Sarbaz landrace. Thus, early planting of Sarbaz is strongly recommended when the goal is to achieve maximum productivity under favorable conditions. On the other hand, Garmbit was definitively identified as the most stable and adaptable landrace across varying planting dates. Its inherent early maturity, effective terminal stress-escape mechanism, and robust capacity to maintain leaf area and critical yield components minimized yield losses under delayed planting. Therefore, Garmbit is highly recommended for risk management, climate resilience, and sustainable guar production in Saravan and similar arid regions of Sistan and Baluchestan. Future breeding programs should continue to leverage these native genetic resources to enhance drought tolerance and yield stability.

Keywords: Landrace $\times$ environment interaction, Stress escape, Yield components, Yield stability

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص ۴۱۷-۴۰۳

پاسخ‌های زراعی متمایز توده‌های بومی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) به تاریخ کاشت:

راهبردی برای مدیریت تنش خشکی

سیدرضا امیری^{۱*}، خالد سلیمی^۱، نادر ذاکری^۲، طیبه یوسفی^۳، سلمان نظرزایی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹

چکیده

گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) گیاهی متحمل به خشکی و مناسب برای کشت در مناطق خشک مانند سیستان و بلوچستان است. با این حال، اطلاعات مدونی در خصوص مدیریت بهینه زراعی آن، به‌ویژه واکنش توده‌های بومی به تاریخ کاشت وجود ندارد. این پژوهش، با هدف تعیین مناسب‌ترین تاریخ کاشت و سازگارترین توده بومی گوار برای دستیابی به عملکرد پایدار در شرایط آب‌وهوایی سرباز انجام شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ اجرا گردید. عامل‌های آزمایشی شامل سه تاریخ کاشت (۱۵ اسفند، ۱۵ فروردین و ۱۵ اردیبهشت) و سه توده بومی گوار (گرمیت، سراوان و سرباز) بودند. صفات فنولوژیک، اجزای عملکرد و عملکرد نهایی دانه مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر صفات مورد بررسی از جمله عملکرد دانه معنی‌دار بود. توده سرباز در تاریخ کاشت اول (۱۵ اسفند) با تولید ۲۶۸۹ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشت، اما در تاریخ کاشت ۱۵ اردیبهشت دچار افت شدید ۶۲ درصدی شد و عملکرد آن به ۱۰۳۳ کیلوگرم در هکتار رسید. در مقابل، توده گرمیت پایداری عملکرد قابل توجهی نشان داد، به‌طوری که افت عملکرد آن (۳۶ درصد) تقریباً نصف کاهش شدید ۶۲ درصدی مشاهده‌شده در توده سرباز بود (کاهش از ۲۳۹۳ به ۱۵۳۵ کیلوگرم در هکتار). این پایداری به راهبرد فرار از تنش (زودرسی با ۸۴ تا ۹۴ روز) و توانایی حفظ اجزای کلیدی عملکرد مانند تعداد غلاف و دانه در بوته تحت تنش نسبت داده شد. نتایج نشان داد که توده‌های بومی الگوهای پاسخ‌دهی متفاوتی را در مواجهه با تغییر تاریخ کاشت نشان می‌دهند. توده گرمیت به‌دلیل پایداری بالا و برخورداری از صفت زودرسی (تکمیل چرخه رشد در ۸۴ تا ۹۴ روز)، به‌عنوان توده برتر برای مدیریت تنش و تولید پایدار توصیه می‌شود؛ زیرا با کوتاه کردن دوره رشد، مدت زمان مواجهه با تنش‌های انتهایی فصل را کاهش می‌دهد. در مقابل، توده سرباز یک توده پرتانسیل اما حساس است. تاریخ کاشت ۱۵ اسفند پتانسیل حداکثر عملکرد را به‌ویژه برای توده‌های پرتانسیل مانند سرباز فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: اثر متقابل ژنوتیپ در محیط، اجزای عملکرد، پایداری عملکرد، فرار از تنش

مقدمه

سازگار باشند، یک راهبرد کلیدی برای حفظ امنیت غذایی و تنوع‌بخشی به الگوی کشت محسوب می‌شود. به‌ویژه در منطقه سرباز واقع در جنوب شرق ایران، کشاورزی به‌دلیل دماهای بسیار بالا در تابستان و محدودیت شدید منابع آبی با ریسک بالایی همراه است. در این منطقه، کشت گیاهان رایج و پُرآب‌بر دیگر توجیه اقتصادی و

تغییرات اقلیمی و محدودیت فزاینده منابع آب، کشاورزی پایدار را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان با چالش‌های جدی مواجه کرده است (Rockström et al., 2010). در این مناطق، شناسایی و معرفی گیاهان زراعی که با شرایط نامساعد محیطی

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه سراوان، سراوان، ایران

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

۳- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۴- کارشناس مدیر امور پژوهشی، دانشگاه سراوان، سراوان، ایران

(Email: R.amiri@saravan.ac.ir, R.Amiri@ujiroft.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.97109.1438>

یک منطقه خاص، منابع ژنتیکی ارزشمندی برای برنامه‌های به‌نژادی و یافتن صفات مطلوب مانند تحمل به تنش و پایداری عملکرد محسوب می‌شوند. در واقع، تنوع ژنتیکی گسترده‌ای در بین توده‌های بومی گوار برای صفات کلیدی زراعی گزارش شده است، به‌طوری که ارتفاع گیاه می‌تواند از ۰/۵ تا ۳ متر و طول دوره رشد از ۸۰ تا بیش از ۱۶۰ روز متغیر باشد. علاوه بر این، عادت رشد بوته نیز از تک‌ساقه تا بسیار منشعب متفاوت است (Ravelombola et al., 2021). واکنش اجزای عملکرد به تاریخ‌های مختلف کاشت نیز اغلب در بین ژنوتیپ‌ها متفاوت است، که این امر وجود اثر متقابل معنی‌دار ژنوتیپ در محیط را برجسته می‌سازد و بر لزوم ارزیابی توده‌های بومی تحت شرایط مدیریتی مختلف تأکید دارد (Sharma et al., 2021). مطالعه گریستا و همکاران (Gresta et al., 2017) نشان داد که ژنوتیپ‌های مختلف گوار واکنش‌های متفاوتی از نظر ارتفاع بوته، تعداد غلاف و عملکرد دانه به تاریخ کاشت و رژیم‌های آبیاری نشان می‌دهند. این یافته بر اهمیت اثر متقابل ژنوتیپ در محیط و لزوم ارزیابی توده‌های بومی تحت شرایط مدیریتی مختلف تأکید دارد.

در برنامه‌های اصلاح نباتات برای اقلیم‌های خشک، همواره یک موازنه کلیدی بین انتخاب ژنوتیپ‌های با پتانسیل عملکرد بالا (که ممکن است به تنش حساس باشند) و ژنوتیپ‌های با پایداری عملکرد بالا (که عملکردی مطمئن‌تر دارند) وجود دارد. شناسایی اساس فیزیولوژیک و فنولوژیک این راهبردهای متمایز در ژرمپلاسسم بومی برای مدیریت ریسک تنش خشکی حیاتی است. این پژوهش با فرضیه وجود پاسخ‌های زراعی متضاد در توده‌های بومی گوار به تاریخ کاشت، با هدف شناسایی و ارزیابی این راهبردها و معرفی ژنوتیپ‌های مناسب برای تولید پُرپتانسیل و تولید پایدار در شرایط آب‌وهوایی منطقه اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور ارزیابی واکنش عملکرد و اجزای آن در سه توده بومی گوار به تاریخ‌های مختلف کاشت، در سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ در شهرستان سراباز با عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۰ متر از سطح دریا و با میانگین بارش سالانه ۱۱۰ میلی‌متر در سال زراعی اجرا شد (جدول ۱).

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به اجرا درآمد. عامل‌های آزمایشی شامل تاریخ کاشت به‌عنوان عامل اول در سه سطح (۱۵ اسفند، ۱۵ فروردین و ۱۵ اردیبهشت) و توده بومی گوار به‌عنوان عامل دوم در سه سطح (گرمیت، سراوان و سراباز) بودند که از توده‌های رایج و سازگار یافته منطقه هستند و برای این مطالعه انتخاب شدند. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف کاشت به‌طول چهار متر بود که فاصله بین ردیف‌ها

اکولوژیک ندارد، بنابراین توسعه کشت گیاهان گرمسیری متحمل و کم‌توقعی مانند گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) که بومی و سازگار با این اقلیم خشن هستند، نه‌تنها راهکاری هوشمندانه برای مدیریت منابع محدود آب است، بلکه به‌عنوان یک محصول صنعتی ارزشمند می‌تواند پایداری درآمد کشاورزان این منطقه را تضمین کند (Nakhaei & Baradaran, 2025). گوار، گیاهی یک‌ساله از خانواده حبوبات، به‌عنوان یک گزینه بسیار مطلوب برای کشت در این مناطق شناخته می‌شود. این گیاه به‌دلیل تحمل بالا به خشکی، قابلیت سازگاری با خاک‌های فقیر، نیاز آبی کم و در عین حال نیاز به تابش شدید آفتاب و رطوبت نسبی پایین، پتانسیل بالایی برای کشت در اقلیم‌های گرم و خشک دارد (Pathak & Roy, 2015). علاوه بر این، گوار با تثبیت نیتروژن اتمسفر به بهبود حاصلخیزی خاک کمک کرده و به‌عنوان یک محصول با ارزش اقتصادی بالا، که صمغ استخراج شده از دانه آن در صنایع متعددی کاربرد دارد، می‌تواند به بهبود معیشت کشاورزان کمک شایانی نماید (Gresta et al., 2013).

با وجود پتانسیل ژنتیکی گیاهان برای تولید عملکرد مطلوب، تحقق این پتانسیل در گرو بهینه‌سازی عوامل مدیریتی در مزرعه است. در این میان، تاریخ کاشت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و در عین حال کم‌هزینه‌ترین عوامل مدیریتی، نقشی حیاتی در موفقیت تولید محصول ایفا می‌کند (Hussain et al., 2022). تاریخ کاشت با تعیین شرایط محیطی غالب مانند دما و طول روز، در طول مراحل حساس فنولوژیک گیاه، می‌تواند رشد رویشی، توسعه زایشی و در نهایت عملکرد دانه را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. تاریخ کاشت به‌عنوان یک عامل مدیریتی حیاتی، نه‌تنها بر رشد و نمو، بلکه بر مرحله اولیه استقرار بوته نیز تأثیرگذار است. انتخاب تاریخ کاشت مناسب به گیاه اجازه می‌دهد تا مراحل کلیدی رشد خود، به‌ویژه مراحل گل‌دهی و پُر شدن غلاف را، با مطلوب‌ترین شرایط محیطی هم‌گام سازد. تأخیر در کاشت می‌تواند گیاه را در مراحل انتهایی رشد با تنش‌های شدید گرما و خشکی مواجه کند که این امر منجر به کاهش دوره پُر شدن دانه و افت شدید عملکرد می‌شود (Saini & Westgate, 1999). تحقیقات نشان داده‌اند که تأخیر در کاشت می‌تواند طول دوره رشد را افزایش دهد که این امر ممکن است منجر به تجمع بیشتر مواد مغذی و بهبود عملکرد شود، اما از سوی دیگر، مطالعاتی مانند مطالعه گریستا و همکاران (Gresta et al., 2013) در شرایط مدیترانه‌ای، اواسط ماه می را به‌عنوان بهترین تاریخ کاشت برای دستیابی به حداکثر عملکرد معرفی کرده‌اند. این نتایج متناقض، بر لزوم ارزیابی تاریخ کاشت بهینه برای هر منطقه اقلیمی و ژرمپلاسسم خاص تأکید می‌کند.

علاوه بر تاریخ کاشت، انتخاب ژنوتیپ یا توده مناسب نیز از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا ژنوتیپ‌های مختلف واکنش‌های متفاوتی به شرایط محیطی و مدیریتی نشان می‌دهند (Suthar et al., 2018). توده‌های بومی به‌دلیل سازگاری طولانی‌مدت با شرایط

بذرها به‌صورت دستی در عمق سه تا پنج سانتی‌متری خاک انجام گرفت. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت صورت گرفت و جهت تضمین استقرار مناسب گیاهچه‌ها، دور آبیاری بعدی به‌فاصله سه روز از یکدیگر انجام شدند. آبیاری‌های بعدی تا پایان فصل رشد به‌صورت نشتی (جوی و پشته‌ای) انجام گردید. دور آبیاری در مراحل اولیه رشد رویشی (اسفند و فروردین) هر ۱۰ روز یک بار تنظیم شد و با گرم شدن هوا و ورود گیاهان به مرحله زایشی (اردیبهشت و خرداد) جهت جلوگیری از تنش خشکی، به هر هفت روز یک بار کاهش یافت. مدیریت علف‌های هرز در طول فصل رشد، در دو مرحله به‌صورت وجین دستی صورت پذیرفت.

۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف پس از تنک کردن، ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله بین کرت‌های آزمایشی یک متر و بین هر بلوک (تکرار) دو متر فاصله به‌عنوان حاشیه لحاظ گردید. عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دو نوبت دیسک عمود بر هم و تسطیح نهایی بود. کوددهی براساس نتایج آزمون خاک و نیاز غذایی گیاه صورت گرفت (جدول ۲). تمامی کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به‌میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و کود پتاسیم از منبع پتاسیم سولفات به‌میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کاشت به زمین اضافه و با خاک مخلوط گردید. کود نیتروژن از منبع اوره به‌میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار در زمان کاشت استفاده شد. کاشت

جدول ۱ متوسط دما و بارندگی در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ شهرستان سرבاز

Table 1- Average temperature and precipitation data under growing season 2024-2025for Sarbaz county

ماه	میانگین بارش	میانگین حداکثر دما	میانگین حداقل دما
Month	Mean precipitation (mm)	Mean max. temp. (°C)	Mean min. temp. (°C)
فروردین	11.5	33.1	19.5
Mar.-Apr.			
اردیبهشت	4.3	37.8	23.4
Apr.-May.			
خرداد	1.1	41.2	26.8
May.-Jun.			
تیر	3.5	41.5	28.1
Jun.-Jul.			
مرداد	5.8	39.8	27.2
Jul.-Aug.			
شهریور	1.2	38	24.5
Aug.-Sep.			
مهر	0.8	35.5	20
Sep.-Oct.			
آبان	2.5	31	15
Oct.-Nov.			
آذر	5.7	27	11.8
Nov.-Dec.			
دی	15.1	24	9.9
Dec.-Jan.			
بهمن	20.3	25	11.7
Jan.-Feb.			
اسفند	18.2	29	15.8
Feb.-Mar.			

گرفته شد. روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (کل دوره رشد) نیز با شمارش تعداد روز از تاریخ کاشت تا زمانی که ۹۰ درصد غلاف‌ها در بوته‌های هر کرت به رنگ قهوه‌ای تغییر رنگ داده بودند، محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری سطح برگ در مرحله ۵۰ درصد غلاف‌دهی، از سه بوته در هر کرت به‌صورت تصادفی نمونه‌برداری شد. تعیین سطح برگ با استفاده از روش شمارش شبکه‌ای انجام گرفت. بدین منظور، برگ‌ها روی کاغذ گراف (شطرنجی) با شبکه‌بندی یک سانتی‌متری

پس از رسیدگی فیزیولوژیک، برداشت نهایی از دو ردیف میانی هر کرت با حذف اثر حاشیه از ابتدا و انتهای خطوط انجام شد. یادداشت‌برداری از صفات فنولوژیک براساس پایش روزانه کرت‌ها انجام گردید. روز تا گل‌دهی (پایان دوره رویشی) به‌عنوان تعداد روز از تاریخ کاشت تا زمانی که ۵۰ درصد بوته‌های هر کرت دارای حداقل یک گل باز شده بودند، ثبت شد. دوره پُر شدن دانه (دوره زایشی) حد فاصل بین زمان ۵۰ درصد گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک در نظر

نتایج و بحث

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر تاریخ کاشت، توده و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر عملکرد دانه معنی‌دار بود. معنی‌دار بودن اثر متقابل حاکی از آن است که واکنش توده‌های مختلف به تغییر در تاریخ کاشت یکسان نبوده است.

مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱ و جدول ۴) نشان داد که بیشترین عملکرد دانه (۲۶۸۹ کیلوگرم در هکتار) متعلق به توده سرباز در اولین تاریخ کاشت ۱۵ اسفند بود. این توده با بهره‌گیری از شرایط مطلوب ابتدای فصل رشد توانست پتانسیل ژنتیکی بالای خود را بروز دهد. باین‌حال، این توده حساسیت شدیدی به تأخیر در کاشت نشان داد؛ به‌طوری که عملکرد آن با یک ماه تأخیر (۱۵ فروردین) به ۱۹۱۵ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت و در نهایت در تاریخ کاشت سوم (۱۵ اردیبهشت) به ۱۰۳۳ کیلوگرم در هکتار رسید. این افت عملکرد ۶۲ درصدی، پتانسیل بالای این توده را در شرایط بهینه و هم‌زمان ریسک بالای کشت آن را در مواجهه با تنش‌های ناشی از تأخیر در کاشت (مانند گرما و خشکی انتهای فصل) به‌وضوح نشان می‌دهد.

در مقابل، توده گرمیت پایداری عملکرد قابل توجهی از خود به نمایش گذاشت. عملکرد این توده از ۲۳۹۳ کیلوگرم در هکتار در تاریخ کاشت ۱۵ اسفند، با روندی تدریجی و کاهشی کمتر نسبت به سایر توده‌ها، به ۱۵۳۵ کیلوگرم در هکتار در کاشت سوم کاهش یافت. این کاهش حدوداً ۳۶ درصدی به‌مراتب کمتر از افت شدید توده سرباز بود. نکته حائز اهمیت این است که در آخرین تاریخ کاشت که شرایط محیطی نامساعدتر بود، عملکرد توده گرمیت به‌طور معنی‌داری (حدود ۱/۵ برابر) بیشتر از توده سرباز بود.

قرار داده شدند و پس از ترسیم محیط آن‌ها، تعداد مربع‌های اشغال‌شده در محدوده ترسیم‌شده شمارش گردید. در نهایت، سطح برگ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$\text{Leaf area (cm}^2\text{)} = N \times B \quad (1)$$

که در آن، N: تعداد بلوک‌های (مربع‌های) یک سانتی‌متری پوشش داده‌شده توسط نمونه برگ و B: مساحت هر بلوک در کاغذ گراف است. به‌منظور ارزیابی اجزای عملکرد، ده بوته به‌صورت تصادفی از هر کرت انتخاب و صفاتی شامل تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف (از میانگین ۱۰ غلاف از قسمت‌های مختلف بوته) و تعداد کل دانه در بوته شمارش و ثبت گردید. برای تعیین وزن ۱۰۰ دانه، سه نمونه ۱۰۰ عددی بذر به‌صورت تصادفی از توده بذر هر کرت شمارش و با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شد. در نهایت، برای تعیین عملکرد دانه، بوته‌های موجود در سطح یک مترمربع از دو ردیف میانی هر کرت برداشت و توزین گردیدند و عملکرد نهایی با رطوبت استاندارد ۱۴ درصد محاسبه و به کیلوگرم در هکتار تبدیل شد. داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از نرم‌افزار R (نسخه ۴/۳/۱) تجزیه و تحلیل شدند. تجزیه واریانس براساس مدل آماری طرح انجام گرفت. برای مقایسه میانگین اثرات متقابل معنی‌دار، از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد ($P \leq 0.05$) با استفاده از بسته نرم‌افزاری agricolae استفاده گردید. نمودارهای مربوط به اثرات متقابل نیز با استفاده از بسته ggplot2 در همان نرم‌افزار ترسیم شدند.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2- Selected physicochemical properties of the experimental site soil

ویژگی Property	واحد Unit	مقدار Value
بافت خاک Soil texture	-	لومی-شنی Sandy loam
اسیدیته pH	-	7.8
هدایت الکتریکی EC	dS m ⁻¹	1.9
کربن آلی Organic C	%	0.35
نیتروژن کل Total N	%	0.07
فسفر قابل دسترس Available P	mg kg ⁻¹	12
پتاسیم قابل دسترس Available K	mg kg ⁻¹	210

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات زراعی و عملکرد گیاه گوار تحت تأثیر تاریخ کاشت و توده
Table 3- Analysis of variance (mean of squares) for agronomic traits and yield of guar as affected by planting date and landrace

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	عملکرد دانه Seed yield	وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight	دانه در بوته Seeds per plant	دانه در غلaf Seeds per pod	تعداد غلaf Pods per plant	سطح برگ Leaf area	دوره زایشی Reproductive period	روز تا گل‌دهی Days to flowering
تکرار Block (replication)	۲	14520 ns	0.02 ns	185 ns	0.11 ns	1.9 ns	85 ns	15.4 ns	2.1 ns
تاریخ کاشت Planting date (A)	۲	2910250 **	5.85**	6240**	2.5**	84.3**	1940 **	78.5**	62.8**
توده Landrace (B)	۲	1945600 **	0.28**	25110**	8.20**	365.1**	181.5 **	852.1**	25.4**
اثر متقابل Interaction (A×B)	۴	645800 **	0.34**	4380**	271**	235**	1.3**	12.6*	3.8*
خطا Error	۱۶	18500	0.03	205	0.15	4.2	89	9.2	1.8
ضریب تغییرات C.V (%)	–	8.3	4.2	7.5	5.5	7.3	7.8	4.5	4.4

ns، * و **: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد.
ns, * and **: non-significant, significant at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر صفات مورد بررسی
Table 4- Mean comparison for the interaction of planting date and landrace on evaluated traits

تاریخ کاشت Planting date	توده Landrace	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)	تعداد غلاف در بوته Pods per plant	تعداد دانه در بوته Seeds per plant	وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight (g)	تعداد دانه در غلاف Seeds per pod	سطح برگ Leaf area (cm ²)	کل دوره رشد Total growth period (days)	دوره زایشی Reproductive period (days)	دوره رویشی Vegetative period (days)
۱۵ اسفند 6 March	گرمبیت Garmbeit	2393	30	228	5.24	7.7	153.3	83.7	57	26.7
	سراوان Saravan	1234	23	120	5.15	5.3	64.6	105.7	75.7	30
	سرباز Sarbaz	2689	34	249	5.40	7.3	124.1	96	67.3	28.7
۱۵ فروردین 6 April	گرمبیت Garmbeit	1924	29	227	4.23	7.7	181.2	89	60.7	28.3
	سراوان Saravan	1570	22	169	4.64	7.7	86.9	104	73.3	30.7
	سرباز Sarbaz	1915	28	218	4.39	7.9	144.2	101	70.7	30.3
۱۵ اردیبهشت 5 May	گرمبیت Garmbeit	1535	30	239	3.21	8	133.4	93.7	60.4	33.3
	سراوان Saravan	791	21	132	3	6.3	64.5	109.3	73	36.3
	سرباز Sarbaz	1033	27	142	3.63	5.3	120.8	96.7	63	33.7

است. توده سراوان علی‌رغم بومی بودن در منطقه گسترده‌تر جنوب شرق، در تمام تاریخ‌های کاشت کمترین عملکرد را داشت (میانگین

این موضوع بیانگر راهبرد تحمل توده گرمبیت در تخصیص منابع و تضمین عملکردی پایدارتر در طیف وسیع‌تری از شرایط محیطی

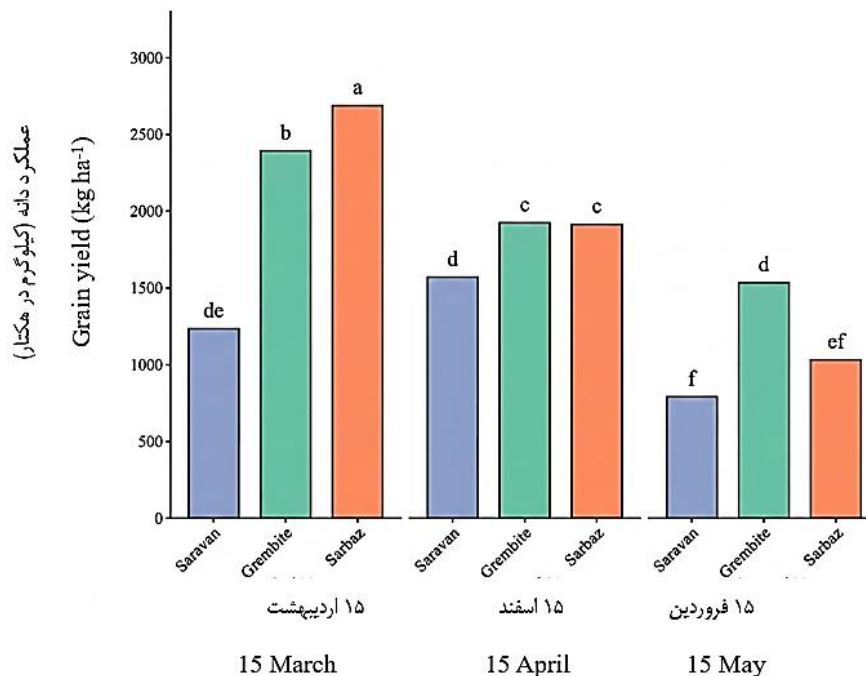
می‌سازد. این تنوع در واکنش ژنوتیپ‌ها، که توسط کلیانی (Kalyani, 2025) نیز روی ژنوتیپ‌های مختلف گوار مشاهده شد، بر لزوم ارزیابی ژرم‌پلاسم بومی برای شناسایی منابع ژنتیکی با پایداری عملکرد بالا تأکید دارد.

سطح برگ در بوته

سطح برگ به‌عنوان منبع فتوسنتزی گیاه (منبع تولید آسیمیلات‌ها)، نقشی حیاتی در تأمین انرژی لازم برای رشد اندام‌های زایشی (مخزن) ایفا می‌کند. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر متقابل تاریخ کاشت و توده برگ بر سطح برگ نیز معنی‌دار بود. بررسی میانگین‌ها (شکل ۲ و جدول ۴)، الگوهای واکنشی جالبی را نشان داد. توده گرمبیت در تاریخ کاشت دوم (۱۵ فروردین) با تولید بیشترین سطح برگ در کل آزمایش (حدود ۱۸۱ سانتی‌مترمربع)، اگرچه پتانسیل بالای خود برای رشد رویشی را به نمایش گذاشت. اگرچه سطح برگ این توده در کاشت سوم به ۱۳۳ سانتی‌مترمربع کاهش یافت، اما توانایی آن در حفظ یک سطح برگ نسبتاً بالا و کارا حتی در شرایط تنش، به تداوم تأمین آسیمیلات‌ها برای اندام‌های زایشی کمک کرده و یکی از دلایل کلیدی پایداری عملکرد آن است.

۱۱۹۸ کیلوگرم در هکتار). با بررسی صفات فنولوژیک و فیزیولوژیک، این عملکرد پایین را می‌توان به عدم تطابق فنولوژیک و محدودیت منبع نسبت داد. براساس جدول ۴، توده سراوان دیررس‌ترین توده بود (طول دوره رشد ۱۰۶ تا ۱۰۹ روز). این دیررسی باعث شد تا مراحل حساس پر شدن دانه با اوج گرما و خشکی انتهای فصل هم‌زمان شود، درحالی‌که گیاه نتوانسته بود سطح برگ کافی (میانگین پایین ۷۲ سانتی‌مترمربع) را برای پشتیبانی از این دوره طولانی تأمین کند. بنابراین، راهبرد دیررسی این توده در شرایط اقلیمی آزمایش (شهرستان سرپاز) کارآمد نبوده و منجر به کاهش شدید وزن ۱۰۰ دانه و تعداد غلاف شد.

این نتایج با تحقیقات پیشین هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهند تأخیر در کاشت به دلیل کوتاه شدن دوره رشد و مواجهه گیاه با دماهای بالا در مراحل حساس زایشی منجر به کاهش شدید عملکرد می‌شود (Gresta et al., 2013; Hussain et al., 2022; Mahdipour-Nakhaei & Afra et al., 2021). به‌طور مشابه نخعی و برادران (Baradaran, 2025) نیز گزارش کردند که تأخیر در کاشت گوار به‌طور معنی‌داری رشد، توسعه و در نهایت عملکرد دانه را به دلیل شرایط نامساعد محیطی محدود می‌کند. اما تفاوت در شیب این کاهش میان توده‌ها، اهمیت گزینش توده‌های پایدار مانند گرمبیت را برای مدیریت ریسک در مناطق مستعد تنش‌های محیطی آشکار



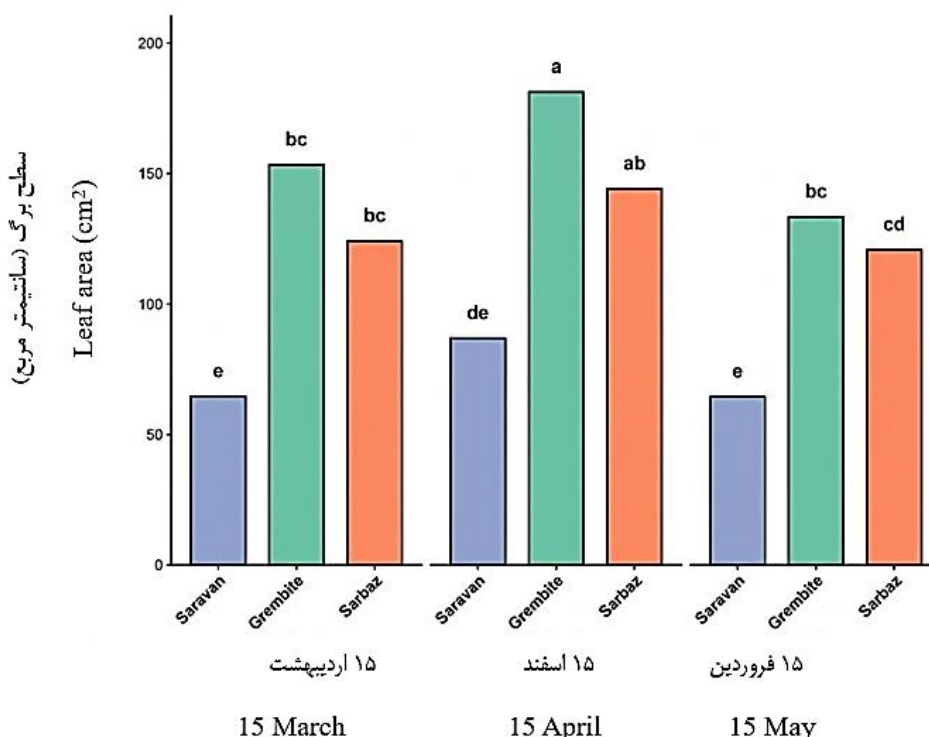
شکل ۱- اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) گوار

Figure 1- Interaction effect of planting date and landrace on seed yield (kg ha⁻¹) of guar
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. columns with the same letter are not significantly different based on the LSD test ($P \leq 0.05$).

ماند (جدول ۴). این مشاهده نشان می‌دهد که دلیل اصلی فروپاشی عملکرد توده سر باز، کاهش در سطح منبع (برگ) نبوده است، بلکه به احتمال زیاد به دلیل محدودیت در کارایی مخزن یا ناتوانی گیاه در تخصیص و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی تحت تنش شدید گرمای انتهای فصل بوده است (Sadras & Calderini, 2015). توده سراوان نیز به‌طور مداوم کمترین سطح برگ را داشت که با عملکرد پایین آن هم‌خوانی دارد.

این کاهش شدید در سطح منبع، توانایی گیاه برای تغذیه مخزن‌های زایشی (غلاف‌ها و دانه‌ها) را به‌شدت محدود کرده و دلیل اصلی ریزش غلاف‌ها، سقط جنین‌ها و پُر نشدن کامل دانه‌ها در این توده است (Sadras & Calderini, 2015).

نکته بسیار مهم علمی در رفتار توده سر باز مشاهده شد. سطح برگ این توده پایداری قابل توجهی داشت و بین ۱۲۴ سانتی‌متر مربع در کاشت اول و ۱۲۱ سانتی‌متر مربع در کاشت سوم، تقریباً ثابت باقی



شکل ۲- اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر سطح برگ (سانتی‌متر مربع) گوار

Figure 2- Interaction effect of planting date and landrace on leaf area (cm²) of guar

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means with the same letter are not significantly different based on the LSD test ($P \leq 0.05$).

قبل از شدیدترین تنش‌های انتهای فصل سپری کند. در نتیجه، کل دوره رشد این توده (از ۸۴ تا ۹۴ روز) کوتاه‌ترین بود و با تکمیل به‌موقع مراحل پُر شدن دانه، پایداری عملکرد خود را تضمین کرد. در نقطه مقابل، توده سر باز که در تاریخ کاشت اول با داشتن یک دوره زایشی طولانی (۶۷ روز) به حداکثر عملکرد رسید، در کاشت تأخیری نتوانست این مزیت را حفظ کند. با تأخیر در کاشت، دوره زایشی این توده به ۶۳ روز کاهش یافت. این کوتاه شدن دوره پُر شدن دانه، دقیقاً در زمان مواجهه با گرمای شدید، دلیل اصلی افت شدید وزن ۱۰۰ دانه (شکل ۳ و جدول ۴) و فروپاشی عملکرد آن بود. این توده دارای طولانی‌ترین دوره رویشی در بین توده‌ها بود که با تأخیر در کاشت از ۳۰ روز به ۳۶ روز افزایش یافت. جالب آنکه، مطابق

طول دوره رشد رویشی و زایشی

زمان‌بندی مراحل فنولوژیک، به‌ویژه تعادل بین دوره رویشی (روز تا گل‌دهی) و دوره زایشی (از گل‌دهی تا رسیدگی)، نقش کلیدی در تعیین پتانسیل و پایداری عملکرد گیاه دارد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر روز تا گل‌دهی، طول دوره زایشی و کل دوره رشد معنی‌دار بود که حاکی از وجود راهبردهای فنولوژیک متمایز در بین توده‌ها است.

توده گرمبیت، راهبرد فرار از تنش را از طریق گل‌دهی زودهنگام به کار گرفت. این توده با داشتن کوتاه‌ترین دوره رویشی (حدود ۲۷ تا ۳۳ روز) به‌سرعت وارد فاز زایشی شد. این امر به گرمبیت اجازه داد تا یک دوره زایشی نسبتاً طولانی و بسیار پایدار (حدود ۵۷ تا ۶۰ روز) را

شرایط مطلوب به نمایش گذاشت و پس از آن توده گرمبیت با حدود ۳۰ غلاف در جایگاه دوم قرار گرفت. با این حال، با تأخیر در کاشت و تشدید تنش‌های محیطی، این دو توده الگوهای واکنشی کاملاً متفاوتی از خود نشان دادند (شکل ۴ و جدول ۴). تعداد غلاف در توده سرباز با افتی محسوس به ۲۷ غلاف در آخرین تاریخ کاشت رسید. این کاهش حدوداً ۲۱ درصدی، یکی از دلایل افت عملکرد دانه (شکل ۱) در این توده محسوب می‌شود.

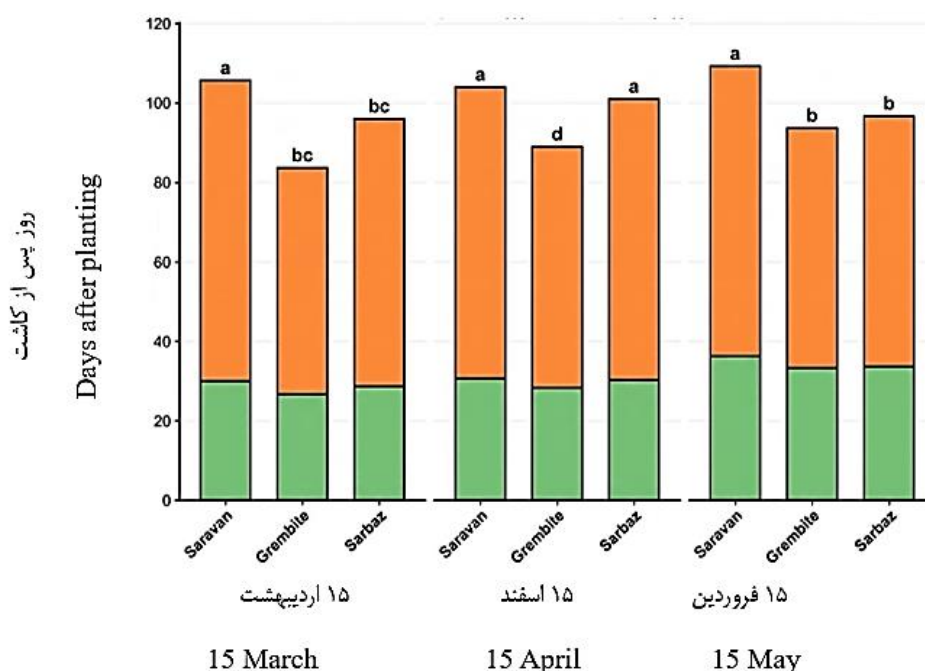
در مقابل، توده گرمبیت پایداری فوق‌العاده‌ای در حفظ غلاف‌های خود داشت و تعداد غلاف آن از ۳۰ عدد در کاشت اول به ۳۰ عدد در کاشت سوم رسید (تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد). این توانایی در حفظ ساختارهای زایشی تحت شرایط نامساعد، یکی از سازوکارهای کلیدی است که به پایداری عملکرد این توده کمک می‌کند. به‌طوری که در تاریخ کاشت ۱۵ اردیبهشت، توده گرمبیت بیشترین تعداد غلاف را تولید کرد. این یافته با نتایج بوراس و همکاران (Borrás et al., 2004) روی سویا (*Glycine max* L.) مطابقت دارد که نشان دادند تأخیر در کاشت با کاهش تعداد گره‌ها و در نتیجه جایگاه‌های بالقوه برای تشکیل غلاف، منجر به کاهش تعداد غلاف در بوته شد. بنابراین، توانایی توده گرمبیت در حفظ تعداد غلاف، نشان‌دهنده تحمل فیزیولوژیک بالاتر آن به شرایط محدودکننده رشد است.

با اصول فیزیولوژیک، با تأخیر در کاشت و افزایش دما، دوره زایشی این توده از ۷۵/۷ روز به ۷۳ روز کاهش یافت که نشان‌دهنده تلاش گیاه برای تسریع در رسیدگی تحت تنش است. با این وجود، این دوره زایشی حتی پس از کوتاه شدن، همچنان به‌طور معنی‌داری طولانی‌تر از سایر توده‌ها باقی ماند. همین امر باعث شد تا مراحل کلیدی پر شدن دانه در این توده با شدیدترین دوره گرما و خشکی انتهای فصل هم‌زمان شود که این عدم تطابق فنولوژیک، دلیل اصلی کارایی پایین و عملکرد بسیار ناچیز آن بود. این نتایج به‌خوبی نشان می‌دهد که راهبرد فنولوژیک زودرسی توده گرمبیت، سازگاری و پایداری بهتری را برای مدیریت تنش در شرایط آب‌وهوایی منطقه، به‌خصوص در مواجهه با تأخیر در کاشت فراهم می‌کند (Richards, 2006).

تعداد غلاف در بوته

تعداد غلاف، به‌عنوان اولین جزء عملکردی که در گیاه تثبیت می‌شود، پتانسیل اولیه عملکرد را تعیین می‌کند. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر این صفت نیز معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$).

در تاریخ کاشت اول (۱۵ اسفند)، توده سرباز با تولید بیشترین تعداد غلاف (حدود ۳۴ غلاف در بوته) پتانسیل ژنتیکی برتر خود را در

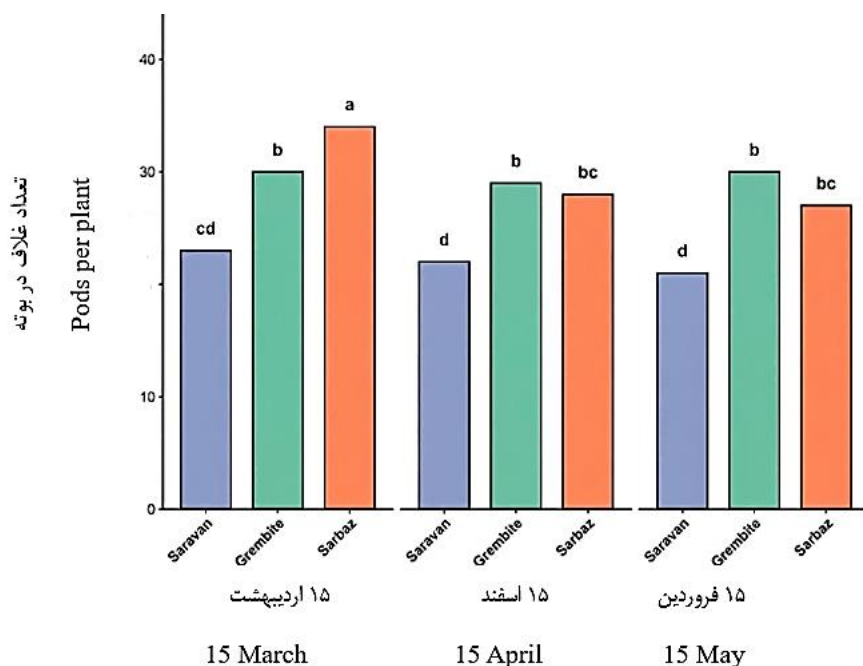


شکل ۳- اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر روز تا گل‌دهی و طول دوره زایشی گوار

Figure 3- Interaction effect of planting date and landrace on days flowering and reproductive period of guar

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means with the same letter are not significantly different based on the LSD test ($P \leq 0.05$).



شکل ۴- اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر تعداد غلاف در بوته گوار

Figure 4- Interaction effect of planting date and landrace on pods per plant of guar

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means with the same letter are not significantly different based on the LSD test ($P \leq 0.05$).

به ۸ دانه در کاشت سوم رسید (تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد). این ثبات نشان می‌دهد که توده گرمبیت از یک سازوکار فیزیولوژیکی کارآمد برای تغذیه اندام‌های زایشی خود حتی در شرایط نامساعد برخوردار است و دچار سقط جنین گسترده درون غلاف نمی‌شود. این ویژگی، یکی از دلایل کلیدی پایداری عملکرد این توده است. این ثبات می‌تواند به دلیل حفظ کارایی دستگاه فتوسنتزی (شکل ۲) و تخصیص مداوم آسیمیلات‌ها به مخزن‌های در حال رشد باشد که از سقط جنین جلوگیری می‌کند، موضوعی که حساسیت آن به تنش‌های محیطی به خوبی مستند شده است (Bianchi et al., 2020).

تعداد دانه در بوته

تعداد دانه در بوته به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای عملکرد، نقش کلیدی در تعیین پتانسیل نهایی عملکرد دانه دارد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر این صفت نیز معنی‌دار بود که بیانگر الگوهای واکنشی کاملاً متفاوت توده‌ها است.

همان‌طور که در شکل ۶ و جدول ۴ مشاهده می‌شود، توده سرباز در تاریخ کاشت اول با تولید حدود ۲۴۹ دانه در بوته، پتانسیل ژنتیکی بالایی خود را به نمایش گذاشت و بیشترین تعداد دانه را به خود اختصاص داد که کاملاً با عملکرد دانه بالایی آن در همین تاریخ

تعداد دانه در غلاف

این صفت نشان‌دهنده میزان موفقیت گیاه در تبدیل گل‌های بارور شده به دانه‌های کامل درون غلاف است و به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی در طول دوره گرده‌افشانی و پُر شدن دانه قرار دارد. براساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، اثر متقابل آن‌ها بر تعداد دانه در غلاف معنی‌دار بود.

مقایسه میانگین‌ها (شکل ۵ و جدول ۴)، الگوهای واکنشی بسیار متفاوتی را در بین توده‌ها آشکار کرد. توده سرباز در تاریخ کاشت اول (۱۵ اسفند) با تولید میانگین ۷/۳ دانه در غلاف، بالاترین پتانسیل را از خود نشان داد. با این حال، این توده با تأخیر در کاشت دچار کاهش شدیدی در این صفت شد، به طوری که در تاریخ کاشت سوم (۱۵ اردیبهشت) تعداد دانه در غلاف آن به تنها ۵/۳ دانه کاهش یافت. این افت تقریباً ۲۷ درصدی نشان‌دهنده حساسیت بالای فرآیندهای زایشی این توده به تنش‌های محیطی انتهای فصل است. کاهش تعداد دانه در غلاف معمولاً به سقط جنین در مراحل اولیه پس از لقاح نسبت داده می‌شود که ناشی از محدودیت در تأمین مواد فتوسنتزی (آسیمیلات‌ها) به غلاف‌های در حال رشد است (Bianchi et al., 2020).

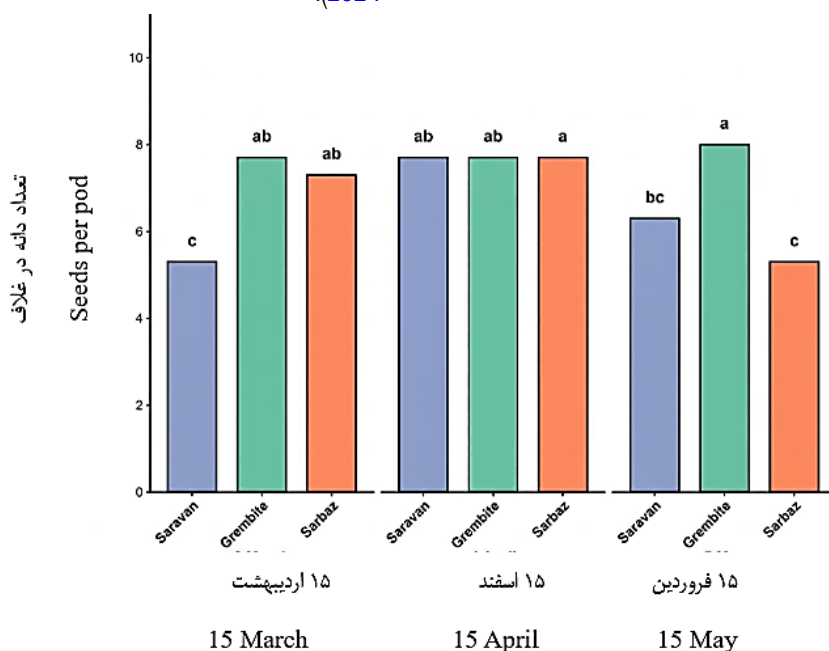
در نقطه مقابل، توده گرمبیت پایداری فوق‌العاده‌ای در حفظ این صفت از خود به نمایش گذاشت. تعداد دانه در غلاف این توده از ۷/۷

وزن ۱۰۰ دانه

وزن ۱۰۰ دانه به عنوان یکی از اجزای کلیدی تعیین کننده عملکرد، شاخصی از توانایی گیاه در تخصیص مواد فتوسنتزی به دانه‌ها (کارایی مخزن) است. نتایج تجزیه واریانس (

جدول ۱) نشان داد که اثر تاریخ کاشت و همچنین اثر متقابل تاریخ کاشت × توده بر این صفت معنی دار بود (**جدول ۳**)، در حالی که اثر اصلی توده به تنهایی معنی دار نشد. معنی دار بودن اثر متقابل حاکی از آن است که توده‌ها واکنش متفاوتی به تغییر تاریخ کاشت از خود نشان دادند.

بررسی میانگین‌های اثر متقابل (**شکل ۷** و **جدول ۴**) نشان می‌دهد که در تاریخ کاشت اول (۱۵ اسفند) که شرایط محیطی مطلوب‌تر بود، توده سرباز با میانگین ۵/۴۰ گرم، سنگین‌ترین دانه‌ها را تولید کرد و پس از آن توده گرمبیت با میانگین ۵/۲۴ گرم قرار گرفت. با تأخیر در کاشت، وزن ۱۰۰ دانه در تمام توده‌ها کاهش یافت، اما شدت این کاهش متفاوت بود. در توده سرباز، با تأخیر در کاشت از ۱۵ اسفند به ۱۵ اردیبهشت، وزن ۱۰۰ دانه دچار افت حدوداً ۳۳ درصدی شد و از ۵/۴۰ گرم به ۳/۶۳ گرم رسید. این کاهش شدید بیانگر حساسیت بالای این توده به تنش‌های انتهایی فصل مانند گرما و خشکی است که منجر به کوتاه شدن دوره پُر شدن دانه و کاهش تخصیص آسیمیلات‌ها به مخزن (دانه) می‌شود (Carrera et al., 2024).

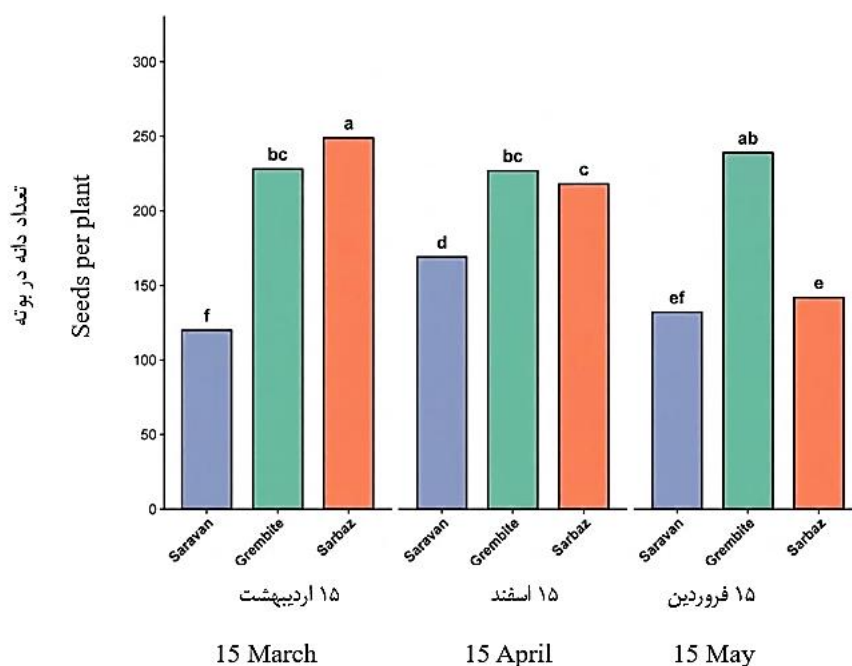


شکل ۵- اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر تعداد دانه در غلاف گوار

Figure 5- Interaction effect of planting date and landrace on seeds per pod of guar

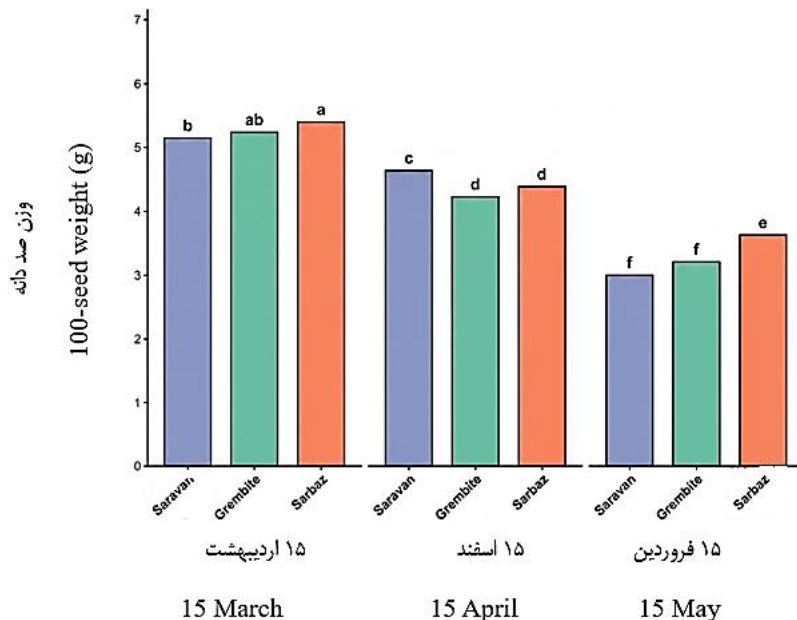
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means with the same letter are not significantly different based on the LSD test ($P \leq 0.05$).



شکل ۶- اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر تعداد دانه در بوته گوار

Figure 6- Interaction effect of planting date and landrace on seeds per plant of guar
 میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.
 Means with the same letter are not significantly different based on the LSD test ($P \leq 0.05$).



شکل ۷- اثر متقابل تاریخ کاشت و توده بر وزن ۱۰۰ دانه (گرم) گوار

Figure 7- Interaction effect of planting date and landrace on 100-seed weight (g) of guar
 میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.
 Means with the same letter are not significantly different based on the LSD test ($P \leq 0.05$).

(۴۳ درصد) و در نهایت افت عملکرد ۶۲ درصدی نشان داد. نکته قابل توجه این است که این فروپاشی عملکرد با وجود پایداری سطح برگ (کاهش تنها سه درصد) رخ داد که نشان‌دهنده محدودیت در تخصیص مواد فتوسنتزی به مخزن‌ها تحت تنش است.

در نقطه مقابل، توده گرمیت راهبرد کاملاً متفاوتی را به نمایش گذاشت و به‌عنوان یک ژنوتیپ هوشمند و پایدار معرفی گردید. این توده با بهره‌گیری از راهبرد فنولوژیک فرار از تنش (تکمیل چرخه زندگی در ۸۴ تا ۹۴ روز) و حفظ پایداری در صفات کلیدی مانند سطح برگ (افت تنها ۱۳ درصد) و اجزای عملکرد، توانست عملکرد خود را با یک شیب ملایم (کاهش تنها ۳۶ درصد) حفظ کند. برتری عملکردی توده گرمیت در شرایط تنش‌زای کاشت تأخیری (تولید ۱۵۳۵ کیلوگرم در هکتار در کاشت سوم، حدود ۱/۵ برابر توده سرباز) آن را به گزینه‌ای قابل اعتماد برای مدیریت ریسک و تضمین تولید پایدار در شرایط آب‌وهوایی متغیر منطقه تبدیل می‌کند.

بنابراین، برای کشاورزان منطقه سراوان، کاشت توده گرمیت به‌دلیل پایداری بالای عملکرد و تحمل به شرایط نامساعد انتهایی فصل، به‌عنوان یک گزینه کم‌ریسک و مطمئن توصیه می‌شود. با این حال، در صورت امکان کاشت زود هنگام در تاریخ بهینه (۱۵ اسفند)، توده سرباز می‌تواند پتانسیل دستیابی به حداکثر عملکرد را فراهم آورد. این نتایج بر اهمیت حیاتی ارزیابی و بهره‌گیری از ذخایر ژنتیکی بومی برای شناسایی صفات مطلوب سازگاری و پایداری در برنامه‌های به‌نژادی آینده تأکید دارد.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی مصوب دانشگاه سراوان (شماره طرح ۱۲۱۷۰) با عنوان «امکان‌سنجی کشت گوار در تاریخ‌های کاشت و تراکم‌های مختلف در جنوب شرق ایران» انجام شده است. لذا از مدیریت پژوهشی دانشگاه سراوان کمال تشکر و قدرانی را داریم.

در مقابل، توده گرمیت نیز کاهش قابل توجهی را تجربه کرد. وزن دانه این توده با تأخیر در کاشت، از ۵/۲۴ گرم به ۳/۲۱ گرم (کاهش حدوداً ۳۹ درصدی) رسید. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه عملکرد نهایی گرمیت در شرایط تنش بالاتر بود (به‌دلیل حفظ تعداد دانه بیشتر)، اما هر دو توده در فرآیند پُر کردن دانه‌ها تحت تأثیر منفی تنش قرار گرفتند. کاهش وزن دانه در اثر تأخیر در کاشت، به‌طور گسترده به کوتاه شدن دوره پُر شدن دانه به‌دلیل افزایش دما نسبت داده می‌شود (Avola et al., 2020). برتری توده گرمیت در این شرایط، ممکن است به توانایی بالاتر آن در انتقال مجدد مواد ذخیره‌شده از ساقه و برگ به دانه‌ها مرتبط باشد. این رفتار می‌تواند به توانایی بهتر در انتقال مجدد مواد ذخیره‌شده از اندام‌های رویشی به دانه‌ها مرتبط باشد. بنابراین، اگرچه توده سرباز در شرایط مطلوب پتانسیل بالایی دارد، اما توده گرمیت به‌دلیل پایداری در پُر کردن دانه‌ها، توده قابل اعتمادتری برای شرایط متغیر و تنش‌زای محیطی محسوب می‌شود. این تنوع گسترده در صفات زراعی در بین ژرم‌پلاسما گوار، همان‌طور که در هند (Suthar et al., 2018) گزارش شده است، نشان‌دهنده پتانسیل بالای توده‌های بومی برای شناسایی صفات مطلوب جهت برنامه‌های اصلاحی آینده است.

نتیجه‌گیری

انتخاب تاریخ کاشت مناسب و ژنوتیپ سازگار، از جمله ارکان اصلی مدیریت موفق تولید گوار در مناطق خشک است. نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان داد که واکنش توده‌های بومی گوار به تاریخ کاشت یکسان نبوده و وجود اثر متقابل معنی‌دار ژنوتیپ در محیط، تعیین‌کننده راهبرد بهینه برای دستیابی به عملکرد پایدار است.

توده سرباز، علی‌رغم پتانسیل ژنتیکی بالا و دستیابی به حداکثر عملکرد دانه (۲۶۸۹ کیلوگرم در هکتار) در تاریخ کاشت بهینه (۱۵ اسفند)، به‌عنوان یک ژنوتیپ پرریسک و حساس به تنش شناخته شد. تأخیر در کاشت منجر به کاهش شدید اجزای عملکرد این توده گردید که خود را در قالب کاهش تعداد غلاف (۲۱ درصد)، تعداد دانه در بوته

References

- Avola, G., Riggi, E., Trostle, C., Sortino, O., & Gresta, F. (2020). Deficit Irrigation on guar genotypes (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.): Effects on Seed yield and water use efficiency. *Agronomy*, 10(6), 789. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060789>
- Bianchi, J. S., Quijano, A., Gosparini, C. O., & Morandi, E. N. (2020). Changes in leaflet shape and seeds per pod modify crop growth parameters, canopy light environment, and yield components in soybean. *The Crop Journal*, 8(2), 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.09.011>
- Borrás, L., Slafer, G. A., & Otegui, M. A. E. (2004). Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: A quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, 86(2), 131–146. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.08.002>
- Carrera, C. S., Savin, R., & Slafer, G. A. (2024). Critical period for yield determination across grain crops. *Trends*

- in *Plant Science*, 29(3), 329–342. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.08.012>
5. Cho, Y. B., Stutz, S. S., Jones, S. I., Wang, Y., Pelech, E. A., & Ort, D. R. (2023). Impact of pod and seed photosynthesis on seed filling and canopy carbon gain in soybean. *Plant Physiology*, 193(2), 966–979. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad324>
6. Gresta, F., Ceravolo, G., Presti, V. L., D'Agata, A., Rao, R., & Chiofalo, B. (2017). Seed yield, galactomannan content and quality traits of different guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) genotypes. *Industrial Crops and Products*, 107, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.037>
7. Gresta, F., Sortino, O., Santonoceto, C., Issi, L., Formantici, C., & Galante, Y. M. (2013). Effects of sowing times on seed yield, protein and galactomannans content of four varieties of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) in a Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products*, 41, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.007>
8. Hussain, I., Ali, M., Ghoneim, A. M., Shahzad, K., Farooq, O., Iqbal, S., Nawaz, F., Ahmad, S., Bárek, V., Brestic, M., Al Obaid, S., Fahad, S., Danish, S., Taban, S., AkÇA, H., & Datta, R. (2022). Improvement in growth and yield attributes of cluster bean through optimization of sowing time and plant spacing under climate change scenario. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(2), 781–792. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.018>
9. Kalyani, D. L. (2025). Performance of cluster bean genotypes under varied time of sowing. *Legume Research*, 35(2), 154–158.
10. Mahdipour-Afra, M., AghaAlikhani, M., Abbasi, S., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2021). Growth, yield and quality of two guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) ecotypes affected by sowing date and planting density in a semi-arid area. *Plos One*, 16(9), e0257692. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257692>
11. Nakhaei, A., & Baradaran, R. (2025). Effect of Planting date and plant density on growth characteristics and yield components of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) in Birjand region. *Journal of Agroecology*, 17(2), 181–200. <https://doi.org/10.22067/agry.2022.77801.1120>
12. Pathak, R., & Roy, M. M. (2015). Climatic Responses, environmental indices and interrelationships between qualitative and quantitative traits in clusterbean *Cyamopsis tetragonoloba* (L) Taub. under arid conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 85(1), 147–154. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0269-4>
13. Ravelombola, W., Manley, A., Adams, C., Trostle, C., Ale, S., Shi, A., & Cason, J. (2021). Genetic and genomic resources in guar: A review. *Euphytica*, 217(11), 199. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02929-2>
14. Richards, R. A. (2006). Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agricultural Water Management*, 80(1), 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.013>
15. Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S. P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., Farahani, J., & Qiang, Z. (2010). Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*, 97(4), 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.009>
16. Sadras, V. O., & Calderini, D. F. (2015). Chapter 1 - Crop physiology: applications for breeding and agronomy. In V. O. Sadras & D. F. Calderini (Eds.). *Crop Physiology* (Second Ed.). pp. 1-14. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00001-7>
17. Saini, H. S., & Westgate, M. E. (1999). Reproductive Development in Grain Crops during Drought. In D. L. Sparks (Ed.). *Advances in Agronomy*, 68, 59–96. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60843-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60843-3)
18. Sharma, R., Mahla, H. R., Kumar, S., & Gaikwad, K. (2021). Study of correlation, path coefficient and linkage of flower colour and hairiness with yield controlling quantitative traits in segregating population of cluster bean. *Current Plant Biology*, 26, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100202>
19. Suthar, J. D., Rajpar, I., Ganjegunte, G. K., & Shah, Z. U. H. (2018). Evaluation of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) genotypes performance under different irrigation water salinity levels: Growth parameters and seed yield. *Industrial Crops and Products*, 123, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.084>

Contents

Research Articles

- Comparison of the Effect of Single and Combined Application of Organic, Chemical fertilizers and Slurry on Yield, Yield Components, and Essential Oil of the Coriander (*Coriandrum sativum* L.) as a Medicinal Plant under Mashhad Conditions** 299
Z. Farimaneh, P. Rezvani Moghaddam, S. Khorramdel
- Enhancing Quinoa (*Chenopodium quinoa*) Growth and Yield Through Seed Pretreatment and Foliar Application of Serine and Glutamine** 315
R. Rabei, M. Baradaran Firouzabadi, M. Heidari
- Investigating the Integrated Management of Sulfur Element and Organic Fertilizer on the Yield and Yield Components of Oilseed Flax (*Linum usitatissimum*) in the Ahvaz Conditions** 331
L. Naseri Magham, E. Fateh, A. Ayneband
- Investigation of Factors Causing Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Yield Gap in Behshahr County Using CPA Method** 345
M. Mahdavi Abdolmaleki, A. Soltani, E. Zeinali, S. Jafar Nodeh
- The Response of Some Growth Indices, Yield and Forage Quality of Two Varieties of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to Different Levels of Plant Density in the Bavi region, Khuzestan Province** 363
H. Sharifat, M. R. Moradi-Telavat, A. Koochekzadaeh, A. Moshattati, H. Aboodeh
- The Effects of Mycorrhizal Fungi and Plant Growth-Promoting Bacteria on Photosynthetic Pigments, Antioxidant Enzymes, and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Different Irrigation Regimes** 375
A. Tobeh, A. Tobeh, S. Farzaneh
- Evaluation of the Combined Effect of Biochar-Based Organic Fertilizer and Chemical Fertilizer on the Yield of Cumin (*Cuminum cyminum* L.)** 389
Gh. Amini, M. A. Behdani, M. Askary, M. H. Sayyari Zahan, M. Khazaei
- Contrasting Agronomic Responses of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) Native Landraces to Planting Date: A Risk Management Strategy for Drought Stress** 403
S. R. Amiri, Kh. Salimi, N. Zakeri, T. Yousefi, S. Nazarzaei

Iranian Journal of Field Crops Research

Ferdowsi University of Mashhad
Center of Excellence for Special Crops (CESC)

Vol. 24

No. 3

2026

Publisher	Ferdowsi University of Mashhad
Managing	P. Rezvani Moghaddam (Agroecology) Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Editor- in-chief	H.R. Khazaei (Crop Physiology) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board

AghaAlikhani, M.	Department of Cultivation, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Ehsanzadeh, P.	Department of Agronomy & Plant Breeding, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
Emam, Y.	Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Iran
Bagheri, A.	Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Behdani, M.A.	Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran
Banayan Awal, M.	Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Jami Alahmadi, M.	Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran
Raei, Y.	Department of Plant Eco physiology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
Rahimian-Mashhadi, H.	Department of Agriculture, Tehran University, Iran
Zamani, Gh.R.	Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran
Zare- Feizabadi, A.	Agriculture and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi Province, Iran
Shahriari-Ahmadi, F.	Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Kafi, M.	Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Nezami, A.	Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Khazaei, H.R.	Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Eyshi Rezaei, E.	Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research: Müncheberg, Brandenburg, Germany
Lashakri, A.	Crop modeling
Bazrgar, A.B.	John Innes Centre, Norwich Research Park, Norwich, UK
	School of Environmental Sciences, University of Guelph, Canada

Address: Iranian Journal of Field Crops Research Ferdowsi University of Mashhad Faculty of Agriculture
Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775-1163

Email: cesc@um.ac.ir

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



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol.24 No.3

2026

Iranian Journal of Field Crops Research

ISSN:2008-1472

Contents

Research Articles

- Comparison of the Effect of Single and Combined Application of Organic, Chemical fertilizers and Slurry on Yield, Yield Components, and Essential Oil of the Coriander (*Coriandrum sativum* L.) as a Medicinal Plant under Mashhad Conditions 299**
Z. Farimaneh, P. Rezvani Moghaddam, S. Khorramdel
- Enhancing Quinoa (*Chenopodium quinoa*) Growth and Yield Through Seed Pretreatment and Foliar Application of Serine and Glutamine 315**
R. Rabei, M. Baradaran Firouzabadi, M. Heidari
- Investigating the Integrated Management of Sulfur Element and Organic Fertilizer on the Yield and Yield Components of Oilseed Flax (*Linum usitatissimum*) in the Ahvaz Conditions 331**
L. Naseri Magham, E. Fateh, A. Ayneband
- Investigation of Factors Causing Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Yield Gap in Behshahr County Using CPA Method..... 345**
M. Mahdavi Abdolmaleki, A. Soltani, E. Zeinali, S. Jafar Nodeh
- The Response of Some Growth Indices, Yield and Forage Quality of Two Varieties of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to Different Levels of Plant Density in the Bavi region, Khuzestan Province 363**
H. Sharifat, M. R. Moradi-Telavat, A. Koochekzadaeh, A. Moshattati, H. Aboodeh
- The Effects of Mycorrhizal Fungi and Plant Growth-Promoting Bacteria on Photosynthetic Pigments, Antioxidant Enzymes, and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Different Irrigation Regimes..... 375**
A. Tobeh, A. Tobeh, S. Farzaneh
- Evaluation of the Combined Effect of Biochar-Based Organic Fertilizer and Chemical Fertilizer on the Yield of Cumin (*Cuminum cyminum* L.)..... 389**
Gh. Amini, M. A. Behdani, M. Askary, M. H. Sayyari Zahan, M. Khazaei
- Contrasting Agronomic Responses of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) Native Landraces to Planting Date: A Risk Management Strategy for Drought Stress 403**
S. R. Amiri, Kh. Salimi, N. Zakeri, T. Yousefi, S. Nazarzaei