



نشریه علمی پژوهشهای زراعی ایران

شماره ۲

جلد ۲۴

سال ۱۴۰۵

(شماره پیاپی: ۸۲)

شاپا: ۱۴۷۲-۲۰۰۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- القای تحمل به شوری در گیاه ذرت (*Zea mays*) در حضور قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* جداسده از بذر کوشیا (*Bassia scoparia* (L.)) ۱۵۱
فرناز ابراهیمی فر، فرج الله شهریار، محمد کریم هراتی، علیرضا سیفی
- اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای ۱۶۵
نیلوفر براتی، مسعود رفیعی، مرجان دیانت، محمدرضا اردکانی، وریا ویسانی
- بررسی اثرات حفاظتی سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر سمیت نانوذرات نقره، در سویا (*Glycine max* L.) ۱۸۵
سعید معیری، مهدی برادران فیروزآبادی، مهدیه پارسائیان، احمد غلامی، حسن مکاریان
- واسنجی، ارزیابی و تعیین اعتبار مناسب‌ترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.) تحت شرایط کاربرد کودهای زیستی: رهیافتی بین‌رشته‌ای ۲۰۷
محسن جهان
- ارزیابی عملکرد و خصوصیات زراعی ارقام و لاین‌های پیشرفته سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) تحت تنش شوری در منطقه سیستان ۲۳۵
احمد قاسمی، محمدرضا نارویی راد، محمود محمدقاسمی، هادی سیاسر
- تأثیر مداخلات تاپ بر عملکرد دانه، کیفیت بذر و ویژگی‌های فیزیولوژیک دو رقم سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) آزادگرده‌افشان ۲۵۱
حسن علیشاهی، مجید آقاعلیخانی، فرید گل‌زردی، فواد مرادی
- واسنجی و تعیین اعتبار مدل SSM-iCrop 2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد عدس (*Lens culinaris* Medik.) ۲۶۵
زینب امانی، فرزاد متدنی، مختار قبادی
- ارزیابی محلول‌پاشی سیتوکینین، آهن، روی و سلنیوم بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش خشکی ۲۸۳
امیر فریدنیا، فرزاد پاک‌نژاد، مهدی صادقی شعاع، محمد نبی ایلکابی، فیاض آفایاری

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 ۲

جلد ۲۴

دانشگاه فردوسی مشهد

صاحب امتیاز:

پرویز رضوانی مقدم

مدیر مسئول:

حمیدرضا خزاعی

سر دبیر:

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

امیربهادر 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

- ۱۵۱ القای تحمل به شوری در گیاه ذرت (*Zea mays*) در حضور قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* جدا شده از بذر کوشیا (*Bassia scoparia* L.)
فرناز ابراهیمی فر، فرج الله شهریاری، محمد کریم هراتی، علیرضا سیفی
- ۱۶۵ اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای
نیلوفر براتی، مسعود رفیعی، مرجان دیانت، محمدرضا اردکانی، وریا ویسانی
- ۱۸۵ بررسی اثرات حفاظتی سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر سمیت نانوذرات نقره، در سویا (*Glycine max* L.)
سعید معیری، مهدی برادران فیروزآبادی، مهدیه پارسائیان، احمد غلامی، حسن مکاریان
- ۲۰۷ واسنجی، ارزیابی و تعیین اعتبار مناسب‌ترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.) تحت شرایط کاربرد کودهای زیستی: رهیافتی بین‌رشته‌ای
محسن جهان
- ۲۳۵ ارزیابی عملکرد و خصوصیات زراعی ارقام و لاین‌های پیشرفته سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) تحت تنش شوری در منطقه سیستان
احمد قاسمی، محمدرضا نارویی راد، محمود محمدقاسمی، هادی سیاسر
- ۲۵۱ تأثیر مداکس‌تاپ بر عملکرد دانه، کیفیت بذر و ویژگی‌های فیزیولوژیک دو رقم سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L. Moench) آزادگرده‌افشان
حسن علیشاهی، مجید آقاعلیخانی، فرید گل‌زردی، فواد مرادی
- ۲۶۵ واسنجی و تعیین اعتبار مدل SSM-iCrop 2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد عدس (*Lens culinaris* Medik.)
زینب امانی، فرزاد مندنی، مختار قبادی
- ۲۸۳ ارزیابی محلول‌پاشی سیتوکینین، آهن، روی و سلنیوم بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش خشکی
امیر فریدنیا، فرزاد پاک‌نژاد، مهدی صادقی شعاع، محمد نبی ایلکایی، فیاض آقاییاری



Research Article

Vol. 24, No. 2, Summer 2026, p. 149-162

Induction of Salinity Tolerance in Maize (*Zea mays*) Using the Endophytic Fungus *Penicillium chrysogenum* Isolated from *Bassia scoparia*F. Ebrahimifar¹, F. Shahriari¹, M. Harati¹, A. Seifi^{1*}

1- Department of Biotechnology and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

Received: 13 May 2025

Revised: 16 August 2025

Accepted: 14 September 2025

Available Online: 30 September 2025

How to cite this article:Ebrahimifar, F., Shahriari, F., Harati, M., & Seifi, A. (2026). Induction of salinity tolerance in maize (*Zea mays*) using the endophytic fungus *Penicillium chrysogenum* isolated from *Bassia scoparia*. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 149-162. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.93475.1401>**Introduction**

Soil salinity is a major abiotic stress limiting agricultural productivity worldwide, threatening food security particularly in arid and semi-arid regions where irrigation practices and poor drainage exacerbate salt accumulation in the root zone. It is estimated that over 800 million hectares of land are affected by salinity, a figure that continues to rise due to climate change and unsustainable farming practices. High salt concentrations in the soil disrupt plant water uptake, induce ionic toxicity, and cause oxidative damage, ultimately reducing crop yields. Breeding crops for increased tolerance to abiotic stresses is very difficult due to the complexity of inheritance of traits related to tolerance to these stresses, which often involve multiple genes with minor effects and strong interactions with environmental conditions. Consequently, conventional breeding programs have made limited progress in developing salt-tolerant crop varieties. In recent years, non-breeding or non-transgenic approaches such as the use of symbiotic microorganisms in plants have been considered, which has led to increased tolerance to abiotic stresses and achieved promising results. These beneficial microbes can alleviate stress effects through various mechanisms, including phytohormone production, nutrient solubilization, and induction of host defense responses.

Plants have distinct microbial communities in their different organs, including roots, stems, leaves, and seeds, collectively referred to as the plant microbiome. There is a lot of evidence about the role of the microbiome in growth, development, response to biotic and abiotic stresses, and increased adaptation to the environment. In particular, endophytic microorganisms, those that reside within plant tissues, have gained attention as natural partners that can enhance host resilience. Halophytes, plants naturally adapted to high-salinity environments, harbor unique microbial communities that have co-evolved with their hosts under extreme conditions. These halophyte-associated microbes have shown remarkable ability to confer stress tolerance to conventional crops, but the mechanisms remain poorly understood, limiting their practical application. This study investigated the potential of *Penicillium chrysogenum*, an endophytic fungus isolated from seeds of the halophyte *Bassia scoparia*, to improve salinity tolerance in maize (*Zea mays* L.), a globally important cereal crop sensitive to salt stress. Our research aimed to (1) characterize the salt tolerance of *P. chrysogenum* under *in vitro* conditions, (2) evaluate its effects on maize growth under salt stress, and (3) analyze physiological responses in inoculated plants, including ion content and photosynthetic performance.

Materials and Methods

The fungal strain was isolated from surface-sterilized *B. scoparia* seeds collected from saline regions in Iran. Surface sterilization was performed using ethanol and sodium hypochlorite to ensure that only endophytic

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.2025.93475.1401>

microorganisms were recovered. Molecular identification was performed using ITS sequencing of the ribosomal DNA region, and the sequence was compared against public databases to confirm taxonomic affiliation. The salinity tolerance of the fungus was evaluated on potato dextrose agar (PDA) medium containing NaCl concentrations ranging from 0 to 4 M, with radial growth measured daily. Maize seeds (cv. Hido) were surface-sterilized and inoculated with a fungal spore suspension (10^6 spores/mL) or sterile water for controls. Seeds were grown under controlled conditions with three salinity levels (0, 30, and 60 mM NaCl) in a growth chamber. Subsequently, greenhouse tests were conducted under two treatments of 150 mM NaCl and normal irrigation to evaluate performance under more realistic stress levels. Drought tests were also conducted on plants in the greenhouse by withholding irrigation for defined periods. Growth parameters including germination rate, root length, shoot length, and fresh and dry biomass were recorded. Ion content (Na^+ , K^+) was determined using flame photometry, and photosynthetic parameters such as chlorophyll content and net photosynthetic rate were measured using a portable photosynthesis system. Experiments included laboratory, growth chamber, and greenhouse trials with five replicates per treatment arranged in a completely randomized design. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's honestly significant difference test ($p < 0.05$) for mean comparisons.

Results and Discussion

In this study, an endophytic fungus, identified by ITS sequencing as *Penicillium chrysogenum*, was isolated from the seed microbiome of the halophyte *B. scoparia*. This fungus exhibited optimal growth at 1 M NaCl, with substantial mycelial development even at 2 M, indicating strong halotolerance superior to many soil saprophytes. Although it did not significantly affect seed germination percentage or rate, fungal inoculation improved early seedling growth traits and biomass under both saline and normal conditions, suggesting that the primary benefits occur after emergence. Greenhouse experiments confirmed its positive effects on shoot and root development under salt stress, while no beneficial effects were observed under drought conditions, indicating a stress-specific mechanism rather than a general growth promotion effect.

Interestingly, photosynthetic performance and Na^+/K^+ ratios remained unchanged in inoculated plants compared to non-inoculated controls, suggesting that the fungus may enhance salt tolerance through mechanisms such as salt detoxification via osmotic adjustment, enhancement of antioxidant enzyme activity, or production of fungal metabolites that protect cellular structures, rather than altering ion uptake or transport. Given the fungus's native origin from a halophyte host and its potential role in stress adaptation, *P. chrysogenum* represents a promising candidate for developing biological solutions to improve crop resilience in saline environments. Further field trials and molecular studies are recommended to optimize its application, including dose-response experiments and transcriptomic analysis of host plant responses.

Conclusion

This study demonstrated that *Penicillium chrysogenum*, an endophytic fungus isolated from the halophyte *Bassia scoparia*, can promote maize growth under salt stress. Despite no significant effect on germination rate, fungal inoculation improved seedling establishment and biomass production in both normal and saline conditions. The fungus showed strong halotolerance and may enhance salt stress resilience through mechanisms unrelated to ion uptake or photosynthetic changes, potentially involving detoxification pathways or antioxidant activity. Given its native origin and efficacy under saline conditions, *P. chrysogenum* holds potential as a bio-inoculant for improving crop performance in salt-affected soils. Further field trials and molecular studies are recommended to better understand and harness its functional mechanisms for agricultural application.

Keywords: Biomass, Halophytes, Osmotic stress, Seed microbiome

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱۶۲-۱۴۹

القای تحمل به شوری در گیاه ذرت (*Zea mays*) در حضور قارچ اندوفیت
Penicillium chrysogenum جداشده از بذر کوشیا (*Bassia scoparia* (L.))

فرناز ابراهیمی فرا^۱، فرج الله شهریاری^۱، محمدکریم هراتی^۱، علیرضا سیفی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* جداشده از بذر گیاه مقاوم به شوری کوشیا (*Bassia scoparia*)، بر بهبود به تحمل شوری در ذرت (*Zea mays*) انجام شد. پس از شناسایی مولکولی قارچ، تحمل آن به شوری در محیط کشت دارای NaCl (صفر تا چهار مولار) ارزیابی شد. بیشترین رشد قارچ در غلظت یک مولار NaCl مشاهده گردید. بذور ذرت با اسپورهای قارچ تلقیح و در شرایط بدون شوری و شرایط تنش شوری (۱۵۰ میلی مولار NaCl) در آزمایشگاه، اتاقک رشد و گلخانه کشت شدند. نتایج نشان داد که تلقیح قارچ موجب افزایش معنی دار طول ریشه و وزن تر و خشک گیاه شد. در گلخانه، وزن تر اندام هوایی و ریشه در گیاهان تلقیح شده به ترتیب ۲۲۳ و ۱۳۸ درصد افزایش یافت. اما تحت تنش خشکی، قارچ اثر منفی بر رشد ذرت داشت. هیچ تفاوت معنی داری در غلظت سدیم، پتاسیم و پارامترهای فتوسنتزی بین گیاهان تلقیح شده و شاهد مشاهده نشد. به نظر می رسد که سازوکار اثر قارچ شامل تنظیم غیرمستقیم فیزیولوژیکی مانند بهبود جذب عناصر غذایی، تولید ترکیبات محرک رشد یا تنظیم بیان ژن های مرتبط با تحمل تنش است. این تحقیق، استفاده از اندوفیت های بومی مانند *P. chrysogenum* را به عنوان راهکاری زیستی برای بهبود عملکرد گیاهان در خاک های شور پیشنهاد می کند.

واژه های کلیدی: تنش اسمزی، زیست توده، میکروبیوم بذر، هالوفیت ها

مقدمه

شوری خاک یک چالش زیست محیطی بحرانی است که براساس آمار فائو، عاملی محدودکننده برای کشاورزی در تقریباً ۲۰ درصد از اراضی زراعی جهان محسوب می شود (FAO, 2021). تنش شوری با کاهش پتانسیل آب در خاک و برهم زدن تعادل یونی و تجمع گونه های فعال اکسیژن در گیاه، فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه را مختل کرده و در نهایت باعث کاهش رشد و عملکرد محصول می شود (Nusrat Bibi et al., 2019; Zeng et al., 2023). افزایش غلظت یون های سدیم و کلر در خاک، جذب یون های ضروری مانند پتاسیم و کلسیم را کاهش می دهد و این عدم تعادل یونی عملکرد

آنزیم ها و فرآیندهای متابولیکی گیاه را مختل می کند (Isayenkov & Maathuis, 2019). در واکنش به این شرایط، گیاهان با فعال سازی مجموعه ای از سازوکارهای زیستی و مولکولی تلاش می کنند که اثرات تنش شوری را کاهش دهند (Ahmed et al., 2024).

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از مهم ترین غلات در سراسر جهان است که به عنوان منبع اصلی غذا، خوراک دام و مواد خام صنعتی استفاده می شود و نقش مهمی در امنیت غذایی ایفا می کند (Ranum et al., 2014). تنش های محیطی به ویژه شوری خاک در مناطق خشک و نیمه خشک تأثیر چشمگیری بر کاهش عملکرد ذرت دارند (Farooq et al., 2015). اصلاح گیاهان زراعی به منظور افزایش تحمل به تنش های غیرزیستی به دلیل پیچیدگی وراثت صفات مرتبط با تحمل به این تنش ها دشوار است (Zafar et al., 2017). در سال های اخیر، راهکارهای غیرژنتیکی مانند استفاده از ریزجانداران همزیست برای افزایش تحمل به تنش های غیرزیستی در گیاهان مورد توجه قرار گرفته اند (Rodriguez et al., 2008). گیاهان در

۱- گروه بیوتکنولوژی و به نژادی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: arseifi@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.93475.1401>

2- ROS: Reactive oxygen species

Phomopsis، *Fusarium Aspergillus*، *Talaromyces*، *Trichoderma*، *Alternaria*، *Paecilomyces*، *Colletotrichum*، و *Cercospora* می‌باشند (Zhong et al., 2024). به‌عنوان مثال، سویه *Penicillium sp.* NAUSF2 در شرایط تنش شوری با افزایش انحلال فسفات و تولید فیتوهورمون‌ها و سیدروفورها موجب بهبود رشد گیاه ماش (*Vigna radiata*) شد (Patel et al., 2021). همچنین قارچ اندوفیت *Porostereum spadiceum* AGH786 با تولید جیبرلین، تحمل سویا به شوری را افزایش داده و رشد آن را با تنظیم هورمون‌ها و افزایش ایزوفلاون‌های مفید بهبود بخشید (Hamayun et al., 2017).

استفاده از میکروبیوم‌های مقاوم گیاهی یک راهکار بیوتکنولوژیکی پایدار^۱ برای افزایش بهره‌وری محصولات و مواد غذایی تحت شرایط تنش محیطی است (Zhang et al., 2022). گیاهان هالوفیت، گروهی از گیاهان مقاوم به شوری هستند که توانایی رشد و تولیدمثل در محیط‌هایی با غلظت بالای نمک را دارند. این گیاهان از طریق سازوکارهایی مانند تنظیم اسمزی، دفع یون‌های سمی، افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و تنظیم بیان ژن، قادر به بقا در شرایط شدید شوری هستند (Flowers et al., 2015). یکی از گونه‌های برجسته در میان هالوفیت‌ها، *Bassia scoparia* L. (کوشیا) است؛ گیاهی یک‌ساله با قابلیت تحمل بالا به شوری و خشکی که به‌طور گسترده در زیستگاه‌های شور و نیمه‌خشک رشد می‌کند (Kumar et al., 2021). جوانه‌زنی این گیاه حتی در غلظت‌های بسیار بالای نمک (تا ۸۰۰ میلی‌مولار NaCl) نیز موفقیت‌آمیز گزارش شده و رشد گیاهچه‌های آن تا ۶۰۰ میلی‌مولار شوری تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد (Khan et al., 2009). علاوه بر این، گیاه بالغ قادر به تحمل و بقا در سطوح شوری بیش از ۱۸۰۰ میلی‌مولار است، اگرچه با کاهش رشد همراه است (Gul et al., 2010). ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی منحصربه‌فرد این گیاه از جمله توانایی ذخیره یون سدیم در واکوئل‌ها، عملکرد سلولی آن را تحت شرایط شوری حفظ می‌کند و این امر آن را به منبعی ارزشمند برای جداسازی ریزجانداران همزیست به‌ویژه اندوفیت‌های قارچی مقاوم به شوری تبدیل کرده است (Munns & Tester, 2008; Zeng et al., 2023).

گیاهان هالوفیت به‌دلیل زیست در محیط‌های شور، میزبان جمعیت‌های متنوعی از ریزجانداران همزیست از جمله اندوفیت‌ها هستند که به‌طور طبیعی با شرایط تنش‌زا مانند شوری سازگار شده‌اند. این اندوفیت‌ها می‌توانند نقش مؤثری در بهبود رشد و افزایش تحمل گیاهان زراعی نسبت به تنش‌های محیطی ایفا کنند. در مطالعه‌ای، فورتادو و همکاران (Furtado et al., 2019) به بررسی اندوفیت‌های

اندام‌های مختلف خود اجتماعات میکروبی متمایزی دارند که به مجموعه این ریزجانداران میکروبیوتا گفته می‌شود (Bulgarelli et al., 2013; Trivedi et al., 2020). شواهد زیادی درباره نقش ریزجانداران همزیست در رشد، نمو، پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی و افزایش سازگاری با محیط وجود دارد (Paasch & He, 2021). به‌عنوان مثال، باکتری *Bacillus pumilus* به‌عنوان یک باکتری محرک رشد گیاهی در شرایط تنش شوری شناخته شده است که با بهبود رشد برنج و ارتقای سلامت خاک، به کاهش اثرات منفی تنش شوری کمک می‌کند (Kumar et al., 2021). قارچ *Penicillium funiculosum* با تولید اسیدهای آلی و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه موجب بهبود رشد گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa*) در شرایط شوری شده است (Jin et al., 2022).

امروزه مشخص شده است که بذرها حاوی ریزجانداران مفید گیاهی هستند که بسیاری از آن‌ها به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در فرآیندهای فیزیولوژیکی پایه مانند خواب بذر، سازگاری با محیط، مقاومت و تحمل به بیماری‌ها و بهبود رشد نقش دارند (Verma et al., 2019). قارچ‌های اندوفیت به‌صورت همزیست درون بذرها حضور دارند و می‌توانند به‌طور مؤثری رشد گیاه و تحمل آن نسبت به تنش‌های محیطی را افزایش دهند (Zhong et al., 2024). به‌عنوان نمونه، قارچ اندوفیت *Epichloë bromicola* با جو وحشی (*Hordeum spontaneum*) مقاوم به شوری (*Hordeum brevisubulatum*) رابطه همزیستی پایدار برقرار می‌کند. این قارچ با ایجاد تغییرات آناتومیک مانند تقویت ساختارهای سلولی و اصلاح پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه در مواجهه با تنش شوری، از جمله افزایش ارتفاع گیاه، زیست‌توده ساقه، سطح کلروفیل و تجمع متابولیت‌های سازگار با تنش، نقش مؤثری در افزایش تحمل گیاه به شوری ایفا می‌کند (Wang et al., 2022).

اندوفیت‌های منتقل‌شونده از طریق بذر به‌دلیل توانایی تولید فیتوهورمون‌ها، آنزیم‌ها، ترکیبات ضد میکروبی و سایر متابولیت‌های ثانویه مورد توجه هستند (Shahzad et al., 2018) که با ترشح آلکالوئیدهای ضد قارچ و آفت‌کش‌ها، گیاهان را در برابر انواع بیماری و آفات مقاوم می‌کنند (Dey et al., 2022). تاکنون، قارچ‌های اندوفیت متعددی مرتبط با بذرها، گیاهان در میزبان‌های مختلف مانند برنج (*Oryza sativa*)، ذرت (*Zea mays*)، کینوا (*Chenopodium quinoa*)، جو (*Hordeum vulgare*)، گندم (*Triticum aestivum*)، سویا (*Glycine max*)، انگور (*Vitis vinifera*)، کدو (*Cucurbita pepo*) و صنوبر (*Populus alba*) شناسایی شده‌اند (Dos Reis et al., 2022; Nečajeva et al., 2023). فراوان‌ترین آن‌ها متعلق به شاخه‌های آسکومیست و بازیدیومیست هستند و عمدتاً شامل جنس‌های *Rhizoctonia*، *Mucor*، *Penicillium* و

میکرومولار از هر پرایمر، و ۱۰۰ نانوگرم از DNA قارچی استخراج شده به عنوان الگو انجام گردید. برنامه PCR شامل دناتوراسیون اولیه در ۹۵ درجه سانتیگراد به مدت چهار دقیقه، ۳۰ چرخه شامل دناتوراسیون در ۹۴ درجه برای ۳۰ ثانیه، اتصال پرایمرها در ۶۰ درجه به مدت ۳۰ ثانیه، و طولی سازی در ۷۲ درجه به مدت ۳۰ ثانیه، و در نهایت یک مرحله طولی سازی نهایی در ۷۲ درجه برای پنج دقیقه بود. محصولات PCR روی ژل آگارز یک درصد در بافر TAE تفکیک شدند. سپس محصولات PCR توسط شرکت نیازن نور (تهران) توالی یابی شده و توالی های به دست آمده با پایگاه داده NCBI (بانک ژن ITS) مقایسه شدند.

ارزیابی تحمل به شوری قارچ *Penicillium chrysogenum*

برای ارزیابی تحمل به شوری قارچ *P. chrysogenum*، مقادیر ۱۰ میکرولیتر از سوسپانسیون اسپور (10^6 اسپور در میلی لیتر) روی محیط های PDA حاوی صفر، یک، دو، سه و چهار مولار NaCl در سه تکرار کشت داده شد (Galeano et al., 2023). قطر کلونی قارچ به عنوان شاخص رشد در روز هفتم پس از کشت اندازه گیری گردید.

ارزیابی تأثیر *P. chrysogenum* بر جوانه زنی بذر ذرت تحت تنش شوری

برای تعیین درصد جوانه زنی بذرهای ذرت تحت شرایط شوری، ابتدا بذرهای شرح فوق الذکر ضد عفونی شدند و سپس با اسپورهای قارچ *P. chrysogenum* پوشش دهی گردید. برای این منظور، یک میلی لیتر از اسپور قارچ با غلظت 10^6 به ۶۰ میلی لیتر محلول ساکاروز ۱۰ درصد اضافه شد. بذرهای ذرت ضد عفونی شده به مدت یک ساعت در این سوسپانسیون غوطه ور شدند تا پوشش دهی کامل انجام گیرد (Ramandi & Seifi, 2023; Shekhawat et al., 2021). بذور پوشش دار شده بر روی کاغذ صافی استریل زیر هود در دمای اتاق خشک شدند. بذرهایی که تنها با محلول ساکاروز ۱۰ درصد پوشش داده شده بودند به عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. سپس بذرهای پوشش دار شده بر روی پلیت حاوی کاغذ صافی استریل مرطوب شده با چهار میلی لیتر NaCl با غلظت های صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی مولار قرار داده شدند و در شرایط تاریکی و دمای ۲۸ درجه سانتیگراد انکوبه شدند. برای هر تیمار سه تکرار و در هر تکرار ۱۵ بذر مورد استفاده قرار گرفت. درصد جوانه زنی با ظهور ریشه چه پس از ۲۴ ساعت ثبت شد و روند ثبت جوانه زنی تا زمان ظهور ریشه تمامی بذرهای شاهد ادامه یافت. علاوه بر این، سه روز پس از ظهور ریشه اولیه، طول ریشه اولیه در سه زمان مختلف اندازه گیری و میانگین آن برای هر تکرار ثبت گردید. در نهایت، وزن تر ریشه برای هر دو گروه تلقیح شده با قارچ و شاهد تحت شرایط نرمال و شوری اندازه گیری شد.

باکتریایی جدا شده از گیاه هالوفیت *Salicornia europaea* پرداختند و نشان دادند که تلقیح گندم با سویه های منتخب این اندوفیت ها منجر به بهبود رشد ریشه و ساقه، افزایش سطح کلروفیل و افزایش تحمل به شوری شد. این نتایج بیانگر آن است که اندوفیت های جدا شده از گیاهان هالوفیت می توانند به عنوان ابزار زیستی مؤثری برای القای تحمل به گیاهان زراعی در برابر شوری مورد استفاده قرار گیرند (Etesami & Beattie, 2017). مطالعه حاضر با هدف جداسازی و شناسایی قارچ های اندوفیت بذر گیاه *Bassia scoparia* و ارزیابی توان آن ها در بهبود رشد گیاه ذرت تحت شرایط تنش شوری، با بهره گیری از پتانسیل میکروبیوم های اندوفیتی بذر انجام شده است.

مواد و روش ها

مواد گیاهی

دو توده بذر کوشیا از یزد و سبزوار از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی شیراز دریافت شد. همچنین بذر ذرت هیبرید رقم هیدو (Hido) از مزرعه دانشگاه فردوسی مشهد تهیه گردید. کلیه فعالیت ها و آزمایش ها در محل آزمایشگاه زیست فناوری کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۳ انجام شد.

جداسازی و شناسایی میکروبیوم اندوفیت بذر

برای جداسازی میکروبیوم اندوفیت بذر کوشیا، ۵۰ میلی گرم بذر در اتانول ۷۰ درصد به مدت ۳۰ ثانیه و سپس در سدیم هیپوکلریت دو درصد به مدت ۱۰ دقیقه برای ضد عفونی سطحی غوطه ور شدند و در نهایت، پنج مرتبه با آب مقطر استریل شست و شو گردید. بذور ضد عفونی شده با پنج میلی لیتر محلول ۰/۹ % NaCl استریل در هاون چینی استریل کوبیده شد. از این عصاره، رقت های 10^{-2} و 10^{-4} تهیه و ۱۰۰ میکرولیتر از آن روی پلیت های هشت سانتی متری حاوی محیط های LB یا PDA (دارای آنتی بیوتیک کلرامفنیکل با غلظت ۲۵ میلی گرم در لیتر) کشت داده شدند. پلیت ها در دمای ۲۸ درجه سانتیگراد به مدت دو تا سه روز برای رشد باکتری ها در محیط LB و به مدت هفت روز برای رشد قارچ ها در محیط PDA انکوبه شدند (Ramandi & Seifi, 2023).

شناسایی مولکولی ایزوله قارچ

شناسایی مولکولی قارچ بر اساس توالی یابی ناحیه ITS و با استفاده از پرایمرهای ITS1 و ITS2 انجام شد (White et al., 1990). پس از تهیه کشت خالص از قارچ، استخراج DNA با استفاده از روش CTAB (Doyle, 1991) انجام شد. واکنش PCR در حجم ۲۵ میکرولیتر حاوی PCR pre-mix (آمپلیکون، دانمارک)، ۰/۴

تأثیر قارچ *P. chrysogenum* بر جوانه‌زنی بذر ذرت در اتاقک رشد

برای بررسی تأثیر قارچ اندوفیت جدا شده بر جوانه‌زنی ذرت، آزمایشی کنترل شده در سینی نشاء حاوی مخلوط پیت‌ماس و پرلیت (به نسبت ۳ به ۱) اتوکلاو شده در اتاقک رشد انجام گردید. برای هر تیمار، پنج گیاهچه (یک گیاهچه در هر گلدان) کشت شدند. پوشش دار کردن بذرهای ذرت مطابق روش گفته شده در پاراگراف قبل، صورت گرفت. آبیاری به دو حالت یکی با آب اتوکلاو شده و دیگری با محلول ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl برای شبیه‌سازی تنش شوری انجام گرفت (Galeano et al., 2023). برای هر تیمار آبیاری پنج تکرار در نظر گرفته شد. آبیاری هر سه روز یک بار انجام گرفت. پس از گذشت ۲۱ روز، شاخص‌های رشد شامل وزن تر و خشک اندام هوایی، ارتفاع اندام هوایی، تعداد برگ‌ها، وزن تر و خشک ریشه اندازه‌گیری و ثبت گردید.

تأثیر قارچ *P. chrysogenum* بر رشد ذرت و تحمل به شوری در گلخانه

مخلوط استریل شده پیت ماس و پرلیت (به نسبت ۳:۱) با سوسپانسیون اسپور *P. chrysogenum* (۱۰^۷ اسپور در کیلوگرم) به مدت ۱۰ روز در تاریکی در دمای اتاق انکوبه شد. پس از استریل سطحی بذور ذرت در پیت ماس استریل در سینی نشاء در اتاقک رشد، تحت فتوپریود ۸/۱۶ (نور/تاریکی) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، کشت شدند. گیاهچه‌های پنج روزه ذرت به گلدان‌های سه لیتری حاوی مخلوط پیت‌ماس و پرلیت تلقیح شده با اسپور قارچ انتقال داده شدند. گیاهان شاهد در مخلوط پیت‌ماس و پرلیت بدون تلقیح با قارچ کشت شدند. تیمارهای آزمایشی شامل شرایط آبیاری نرمال، تنش شوری و تنش خشکی برای هر دو گروه شاهد و تلقیح شده با قارچ، هر کدام با پنج تکرار انجام گردید. برای آبیاری نرمال، آبیاری هر سه روز یک بار در شرایط بهینه خاک (۸۰ درصد ظرفیت زراعی) تا پایان آزمایش انجام گرفت. جهت اعمال تنش خشکی، گیاهان شش روز بعد از کاشت، یک بار آبیاری شدند و از روز ششم با قطع آبیاری به مدت ۱۹ روز در معرض تنش خشکی قرار گرفتند. برای اعمال تنش شوری، گیاهان با آب حاوی ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl هر سه روز یک بار آبیاری شدند.

سنجش شاخص‌های رشد

در پایان آزمایش، ارتفاع گیاه، تعداد برگ‌ها، وزن تر اندام هوایی، وزن ریشه و قطر ساقه پس از ۳۰ روز از کشت اندازه‌گیری شدند. برای تعیین وزن خشک ریشه و اندام هوایی، نمونه‌های گیاهی به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین شدند.

سنجش شاخص‌های فیزیولوژیکی

در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقیق‌تر پاسخ فیزیولوژیکی گیاه ذرت به تلقیح با قارچ *P. chrysogenum*، شاخص‌های فیزیولوژیکی، نرخ فتوسنتز خالص، نرخ تعرق، هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب (WUE)، با استفاده از دستگاه فتوسنتز متر مدل CI 304 CID مورد ارزیابی قرار گرفتند.

اندازه‌گیری یون‌های سدیم (Na⁺) و پتاسیم (K⁺)

غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم در اندام‌های هوایی ذرت با استفاده از روش استاندارد فلیم‌فتومتری تعیین شد. نمونه‌های خشک شده در کوره با دمای ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد خاکستر و سپس در اسید حل گردید. سپس با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر، غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم اندازه‌گیری شد (Asch et al., 2022).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

این مطالعه در قالب طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار برای هر تیمار اجرا شد. عامل‌های مورد بررسی شامل دو سطح شوری (۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl) و دو سطح تلقیح (با قارچ *P. chrysogenum* و بدون تلقیح) بودند که در مجموع شامل چهار تیمار آزمایشی بود. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس (ANOVA) جهت بررسی اثرات اصلی و متقابل فاکتورها انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون توکی (Tukey HSD) در سطح معنی‌داری پنج درصد و با استفاده از نرم‌افزار Minitab انجام شد. ترسیم نمودارها و تحلیل‌های گرافیکی نیز با بهره‌گیری از نرم‌افزار GraphPad Prism 9 انجام گردید.

نتایج

جداسازی قارچ اندوفیت از بذر *B. scoparia*

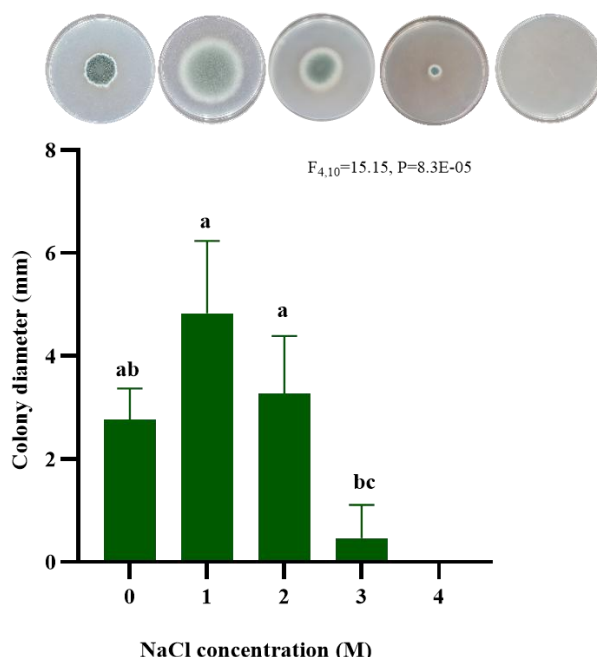
برای جداسازی میکروبیوتای اندوفیت بذر کوشیا، عصاره بذرهای ضدذغفونی شده روی محیط‌های کشت باکتری (LB) و قارچ (PDA) کشت داده شد. نکته جالب توجه این بود که هیچ باکتری رشد نکرد و تنها یک نوع قارچ روی پلیت PDA رشد کرد. نتایج توالی‌یابی ITS قارچ جدا شده نشان داد که توالی ITS این قارچ بیش از ۹۹ درصد شباهت با ITS قارچ *P. chrysogenum* دارد.

تحمل به تنش شوری قارچ *P. chrysogenum*

میزان رشد قارچ *P. chrysogenum* در غلظت‌های مختلف شوری صفر تا چهار مولار NaCl به‌طور معنی‌داری متفاوت بود (۰/۰۵ < p). اندازه‌گیری قطر کلونی قارچ در چهار سطح شوری نشان داد که

قارچ کاهش یافته، به نحوی که در چهار مولار NaCl هیچ رشدی مشاهده نشد (شکل ۱).

رشد قارچ در شرایط یک مولار NaCl به طور قابل توجهی (۷۷ درصد) بیشتر از شرایط بدون شوری بود، ولی با افزایش غلظت نمک رشد



شکل ۱- اثر سطوح مختلف شوری بر رشد قارچ *P. chrysogenum*

Figure 1- Effect of different salinity levels on the growth of *P. chrysogenum*

میانگین‌های دارای حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت‌های آماری معنی‌دار (آزمون توکی، $p \leq 0.05$) هستند

Means followed by different letters indicate statistically significant differences ($P < 0.05$)

گیاهان تیمار شده با *P. chrysogenum* افزایش معنی‌داری در وزن تر اندام هوایی (تا ۵۷ درصد) در مقایسه با گیاهان تیمار نشده نشان دادند ($p \leq 0.05$). همچنین وزن تر ریشه گیاهان تحت تنش شوری مشابه با تیمار قارچ افزایش ۱۰۰ درصد نشان داد (شکل ۳).

اثر تلقیح *Penicillium chrysogenum* بر رشد گیاه ذرت در گلخانه

افزایش رشد در گلخانه نیز مشاهده شد، به طوری که تلقیح قارچ در شرایط نرمال منجر به افزایش وزن تر اندام هوایی (۲۸/۹۴ درصد)، وزن تر ریشه (۶۳/۸۰ درصد) و کل وزن تر گیاه (۴۱/۶۱ درصد) در مقایسه با نمونه‌های شاهد شد. افزایش معنی‌دار در وزن خشک گیاهان تلقیح شده با قارچ نیز مشاهده شد (شکل ۴).

نتایج مربوط به بذره‌های ذرت تحت تنش شوری (۱۵۰ میلی‌مولار NaCl) در گلخانه نشان داد که تلقیح قارچ منجر به افزایش وزن تر اندام هوایی (۲۲۳/۶۲ درصد)، وزن تر ریشه (۱۳۸/۵۱ درصد) و کل وزن تر گیاه (۱۸۶/۸۸ درصد) شد. این افزایش معنی‌دار در وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه گیاهان تلقیح شده با قارچ نیز از نتایج به دست آمد (شکل ۳). نتایج آزمایش‌های گلخانه نشان داد که

اثر قارچ *P. chrysogenum* بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه ذرت تحت تنش شوری

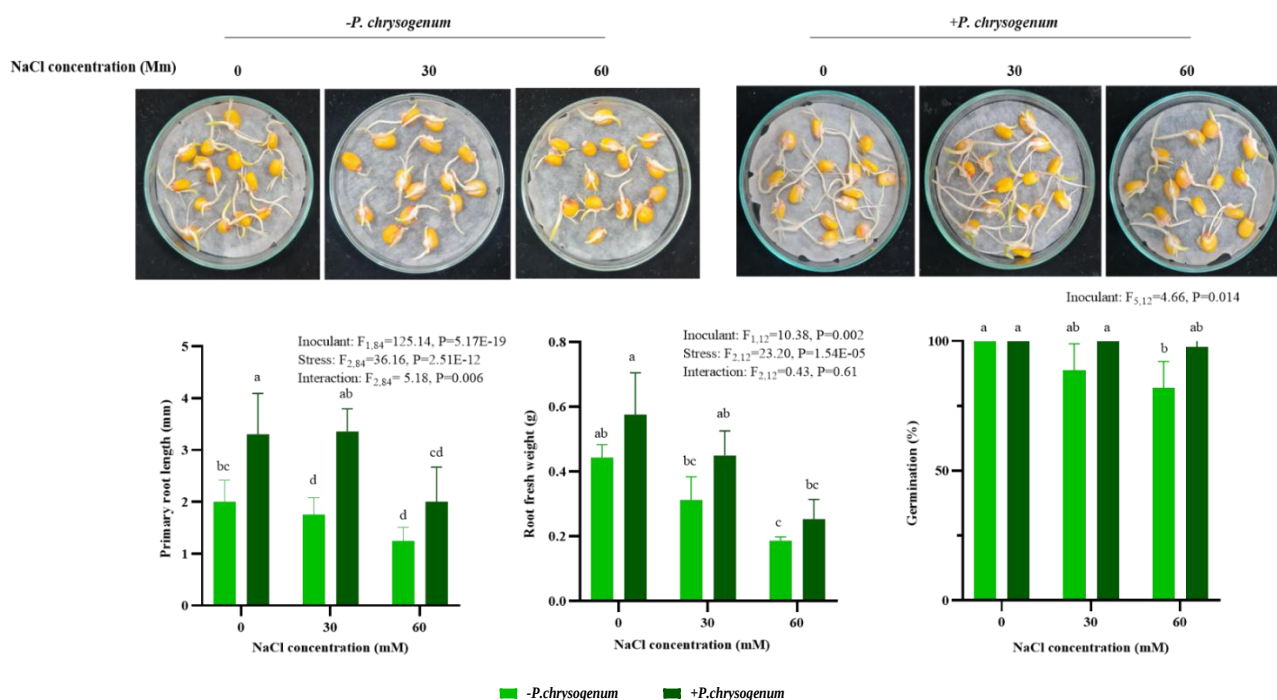
در گام بعدی تأثیر قارچ بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه تحت سطوح مختلف NaCl بررسی شد. قارچ تأثیر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی نداشت، ولی باعث افزایش معنی‌دار شاخص‌های مربوط به استقرار گیاهچه شد (شکل ۲). وزن تر ریشه اولیه در گیاهان تلقیح شده به طور قابل توجهی (۵ درصد/۲۹) افزایش یافت. تحت شوری ۶۰ میلی‌مولار، بذره‌های ذرت تلقیح شده با قارچ، طول ریشه اولیه بیشتری (۵۸/۳ درصد) نسبت به نمونه‌های تلقیح نشده نشان دادند (شکل ۲).

تأثیر *P. chrysogenum* بر زیست‌توده ذرت در اتاقک رشد

اثر تلقیح با قارچ *P. chrysogenum* بر رشد ذرت تحت آبیاری نرمال در اتاقک رشد بررسی شد. نتایج نشان داد که تلقیح با قارچ منجر به افزایش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی (۱۶ درصد)، وزن تر ریشه (۳۴/۹ درصد) و کل وزن تر گیاه (۲۱/۴ درصد) در مقایسه با گیاهان شاهد شد ($p \leq 0.05$) (شکل ۳). نتایج مربوط به رشد ذرت تحت تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl در اتاقک رشد نشان داد که

P . در مقابل، تحت تنش خشکی، بذره‌های تیمار شده با P . *chrysogenum* کاهش ۱۶/۸ درصدی در وزن تر اندام هوایی و کاهش ۱۴۲/۴۲ درصدی در وزن تر ریشه در مقایسه با گیاهان تیمار نشده مشاهده شد. همچنین کل وزن تر گیاه در بذره‌های تیمار شده با P . *chrysogenum* تحت تنش خشکی ۵۲/۷ درصد کاهش یافت (شکل ۴).

بذره‌های ذرت تیمار شده با P . *chrysogenum* افزایش قابل توجهی در طول اندام هوایی (۱۳۶/۱ درصد) تحت تنش شوری در مقایسه با گیاهان تیمار نشده نشان دادند. علاوه بر این، تیمار با P . *chrysogenum* طول اندام هوایی را در گیاهان تحت تنش شوری ۲۶ درصد افزایش داد (شکل ۴). تأثیر قارچ بر ذرت تحت تنش خشکی در گلخانه نیز ارزیابی شد



شکل ۲- اثر تلقیح قارچ *P. chrysogenum* بر درصد جوانه‌زنی بذره‌های ذرت در شرایط نرمال و شوری (۰، ۳۰ و ۶۰ میلی مولار NaCl) در پلیت حاوی کاغذ صافی استریل

Figure 2- Effect of *P. chrysogenum* inoculation on germination percentage of maize seeds under normal (0, 30, and 60 mM NaCl) conditions in sterile filter paper plates

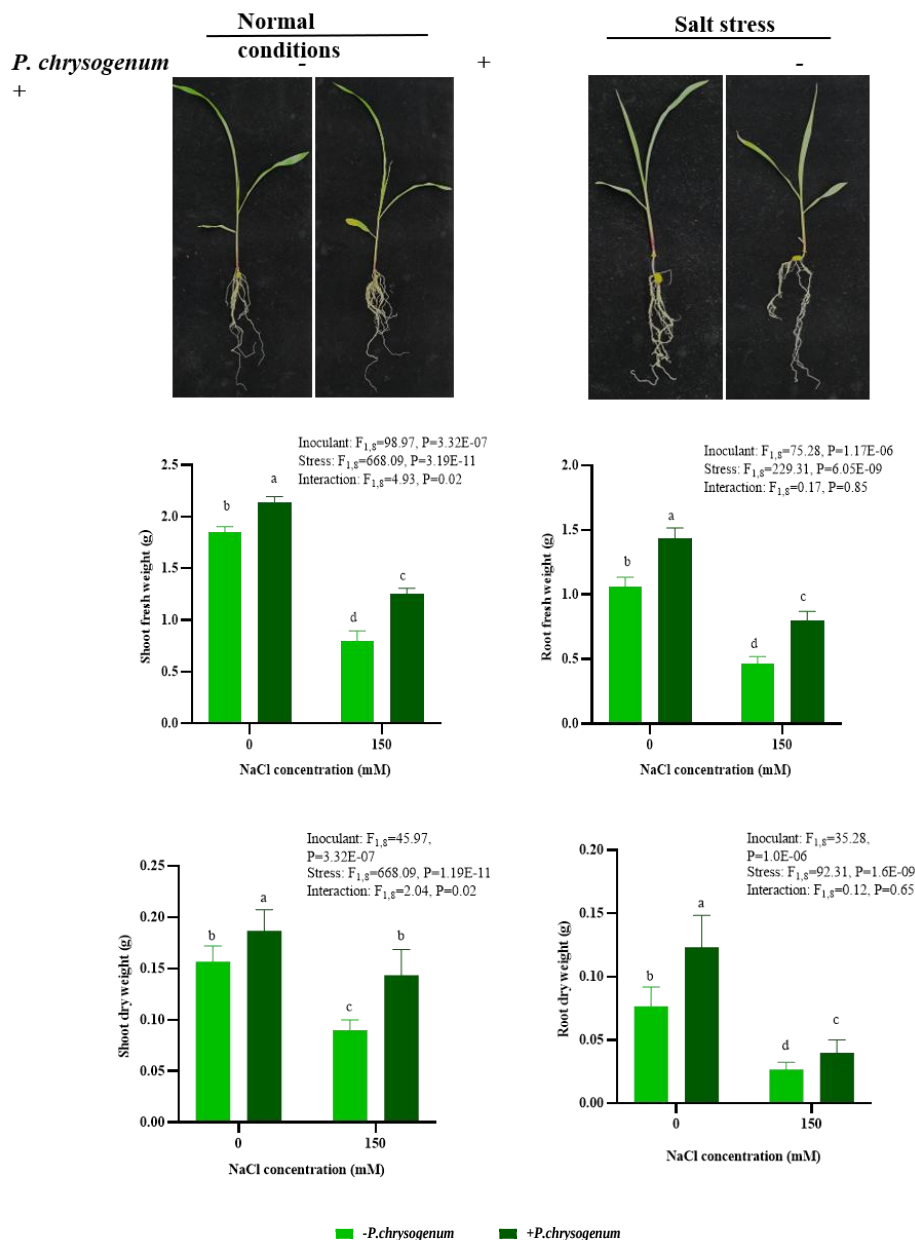
حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت‌های آماری معنی‌دار هستند (آزمون توکی، $p \leq 0.05$).

Different letters indicate statistically significant differences (Tukey test, $p \geq 0.05$).

پتاسیم بالاتر و سطح سدیم پایین‌تری در ریشه و اندام هوایی داشتند و اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد (شکل ۵). نتایج حاصل از سنجش شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاهان تحت آبیاری نرمال و تنش خشکی نشان داد که تفاوت معنی‌داری در نرخ فتوسنتز، نرخ تعرق، هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب (WUE) بین گیاهان شاهد و تیمار شده با قارچ وجود نداشت ($p \leq 0.05$) (شکل ۶).

اثر قارچ *P. chrysogenum* بر شاخص‌های رشد و فیزیولوژیکی گیاه ذرت در شرایط گلخانه

به‌منظور تعیین تأثیر تلقیح قارچ بر محتوای یونی گیاهچه‌های ذرت تحت تنش شوری، مقدار پتاسیم و سدیم اندازه‌گیری شد ($p \leq 0.05$). گیاهچه‌های ذرت تحت تنش شوری قرار گرفتند و هر دو گروه تلقیح‌شده و شاهد آنالیز گردید. اندام هوایی گیاهان ذرت برداشت و غلظت یون‌ها اندازه‌گیری شد. گیاهان تلقیح‌شده و شاهد هر دو سطح



شکل ۳- اثر تلقیح قارچ *P. chrysogenum* بر رشد گیاهان ذرت در اتاقک رشد. وزن تر و خشک بخش هوایی، وزن تر و خشک ریشه اندازه‌گیری شد

Figure 3- Effect of *P. chrysogenum* inoculation on the growth of maize plants in the growth chamber. (a) shoot fresh and dry weight, (b) root fresh and dry weight

حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت‌های آماری معنی‌دار هستند (آزمون توکی، $p \leq 0.05$).

Different letters indicate statistically significant differences (Tukey test, $p \geq 0.05$).

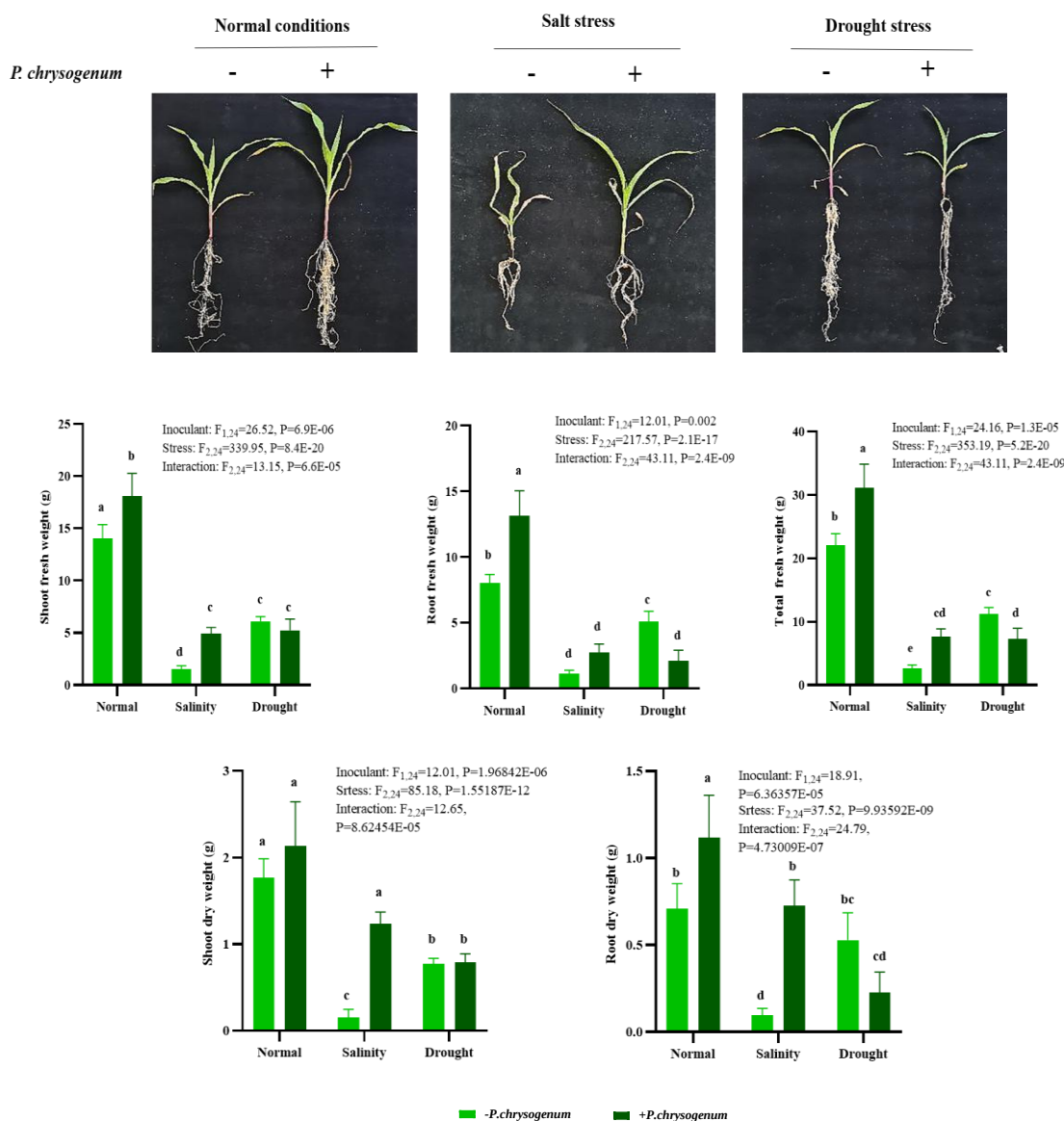
بحث

مختلف نمک مشخص شد که این قارچ در محیط حاوی یک مولار NaCl بیشترین رشد را داشت که نشان می‌دهد این قارچ هالوفیت است. هر چند تلقیح با این قارچ بر درصد جوانه‌زنی تأثیر معنی‌داری نداشت، ولی باعث بهبود معنی‌دار شاخص‌های استقرار گیاهچه مانند طول ریشه اولیه، وزن تر اندام هوایی و ریشه و زیست‌توده کل تحت تنش شوری و شرایط نرمال شد (شکل ۳). این تأثیر مثبت با

در این مطالعه، جداسازی میکروبیوم بذر گیاه هالوفیت *Scoparia* منجر به شناسایی یک قارچ اندوفیت شد که براساس نتایج توالی‌یابی ITS احتمالاً قارچ *P. chrysogenum* است. براساس نتیجه حاصل از کشت این قارچ روی محیط حاوی غلظت‌های

قارچ تحت شرایط تنش شوری، تفاوت معنی‌داری در وزن تر و خشک اندام‌های هوایی و ریشه نشان دادند. اثربخشی *P. chrysogenum* در افزایش رشد گیاه در شرایط شور در محصولات مختلف از جمله سویا و گندم گزارش شده است (Bilal et al., 2019; Leitão & Enguita, 2016).

گزارش‌های قبلی درباره نقش قارچ‌های اندوفیت در افزایش تحمل به تنش‌های غیرزیستی هم‌راستا است (Hamayun et al., 2017). در شرایط گلخانه نیز تلقیح با قارچ به‌طور معنی‌داری باعث افزایش شاخص‌های رشدی در شرایط نرمال و شرایط تنش شوری شد (شکل ۴). نتایج حاصل از آزمایش گلخانه گیاهان تلقیح‌شده با

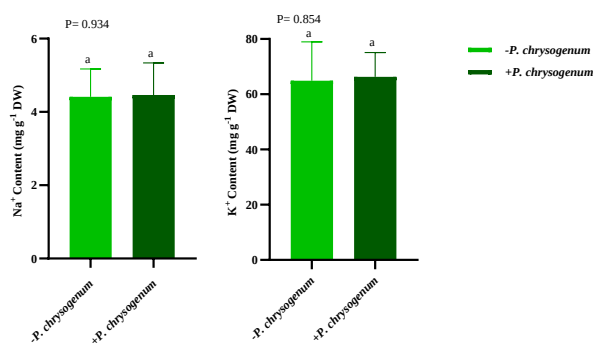


شکل ۴- اثر تلقیح قارچ *P. chrysogenum* بر رشد گیاهان ذرت در گلخانه. وزن تر بخش هوایی، وزن تر ریشه، وزن تر کل، وزن خشک بخش هوایی و وزن خشک ریشه

Figure 4- The effect of *P. chrysogenum* inoculation on maize plant growth in the greenhouse. shoot fresh weight, root fresh weight, total fresh weight, shoot dry weight and root dry weight

حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار (آزمون توکی، $p \leq 0.05$) می‌باشد.

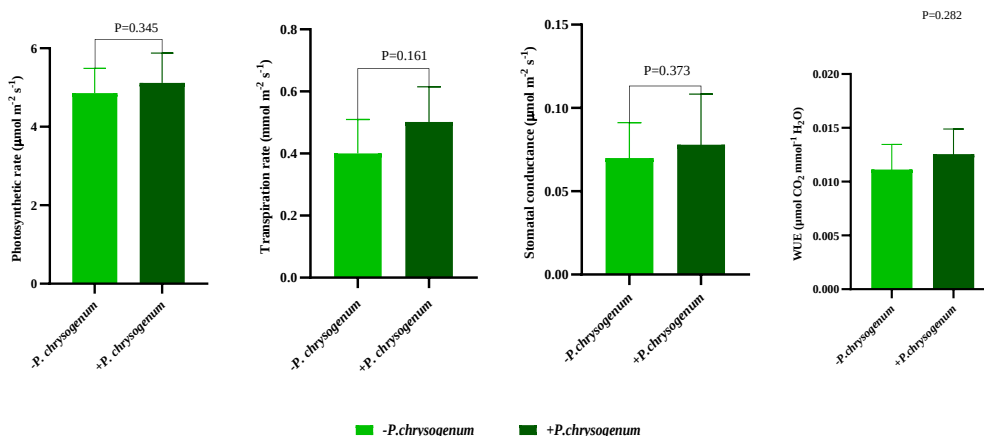
Different letters indicate statistically significant differences at the 5% level (Tukey test, $p \geq 0.05$).



شکل ۵- غلظت سدیم و پتاسیم در برگ و ساقه ذرت تحت تأثیر تلقیح قارچ در شرایط آبیاری نرمال (صفر میلی مولار NaCl) و شور (۱۵۰ میلی مولار NaCl)

Figure 5- Sodium and potassium concentrations in maize leaves and stems affected by fungal inoculation under normal (0 mM NaCl) and saline (150 mM NaCl) irrigation conditions

حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت‌های آماری معنی‌دار هستند (آزمون توکی، $p \leq 0.05$).
Significant difference at the 5% level (Tukey test, $p \geq 0.05$).



شکل ۶- شاخص‌های فتوسنتزی گیاهان ذرت، بین گیاهان شاهد و تیمار شده با قارچ تحت شرایط آبیاری نرمال با دستگاه فتوسنتز متر اندازه‌گیری شدند

Figure 6- Photosynthetic parameters of maize plants were measured between control and fungus-treated plants under normal irrigation conditions using a photosynthesimeter

تفاوت معنی‌داری در نرخ فتوسنتز، نرخ تعرق، هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب (WUE) بین گیاهان شاهد و تیمار شده با قارچ مشاهده نشد ($p \leq 0.05$).
No significant differences were observed in photosynthesis rate, transpiration rate, stomatal conductance, and water use efficiency (WUE) between control and fungus-treated plants ($p \geq 0.05$).

اندازه‌گیری شد. نکته جالب این بود که شاخص‌های فتوسنتزی و نسبت سدیم/پتاسیم در گیاهان تلقیح شده با قارچ و گیاهان شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۶). لذا به نظر می‌رسد که این قارچ در جذب نمک توسط گیاه تأثیری ندارد و احتمالاً تأثیرات مثبت آن به فرآیندهای پس از جذب نمک از جمله سمیت‌زدایی نمک و یا افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه مربوط است. ترنسپورتهای واکوئلی مانند اعضای خانواده *NHX* (به‌ویژه *NHX1* و *NHX7/SOS1*) نقش اساسی در حفظ تعادل یونی گیاهان تحت تنش شوری دارند (Zhang et al., 2022; Zhong et al., 2024; Zhong et al., 2021).

در مقابل، قارچ *P. chrysogenum* تحت تنش خشکی تأثیر مثبتی بر رشد ذرت نداشت و حتی باعث کاهش معنی‌دار وزن تر گیاه شد. این یافته نشان می‌دهد که اثرات مفید اندوفیت‌ها الزاماً در تمام تنش‌های غیرزیستی یکسان نیست و پاسخ‌های القاشده می‌توانند به نوع تنش وابسته باشند. مطالعات پیشین نیز عملکرد متفاوت سویه‌های این قارچ را در شرایط مختلف محیطی گزارش کرده‌اند (Zhong et al., 2021).

جهت بررسی سازوکار افزایش تحمل به شوری توسط این قارچ، شاخص‌های فتوسنتزی و یونی در گیاهان تیمار شده با قارچ

بذر، منبع ژنتیکی ارزشمندی برای افزایش تحمل به شوری در گیاهان زراعی به شمار می‌رود (Bilquees Gul et al., 2010; Khan et al., 2009). انتقال عمودی این اندوفیت‌ها از طریق بذر، نقش مهمی در سازگاری نسل‌های بعدی گیاهان با شرایط تنش‌زا دارد (Barret et al., 2016; Verma et al., 2019; Zeng et al., 2023).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، این پژوهش گامی مؤثر در جهت استفاده از ریزجانداران بومی سودمند برای افزایش تحمل به تنش‌های غیرزیستی محسوب می‌شود. اگرچه قارچ *P. chrysogenum* تحت تنش خشکی کارایی محدودی نشان داد، اما نقش آن در بهبود تحمل به شوری ذرت از طریق ارتقای رشد ریشه و اندام‌های هوایی، قابل توجه است. برای بهره‌برداری عملی از این یافته‌ها، انجام مطالعات مزرع‌ای، بررسی سازوکارهای مولکولی مرتبط، و توسعه فرمولاسیون تجاری پیشنهاد می‌شود. همچنین ترکیب قارچ‌های مفید با سایر ریزجانداران سودمند می‌تواند رویکردی جامع برای مقابله با تنش‌های محیطی متعدد فراهم آورد. این تحقیق بر اهمیت بهره‌گیری از میکروبیوم همزیست با هالوفیت‌ها به‌عنوان منبعی ارزشمند برای مقابله با تنش‌های محیطی در کشاورزی تأکید می‌کند.

پروتئین‌ها با انتقال یون‌های سدیم (Na^+) به درون واکوئل، از تجمع سمی آن‌ها در سیتوپلاسم جلوگیری کرده و با حفظ نسبت مطلوب K^+/Na^+ ، پایداری اسمزی و عملکرد سلولی را حفظ می‌کنند. فعالیت این ترنسپورترها اغلب وابسته به شیب الکتروشیمیایی تولیدشده توسط پمپ‌های V-ATPase و H^+-PPase است، که بستر لازم برای تبادل یون Na^+/H^+ را فراهم می‌سازد (Ramakrishna et al., 2025). بنابراین قارچ *P. chrysogenum* احتمالاً با تأثیر بر فرآیندهای سمیت‌زدایی نمک، مانند تأثیر بر ترنسپورترهای واکوئلی باعث افزایش تحمل گیاه به شوری می‌شود. انجام تحلیل‌های بیان ژن با تمرکز بر مسیرهای مرتبط با تحمل به شوری و بررسی بیان ژن‌های کلیدی این امکان را فراهم خواهد کرد تا درک دقیق‌تری از سازوکارهای القایی توسط قارچ اندوفیت به دست آید.

تاکنون، قارچ‌های اندوفیت بسیاری یافت شده‌اند که در القای تحمل در گیاهان نسبت به تنش‌های غیرزیستی مؤثر بوده‌اند. در بین این گونه‌ها، تحمل *P. chrysogenum* به‌دلیل توانایی‌اش در رشد تحت شرایط شوری بالا و افزایش رشد گیاه از طریق سازوکارهایی مانند انحلال فسفات، تولید سیدروفور و سنتز ایندول-۳-استیک اسید (IAA) قابل توجه است (Bilal et al., 2019; Leitão & Enguita, 2016). یکی از نکات مهم این مطالعه، منشأ بومی قارچ مورد بررسی است. گیاه هالوفیت *B. scoparia* دارای توان بالایی برای رشد در محیط‌های شور است و میکروبیوم همزیست آن به‌ویژه اندوفیت‌های

References

- Ahmed, M., Tóth, Z., & Decsi, K. (2024). The impact of salinity on crop yields and the confrontational behavior of transcriptional regulators, nanoparticles, and antioxidant defensive mechanisms under stressful conditions: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(5), 2654. <https://doi.org/10.3390/ijms25052654>
- Asch, J., Johnson, K., Mondal, S., & Asch, F. (2022). Comprehensive assessment of extraction methods for plant tissue samples for determining sodium and potassium via flame photometer and chloride via automated flow analysis#. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(2), 308-316. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100344>
- Barret, M., Guimbaud, J. F., Darrasse, A., & Jacques, M. A. (2016). Plant microbiota affects seed transmission of phytopathogenic microorganisms. *Molecular Plant Pathology*, 17(6), 791. <https://doi.org/10.1111/mpp.12382>
- Bilal, S., Shahzad, R., Khan, A. L., Al-Harrasi, A., Kim, C. K., & Lee, I. J. (2019). Phytohormones enabled endophytic *Penicillium funiculosum* LHL06 protects *Glycine max* L. from synergistic toxicity of heavy metals by hormonal and stress-responsive proteins modulation. *Journal of Hazardous Materials*, 379, 120824. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120824>
- Bilquees Gul, B. G., Raziuddin Ansari, R. A., Irfan Aziz, I. A., & Khan, M. (2010). Salt tolerance of *Kochia scoparia*: a new fodder crop for highly saline arid regions. *Pakistan Journal of Botany*, 42(4), 2479-2487
- Bulgarelli, D., Schlaeppi, K., Spaepen, S., Van Themaat, E. V. L., & Schulze-Lefert, P. (2013). Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 64(1), 807-838. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120106>
- Dey, P., Barman, M., Mitra, A., & Maiti, M. K. (2022). Lipid-rich endo-metabolites from a vertically transmitted fungal endophyte *Penicillium* sp. PM031 attenuate virulence factors of phytopathogenic *Ralstonia solanacearum*. *Microbiological Research*, 261, 127058. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127058>
- Dos Reis, J. B. A., Lorenzi, A. S., & do Vale, H. M. M. (2022). Methods used for the study of endophytic fungi: A review on methodologies and challenges, and associated tips. *Archives of Microbiology*, 204(11), 675. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-03283-0>
- Doyle, J. (1991). DNA protocols for plants. In *Molecular Techniques in Taxonomy*. pp. 283-293. Springer.
- Etesami, H., & Beattie, G. A. (2017). Plant-microbe interactions in adaptation of agricultural crops to abiotic stress conditions. In *Probiotics and Plant Health*. pp. 163-200. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473->

2_7

11. FAO. (2021). Global map of salt-affected soils. In: FAO Rome, Italy.
12. Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A., & Siddique, K. H. (2015). Salt stress in maize: Effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 461-481. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0287-0>
13. Flowers, T. J., Munns, R., & Colmer, T. D. (2015). Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. *Annals of Botany*, 115(3), 419-431. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu217>
14. Furtado, B. U., Gołębiewski, M., Skorupa, M., Hulisz, P., & Hryniewicz, K. (2019). Bacterial and fungal endophytic microbiomes of *Salicornia europaea*. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(13), e00305-00319. <https://doi.org/10.1128/AEM.00305-19>
15. Galeano, R. M. S., Silva, S. M., Yonekawa, M. K. A., de Alencar Guimarães, N. C., Giannesi, G. C., Masui, D. C., Corrêa, B. O., da Silva Brasil, M., & Zanoelo, F. F. (2023). *Penicillium chrysogenum* strain 34-P promotes plant growth and improves initial development of maize under saline conditions. *Rhizosphere*, 26, 100710. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100710>
16. Gul, B., Ansari, R., Aziz, I., & Khan, M. A. (2010). Salt tolerance of *Kochia scoparia*: A new fodder crop for highly saline arid regions. *Pakistan Journal of Botany*, 42(4), 2479-2487.
17. Hamayun, M., Hussain, A., Khan, S. A., Kim, H. Y., Khan, A. L., Waqas, M., Irshad, M., Iqbal, A., Rehman, G., & Jan, S. (2017). Gibberellins producing endophytic fungus *Porostereum spadiceum* AGH786 rescues growth of salt affected soybean. *Frontiers in Microbiology*, 8, 686. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00686>
18. Isayenkov, S. V., & Maathuis, F. J. (2019). Plant salinity stress: Many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science*, 10, 80. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080>
19. Jin, F., Hu, Q., Zhao, Y., Lin, X., Zhang, J., & Zhang, J. (2022). Enhancing quinoa growth under severe saline-alkali stress by phosphate solubilizing microorganism *Penicillium funiculosum* P1. *Plos One*, 17(9), e0273459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273459>
20. Khan, M. A., Gul, B., & Weber, D. J. (2009). Seed germination of *Kochia scoparia* under saline conditions: responses with germination regulating chemicals. *Pakistan Journal of Botany*, 41, 2933-2941.
21. Kumar, A., Singh, S., Mukherjee, A., Rastogi, R. P., & Verma, J. P. (2021). Salt-tolerant plant growth-promoting *Bacillus pumilus* strain JPV511 to enhance plant growth attributes of rice and improve soil health under salinity stress. *Microbiological Research*, 242, 126616. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126616>
22. Leitão, A. L., & Enguita, F. J. (2016). Gibberellins in *Penicillium* strains: Challenges for endophyte-plant host interactions under salinity stress. *Microbiological Research*, 183(2), 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.004>
23. Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
24. Nečajeva, J., Boroduške, A., Nikolajeva, V., Senkovs, M., Kalniņa, I., Roga, A., Skinderskis, E., & Fridmanis, D. (2023). Epiphytic and endophytic fungi colonizing seeds of two Poaceae weed species and *Fusarium* spp. seed degradation potential *in vitro*. *Microorganisms*, 11(1), 184. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010184>
25. Nusrat Bibi, N. B., Gul Jan, G. J., Jan, F., Muhammad Hamayun, M. H., Amjad Iqbal, A. I., Anwar Hussain, A. H., Hazir Rehman, H. R., Abdul Tawab, A. T., & Faiza Khushdil, F. K. (2019). *Cochliobolus* sp. acts as a biochemical modulator to alleviate salinity stress in okra plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 459-469. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.019>
26. Paasch, B. C., & He, S. Y. (2021). Toward understanding microbiota homeostasis in the plant kingdom. *Plos Pathogens*, 17(4), e1009472. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1009472>
27. Patel, S., Parekh, V., Patel, K., & Jha, S. (2021). Plant growth-promoting activities of *Penicillium* sp. NAUSF2 ameliorate *Vigna radiata* salinity stress in phosphate-deficient saline soil. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 57(4), 500-507. <https://doi.org/10.1134/S000368382104013X>
28. Ramakrishna, P., Gámez-Arjona, F. M., Bellani, E., Martin-Olmos, C., Escrig, S., De Bellis, D., De Luca, A., Pardo, J. M., Quintero, F. J., & Genoud, C. (2025). Elemental cryo-imaging reveals SOS1-dependent vacuolar sodium accumulation. *Nature*, 637(8048), 1228-1233. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08403-y>
29. Ramandi, A., & Seifi, A. (2023). Suppressive soil microbiota inhibit wilting diseases and enhance growth in sesame. *Rhizosphere*, 25, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100668>
30. Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., & Garcia-Casal, M. N. (2014). Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105-112. <https://doi.org/10.1111/nyas.12396>
31. Rodriguez, R. J., Henson, J., Van Volkenburgh, E., Hoy, M., Wright, L., Beckwith, F., Kim, Y. O., & Redman, R. S. (2008). Stress tolerance in plants via habitat-adapted symbiosis. *The ISME Journal*, 2(4), 404-416. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.106>
32. Shahzad, R., Khan, A. L., Bilal, S., Asaf, S., & Lee, I. J. (2018). What is there in seeds? Vertically transmitted endophytic resources for sustainable improvement in plant growth. *Frontiers in Plant Science*, 9, 24. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00024>

33. Shekhawat, K., Saad, M. M., Sheikh, A., Mariappan, K., Al-Mahmoudi, H., Abdulhakim, F., Eida, A. A., Jalal, R., Masmoudi, K., & Hirt, H. (2021). Root endophyte induced plant thermotolerance by constitutive chromatin modification at heat stress memory gene loci. *EMBO Reports*, 22(3), e51049. <https://doi.org/10.15252/embr.202051049>
34. Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2020). Plant-microbiome interactions: From community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 607-621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>
35. Verma, S. K., Kharwar, R. N., & White, J. F. (2019). The role of seed-vectored endophytes in seedling development and establishment. *Symbiosis*, 78, 107-113. <https://doi.org/10.1007/s13199-019-00619-1>
36. Wang, Z., Liu, J., White, J. F., & Li, C. (2022). Epichloë bromicola from wild barley improves salt-tolerance of cultivated barley by altering physiological responses to salt stress. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1044735. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1044735>
37. White, T. J., Bruns, T., Lee, S., & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR Protocols: A guide to Methods and Applications*, 18(1), 315-322. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1>
38. Zafar, Z. U., Manzoor, H., Rasul, S., Noreen, S., Ali, Q., Iqbal, M., Javed, M., Gul, H. S., Ahmad, Z., & Shahzad, F. (2017). Strategies to improve crop salt and drought tolerance: Success and limitations. *Quality and Quantum Improvement in Field Crops*. Agribios, New Delhi, India, 265-298.
39. Zeng, Q., Zhao, Y., Shen, W., Han, D., & Yang, M. (2023). Seed-to-seed: Plant core vertically transmitted microbiota. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(49), 19255-19264. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c07092>
40. Zhang, X., Ma, Y. N., Wang, X., Liao, K., He, S., Zhao, X., Guo, H., Zhao, D., & Wei, H. L. (2022). Dynamics of rice microbiomes reveal core vertically transmitted seed endophytes. *Microbiome*, 10(1), 216. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01422-9>
41. Zhong, L., Niu, B., Xiang, D., Wu, Q., Peng, L., Zou, L., & Zhao, J. (2024). Endophytic fungi in buckwheat seeds: exploring links with flavonoid accumulation. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1353763. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1353763>
42. Zhong, Y., Li, Y., Chen, Z., Fu, J., Li, X., Zhang, B., Chen, S., & Wang, J. (2021). Treatment of *Penicillium chrysogenum* extracts (PDMP) restricts the spread of Tobacco mosaic virus by priming callose deposition in *Nicotiana benthamiana*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 113, 101569. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2020.101569>



Research Article

Vol. 24, No. 2, Summer 2026, p. 163-181

The Effect of Tillage Systems on Nutrient Concentrations, Root Traits and Forage Yield and in Forage Legumes

N. Barati¹, M. Rafiee^{ID 2*}, M. Diyant¹, M. R. Ardakani^{ID 3}, W. Weisany¹

1- Department of Agricultural Science and Engineering, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREO, Khorramabad, Iran

3- Department of Agronomy and Plant Breeding, Ka. C., Islamic Azad University, Karaj, Iran

(*- Corresponding author's Email: m.rafiei@areeo.ac.ir)

Received: 16 June 2025

Revised: 25 July 2025

Accepted: 30 July 2025

Available Online: 20 August 2025

How to cite this article:Barati, N., Rafiee, M., Diyant, M., Ardakani, M. R., & Weisany, W. (2026). The effect of tillage systems on nutrient concentrations, root traits and forage yield and in forage legumes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 163-181. (In Persian with English abstract)<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.94086.1408>

Introduction

In recent years, application of conservation tillage methods has been widely considered in the world, and the use of conventional tillage methods has become outdated in some parts of the world. Conservation tillage systems are usually implemented in arid and semi-arid regions. In semi-arid regions, the key to increasing crop production is to maximize surface water infiltration. In addition, legumes are the main source of protein in developing countries, with about twice the protein content of cereals, and are a source of Inexpensive, good-quality protein and a suitable complement to cereal protein. These plants are very important in low-input farming systems and have a special place in the rotation of some agricultural systems in the world, especially in dry regions, and play a significant role in food production in these countries. Therefore, a field experiment was conducted to evaluate the effects of different tillage systems on nutrient concentrations, root traits, and forage yield of forage legumes at the research farm of the Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, located 8 km southwest of Khorramabad, Iran, during the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons.

Materials and Methods

This experiment was conducted as a split plot based on a randomized complete block design with three replications. Tillage methods (conventional, low-tillage, and no-tillage) were considered as the main factor, and forage legumes (Broujerd landrace faba bean, Lamei cultivar vetch, Grass pea, Barakat and Feyz cultivar faba bean) were considered as secondary factors. The water required by the plants was supplied by normal rainfall during the growing season, and no irrigation was performed. Disking, minimum tillage included a chisel plow or a combined toothed roller cultivator, and no-tillage involved no tillage operations.

Results and Discussion

The results of the analysis of variance showed that the main effect of tillage system and forage legumes on all measured traits and the interaction effect of tillage × forage legumes on forage yield, root length, root volume, and the concentration of copper, zinc, and phosphorus elements in aerial parts were significant. Based on the results of the tillage system × forage legume planting showed that the highest forage dry weight (2820.9 kg ha⁻¹) and copper concentration (50.17 ppm) were observed in the conventional tillage system and Lamei variety vetch. The highest forage fresh yield (10671.54 and 10581.19 kg ha⁻¹), root length (33.89 and 33.39 cm) and phosphorus concentration (0.85 and 0.84%) were observed in the conventional and low-tillage systems and

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/).[doi https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.94086.1408](https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.94086.1408)

Lamei variety vetch. Also low-tillage system and Lamei variety vetch had the highest zinc concentration (50.69 ppm) and root volume (11.74 cm³). The conventional tillage system increased root diameter by 32%, fresh forage weight by 26%, dry weight by 21%, potassium by 27%, iron by 6%, and manganese by 8% and soil respiration by 22% compared to the no-till system. Also, the results of comparing the average effect of planting different forage legumes on measured traits showed that the highest yield, root traits, and nutrient elements were observed in the Lamei variety vetch.

Conclusion

Overall, the results highlight the importance of selecting appropriate tillage systems and forage legume species to optimize forage yield and quality. Among the evaluated species, vetch exhibited superior performance under the environmental conditions of this study. Furthermore, conventional and minimum tillage significantly influenced forage yield, root characteristics, and nutrient concentrations by altering the soil's physical, chemical, and biological properties in the Khorramabad region.

Acknowledgement

Hereby, we would like to express our gratitude to the respected professors and laboratory staff of the Khorramabad Research Center for their guidance and assistance during the project.

Keywords: Manganese, Nitrogen, Phosphorus, Root length, Root volume

اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای

نیلوفر براتی^۱، مسعود رفیعی^{۲*}، مرجان دیانت^۱، محمدرضا اردکانی^۳، وریا ویسانی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

چکیده

در سال‌های اخیر، خاک‌ورزی حفاظتی به دلیل توانایی در افزایش نفوذ آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، جایگزین روش‌های مرسوم شده است. این روش‌ها به حداکثر رساندن تولید محصول کمک می‌کنند. همچنین حبوبات به‌عنوان یک منبع غنی و ارزان پروتئین، نقش حیاتی در تغذیه کشورهای در حال توسعه دارند. این گیاهان با ارزش، به‌ویژه در سیستم‌های کشاورزی کم‌بهداشت و در تناوب زراعی مناطق خشک، از اهمیت بالایی برخوردارند و به امنیت غذایی این مناطق کمک می‌کنند. بنابراین به‌منظور ارزیابی اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای، آزمایشی به‌طور اسپلیت پلات با قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در شهر خرم‌آباد، طی دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در آبان ماه اجرا شد. آب مورد نیاز گیاهان از بارندگی نرمال در طول فصل رشد تأمین شد و هیچ‌گونه آبیاری صورت نگرفت. عامل اصلی خاک‌ورزی (مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی) و عامل فرعی بقولات علوفه‌ای (باقلا (*Vicia faba* L.) توده بروجرد، ماشک (*Vicia sativa* L.) رقم لامعی، خلر (*Lathyrus sativus* L.) باقلا رقم برکت و فیض)) بود. خاک‌ورزی مرسوم شامل شخم با گاوآهن برگردان‌دار و سپس دیسک، کم‌خاک‌ورزی شامل چپزل‌پکر یا خاک‌ورز مرکب غلطک لوله‌ای دنداندار و بی‌خاک‌ورزی فاقد هرگونه عملیات خاک‌ورزی بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سیستم خاک‌ورزی و بقولات علوفه‌ای بر همه صفات اندازه‌گیری شده و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر عملکرد علوفه، طول ریشه، حجم ریشه، غلظت عناصر مس، روی و فسفر در اندام‌های هوایی معنی‌دار بودند. براساس نتایج اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای، بیشترین میزان وزن خشک علوفه (۲۸۲۰/۹ کیلوگرم در هکتار) و عنصر مس (۵۰/۱۷ پی‌پی‌ام) در خاک‌ورزی مرسوم و گیاه ماشک مشاهده شد. بیشترین عملکرد تر علوفه (۱۰۶۷۱/۵۴ و ۱۰۵۸۱/۱۹ کیلوگرم در هکتار)، طول ریشه (۳۳/۸۹ و ۳۳/۳۹ سانتی‌متر) و غلظت عنصر فسفر (۰/۸۵ و ۰/۸۴ درصد) از خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی و گیاه ماشک به دست آمد. همچنین کم‌خاک‌ورزی و کشت گیاه ماشک از بیشترین غلظت عنصر روی (۵۰/۶۹ پی‌پی‌ام) و حجم ریشه (۱۱/۷۴ سانتی‌متر مکعب) برخوردار بودند. خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بدون خاک‌ورزی، ۳۲ درصد قطر ریشه، ۲۶ درصد وزن تر علوفه، ۲۱ درصد وزن خشک، ۲۷ درصد پتاسیم، شش درصد آهن، هشت درصد منگنز و ۲۲ درصد تنفس خاک را افزایش داد. به‌طور کلی، این تحقیق بر اهمیت انتخاب سیستم خاک‌ورزی مناسب و نوع بذر در راستای بهینه‌سازی تولید علوفه و بهبود کیفیت آن تأکید دارد و نشان می‌دهد که ماشک در شرایط این آزمایش، عملکرد خوبی داشته است. همچنین روش‌های خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی به‌دلیل تغییراتی که در شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک ایجاد می‌کنند، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد، صفات ریشه و غلظت عناصر غذایی در منطقه خرم‌آباد دارند.

واژه‌های کلیدی: حجم ریشه، طول ریشه، فسفر، منگنز، نیتروژن

۱- گروه علوم باغبانی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران
۳- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
*- نویسنده مسئول: (Email: m.rafiiei@areeo.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94086.1408>

مقدمه

کشاورزی مدرن به استفاده از کودها و آفت کش ها متکی می باشد که مشکلاتی برای سلامت خاک، گیاه، انسان و محیط زیست ایجاد کرده است. بنابراین، مدیریت پایدار کشاورزی اهمیت بیشتری پیدا کرده و به بهبود بهره‌وری، حفظ منابع زیست محیطی، افزایش رفاه انسان و تقویت تاب‌آوری بوم‌نظام و جامعه کمک می کند (Howard & Lincoln, 2023; Ramesh et al., 2024; Selvan et al., 2023). کشاورزی پایدار به معنای بهره‌برداری مداوم و سودآور از منابع طبیعی، بدون کاهش کیفیت خاک و محیط زیست است. این نوع کشاورزی با روش‌های "کم‌نهاد" یا "ارگانیک" متفاوت است و نیاز به راهبرد دوگانه از جمله افزایش جریان انرژی برای خروج از کشاورزی معیشتی و بهبود راندمان مصرف انرژی در کشاورزی مدرن دارد. خاک‌ورزی و آماده‌سازی بستر بذر نقش مهمی در مصرف انرژی دارند و انتخاب نوع مناسب خاک‌ورزی به عوامل مختلفی مانند بافت، ساختار و ذخایر آب و مواد مغذی بستگی دارد (Wang et al., 2024). کشاورزی پایدار بر تغییر روش‌های استفاده از کودها، مدیریت تلفیقی آفات، تناوب زراعی، آبیاری دقیق، کشت پوششی و خاک‌ورزی حفاظتی تمرکز دارد. هدف این روش‌ها، افزایش بهره‌وری و کارایی کشاورزی است. خاک‌ورزی حفاظتی با کاهش اختلال در خاک، سلامت آن را بهبود می‌بخشد و مزایایی چون بهبود رطوبت، افزایش تخلخل، افزایش محتوای کربن آلی و کاهش جرم مخصوص ظاهری را ارائه می‌دهد. در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند به تخریب ساختار خاک منجر شود (Wang, Shen et al., 2019). هدف از خاک‌ورزی در کشاورزی، ایجاد شرایط مناسب برای جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاهچه است. تأثیر روش‌های خاک‌ورزی به شدت به نوع نظام، ویژگی‌های خاک و شرایط محیطی وابسته است.

در مناطق خشک مدیرانه‌ای، کشاورزان معمولاً از خاک‌ورزی مرسوم برای جلوگیری از فشردگی خاک استفاده می‌کنند که مزایایی مانند کاهش خروج گاز، افزایش کربن آلی و کاهش فرسایش دارد. همچنین روندی جهانی به سمت کم‌خاک‌ورزی وجود دارد که در آن شخم زدن انجام نمی‌شود و بقایای محصولات قبلی روی سطح خاک باقی می‌مانند. بدون خاک‌ورزی نیز به بهبود برخی خواص شیمیایی خاک کمک می‌کند (López-Garrido et al., 2014). در روش‌های بدون خاک‌ورزی به دلیل بازگشت بقایای گیاهی به افق‌های سطحی خاک، افزایش میزان مواد آلی مشاهده می‌شود، درحالی که در روش‌های خاک‌ورزی مرسوم به هم خوردن خاک باعث تجزیه بیشتر و زودتر بقایای گیاهی شده که در نتیجه کاهش میزان مواد آلی را به همراه دارد (Chegeni et al., 2014). مطالعات نشان می‌دهند که انباشت کربن آلی در بدون خاک‌ورزی تا عمق ۱۰ سانتی‌متری بیشتر از خاک‌ورزی معمولی است و کانی‌سازی کربن آلی در بدون

خاک‌ورزی کمتر است که بر دسترسی مواد مغذی تأثیر می‌گذارد. در اقلیم‌های نیمه‌خشک، کانی‌سازی کربن آلی و دسترسی به نیتروژن، فسفر و گوگرد در خاک‌ورزی معمولی و کم‌خاک‌ورزی کمتر از بدون خاک‌ورزی است. همچنین شدت کانی‌سازی نیتروژن با افزایش شدت خاک‌ورزی بیشتر می‌شود، اما نتایج متناقضی نیز در این زمینه وجود دارد (Soane et al., 2012). این تغییرات در نهایت می‌تواند بر جذب عناصر در گیاه مؤثر باشد و میزان عناصر را در برگ و دانه دستخوش تغییر نماید. برخی محققان طی آزمایشی طولانی مدت به منظور بررسی اثر خاک‌ورزی بر کربن آلی خاک و مواد مغذی خاک گزارش دادند که مقدار کربن آلی خاک و پتاسیم خاک در خاک‌ورزی حداقل بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم است (Spiegel et al., 2007).

برای پاسخ به این سؤال که آیا تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی در کشاورزی ارگانیک در واقع حاصلخیزی طولانی‌مدت خاک، ریشه‌زایی و عملکرد را بهبود می‌بخشد یا خیر، یک آزمایش مزرعه‌ای طولانی‌مدت طی ۱۰ سال (۲۰۱۵-۲۰۲۴) در خاک لومی شنی در فرانسه انجام شد. پژوهشگران مشاهده نمودند که تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی اثرات مثبتی بر اجزای شیمیایی خاک در لایه فوقانی خاک داشت و به افزایش زیست‌توده گندم (*Triticum aestivum* L.) تا مرحله پنجه‌زنی کمک کرد. با این حال، تفاوت عملکرد گندم بین تیمارها مشاهده نشد. خواص فیزیکی و زیستی خاک پس از ۱۰ سال خاک‌ورزی حفاظتی به‌طور معنی‌داری بهبود نیافت. این موضوع ممکن است به دلیل مدت زمان ناکافی آزمایش برای تأثیر مثبت کرم خاکی بر تخلخل خاک، یا به دلیل شنی بودن و حساسیت بالای خاک به تراکم در کشت ارگانیک باشد (Peigné et al., 2018). مناطق خشک با کمبود مواد علوفه‌ای مواجه‌اند که در تابستان به دلیل رقابت بین تولید غذای انسان و خوراک دام تشدید می‌شود. تلاش‌ها برای بهبود عملکرد و کیفیت محصولات علوفه‌ای متمرکز است. توالی کشت علف‌ها و حبوبات به بهبود خواص خاک و حفظ منابع طبیعی کمک می‌کند. حبوبات خواص شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود بخشیده و حاصلخیزی آن را افزایش می‌دهند که به کاهش نیاز به کودهای مصنوعی و افزایش عملکرد محصولات بعدی کمک می‌کند. همچنین ادغام این محصولات در تناوب‌های کشاورزی، پایداری زیست محیطی و اقتصادی را افزایش می‌دهد (Mansour et al., 2021). بهترین راه حفاظت خاک در راستای کشاورزی حفاظتی، استفاده از پوشش گیاهی است. نقش پوشش گیاهی در کاهش فرسایش و رسوب فقط به قسمت بالا و بیرونی گیاهان محدود نمی‌شود، بلکه ریشه‌های گیاهان نیز در این زمینه نقش حساسی دارند، زیرا آن‌ها با نفوذ در اعماق خاک، زمینه چسبندگی خاکدانه‌ها به خود را فراهم کرده و مانع از متلاشی شدن خاکدانه‌ها به هنگام ریزش‌های جوی می‌شوند (Khosropour, 2018).

مواد و روش‌ها

این مطالعه به منظور بررسی اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای اجرا شد. آزمایش طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۳ در مزرعه پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان در هشت کیلومتری جنوب غربی شهر خرم‌آباد، با موقعیت جغرافیایی $48^{\circ} 18' N$ و $33^{\circ} 29' E$ و ارتفاع ۱۱۹۵ متر از سطح دریا با سه تکرار اجرا شد. متوسط بارندگی سالیانه براساس آمار هواشناسی ۳۵ ساله ۵۱۶ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت درازمدت $16/2^{\circ} C$ درجه سانتی‌گراد بود. تغییرات میزان دما و بارندگی در بازه زمانی ابتدای آبان تا پایان خرداد هر دو سال زراعی این منطقه جغرافیایی در **جدول ۱** ارائه شده است. این آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام گردید. قبل از شروع آزمایش، برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌هایی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک از نقاط مختلف مزرعه جمع‌آوری و سپس به آزمایشگاه خاک ارسال شد. نتایج مربوط به آنالیز خاک در **جدول ۲** آمده است.

پژوهش زیادی پیرامون اثرات خاک‌ورزی روی گیاهان مختلف انجام شده است، لیکن مطالعه جامع و هم‌زمان پیرامون جنبه‌های مختلف زراعی و بیوشیمیایی در گیاه، ریشه و جذب عناصر غذایی در بقولات متنوع صورت نگرفته است که در این آزمایش به آن پرداخته شد. همچنین تلفیق زراعت گیاهان علوفه‌ای یک مسئله مهم در توسعه زراعت این گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود. افزایش تنوع نظام‌های کشت می‌تواند بهره‌وری زمین‌های کشاورزی را بهبود بخشد و تولید محصولات علوفه‌ای نه تنها تنوع محصول را افزایش دهد، بلکه عملکرد زیست‌توده کل زمین‌های کشاورزی را نیز در شرایط محدود افزایش دهد (Renard & Tilman, 2019). در استان لرستان، ۷۰ درصد اراضی در مناطق کوهستانی شیب‌دار و ۳۰ درصد در دشت‌ها قرار دارد که منجر به خروج سالانه ۱۲ میلیارد مترمکعب رواناب می‌شود. کوهستانی بودن و شیب بالای زمین‌ها باعث شده که فرسایش خاک در این استان سه برابر میانگین کشوری و سه تا پنج برابر متوسط جهانی باشد. همچنین تولید کل علوفه در کشور حدود ۵-۷ میلیون تن است که برای تغذیه دام‌ها کافی نیست. بنابراین، هدف از این پژوهش معرفی ارقام مناسب گیاهان علوفه‌ای و استفاده از ظرفیت مزارع دیم برای افزایش تولید علوفه احساس می‌باشد. در واقع، به منظور حفظ منابع آب و خاک و دستیابی به کشاورزی پایدار، باید عملیات تهیه بستر را از طریق خاک‌ورزی حفاظتی کاهش داد.

جدول ۱- داده‌های هواشناسی شامل دما و بارندگی طی دوره اجرای آزمایش

سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ Year 2021-2022				سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ Year 2022-2023			
ماه Month	حداکثر دما Maximum temperature (°C)	حداقل دما Minimum temperature (°C)	بارندگی Precipitation (mm)	ماه Month	حداکثر دما Maximum temperature (°C)	حداقل دما Minimum temperature (°C)	بارندگی Precipitation (mm)
مهر September	33	12.7	0	مهر September	31.1	13.1	1.4
آبان October	22	8.5	71.1	آبان October	22.5	8.1	45.8
آذر November	16.2	3.7	28.8	آذر November	17.4	1.9	29.2
دی December	11	0.7	55.2	دی December	14.5	1.3	43
بهمن January	11.3	-0.3	92.7	بهمن January	13.4	1.4	99.6
اسفند February	19.5	4.1	65.8	اسفند February	15.5	2.1	67.8
فروردین March	20	5.7	123.9	فروردین March	21.9	6.2	94.6
اردیبهشت April	27.6	8.5	21.6	اردیبهشت April	26.1	10.5	108
خرداد May	34.8	15.1	15.1	خرداد May	36.8	16.1	0.4

جدول ۲- آنالیز خاک مزرعه

Table 2- Farm soil analysis

سال Year	بافت Texture	درجه اسیدی pH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	مس Cu (ppm)	روی Zn (ppm)	منگنز Mn (ppm)	آهن Fe (ppm)	کربن C (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (ppm)	پتاسیم K (ppm)
۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	لومی Loam	7.6	1.27	0.74	0.25	6.2	7.1	0.92	0.31	12.1	332
۱۴۰۱-۱۴۰۲ 2022-2023	لومی Loam	7.5	1.25	0.81	0.32	6.9	6.8	0.94	0.42	13.5	361

مشاهده نگردید. برداشت بقولات به صورت هم زمان صورت نگرفت. بدین صورت که برداشت ماشک هم زمان با مرحله ۵۰ درصد گل دهی در تاریخ ۲۰ فروردین و برداشت ارقام باقلا و خلر در مرحله شروع خمیری و در تاریخ ۲۵ فروردین انجام شد. صفات اندازه گیری شامل عملکرد علوفه تر و خشک، طول ریشه، حجم ریشه، قطر ریشه، وزن تر و خشک ریشه، تنفس خاک و عناصر غذایی اندام هوایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز) بود.

زمان نمونه برداری ها و بررسی عملکرد هم زمان با برداشت بقولات علوفه ای با رعایت ۲۰ سانتی متر حاشیه از دو سر هر کرت روی چهار ردیف وسط نیمه بالایی از هر کرت در سطحی معادل یک مترمربع برداشت صورت گرفت. در ابتدا نمونه های جمع آوری شده توزین شدند و عملکرد علوفه تازه آن اندازه گیری گردید، همچنین برای اندازه گیری عملکرد علوفه خشک، سطح برداشت علوفه تر از هر تیمار به طور تصادفی انتخاب و نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه آون در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد خشک و توزین شد.

به منظور اندازه گیری عناصر غذایی، پس از اتمام دوره آزمایش، اندام های هوایی (برگ و ساقه) جدا شدند و پس از شست و شوی دقیق، به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. پس از خشک شدن، نمونه ها با آسیاب برقی به صورت پودر شدند. پس از تهیه خاکستر از مواد گیاهی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد، عصاره گیری با استفاده از ۱۰ میلی لیتر انجام شد. از این عصاره برای اندازه گیری عناصر غذایی استفاده گردید. میزان عناصر نیتروژن به صورت تیتراسیون با دستگاه تمام اتوماتیک کج لال، فسفر با معرف وانادات مولیبدات با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (model: BT600 Plus, Canada) در طول موج ۴۵۰ نانومتر، میزان عنصر پتاسیم (با محلول کلروسزیم ۰/۸۷ گرم در لیتر) در عصاره استخراج شده با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (model: PFP7, UK) اندازه گیری شدند (Waling et al., 1989). غلظت عناصر آهن، روی، مس و منگنز در عصاره حاصل از هضم خشک با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer, USA make Analyst 400) اندازه گیری گردید.

برای جمع آوری نمونه های ریشه، خاک اطراف ریشه با حفر گودال

عامل های مورد مطالعه شامل خاک ورزی به عنوان کرت اصلی با سه سطح (مرسوم، کم خاک ورزی و بدون خاک ورزی) و بقولات علوفه ای به عنوان کرت فرعی با پنج سطح علوفه ای (باقلا (*Vicia faba* L.) توده بروجرد، ماشک (*Vicia sativa* L.) رقم لامعی، خلر (*Lathyrus sativus* L.)، باقلا رقم برکت و فیض) بود. در تجزیه واریانس مرکب، عامل خاک ورزی در حکم محیط در نظر گرفته شد. خاک ورزی هر سال در بقایای حداقل ۳۰ درصدی گندم (درصد پوشش بقایا روی سطح زمین) اجرا شد که هر خاک ورزی به عرض ۶/۷۵ متر (سه برابر عرض دنباله بند) و طول ۷۶ متر با فاصله دو متر از یکدیگر بود. خاک ورزی مرسوم شامل شخم با گاو آهن برگردان دار و سپس دیسک، کم خاک ورزی شامل چیل پکر یا خاک ورز مرکب غلطک لوله ای دنداندار و بی خاک ورزی فاقد هر گونه عملیات خاک ورزی بود. هر قطعه خاک ورزی به سه تکرار با فواصل دو متر تقسیم و در هر تکرار پنج بقولات علوفه ای در نه خط کاشت با فاصله بین خطوط ۵۰ سانتی متری و عرض سه متر (در جهت خاک ورزی) به مساحت کرت ۱۳/۵ مترمربع کشت گردید. تأمین نیاز کودی گیاه با توجه به آزمایش خاک، کود فسفر به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپرفسفات تریپل در هنگام کاشت و به صورت نواری در کف شیارها و پنج سانتی متر از طرفین بذر قرار گرفت. همچنین کود نیتروژن به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره به صورت سرک و تقسیط در دو مرحله یک دوم در مرحله رزت و یک دوم آن در زمان به ساقه رفتن (رشد سریع در اسفند ماه) مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا خطوط کاشت به وسیله فوکا با عرض ۵۰ و به عمق حداکثر پنج سانتی متر (مشابه دستگاه کشت مستقیم) ایجاد و کاشت در اواسط آبان در هر دو سال زراعی انجام شد. میزان بذر مصرفی برای بقولات علوفه ای شامل ماشک، باقلا (رقم برکت، رقم فیض، توده محلی بروجرد) و خلر به ترتیب ۸۰، ۱۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. آبیاری مطابق عرف منطقه و بسته به نیاز به روش بارانی کلاسیک صورت گرفت. در طول فصل رشد، مراقبت های لازم شامل مبارزه با علف های هرز به صورت وجین دستی در یک مرحله و در اواسط اسفند ماه انجام شد. همچنین در طی فصل رشد، آسیب قابل توجهی از نظر هجوم آفات یا بیماری های گیاهی

نرمال سود به‌صورت جداگانه در ظروف حاوی خاک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور نگهداری شدند. در پایان، مقدار CO_2 آزادشده به‌روش تیتراسیون سود باقی‌مانده با اسید ۰/۲۵ نرمال اندازه‌گیری و میزان C-CO_2 برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم خاک خشک محاسبه گردید (Anderson, 1982).

پس از دو سال آزمایش، نتایج جمع‌آوری‌شده مورد بررسی قرار گرفت و فرض همگنی واریانس با آزمون بارتلت تأیید شد. این امر نشان‌دهنده یکنواختی و هموژنی واریانس‌ها بود و به اثبات رسید که تجزیه مرکب برای داده‌های تحقیق مناسب است. تحلیل داده‌ها به‌وسیله نرم‌افزار SAS Ver. 9 انجام شد و مقایسه میانگین‌ها به‌روش LSD در سطح احتمال پنج درصد محاسبه گردید. همچنین برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

کنار زده شد و نمونه‌ها به‌صورت پنج‌تایی و به‌صورت تصادفی انتخاب شدند، ریشه‌ها بدون آسیب خارج شدند. طول ریشه از جمله صفات مورد بررسی بود که با خط‌کش و برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد، حجم ریشه با قرار دادن ریشه‌ها در استوانه‌های مدرج و تعیین میزان تغییر سطح آب، اندازه‌گیری گردید، قطر ریشه نیز به‌وسیله کولیس محاسبه شد. وزن تر ریشه‌ها توسط ترازوی دقیق دیجیتالی اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، نمونه‌ها در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و پس از خشک شدن، نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دقیق دیجیتالی توزین و وزن خشک نمونه‌ها تعیین شدند. جهت اندازه‌گیری تنفس خاک، ابتدا ۵۰ گرم خاک الک‌شده به ظروف منتقل گردید، سپس با اضافه کردن ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۵

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب اثر خاک‌ورزی بر عملکرد و صفات ریشه بقولات علوفه‌ای

Table 3- Combined analysis of variance of Tillage on forage legumes yield and root traits

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares							
		عملکرد علوفه تر Fresh forage yield	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	قطر ریشه Root diameter	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	تنفس خاک Soil respiration
سال Year (Y)	1	481094.72 ^{ns}	3235543.74 ^{ns}	41.31 ^{**}	54.07 ^{**}	2.18 ^{ns}	11.38 ^{**}	48.60 ^{**}	0.18 ^{**}
تکرار در سال R/Y	4	1212339.99	2359855.98	2.86	0.04	2.57	0.01	0.21	0.006
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	2207917.12 ^{**}	1843998.24 ^{**}	179.75 ^{**}	13.25 ^{**}	0.90 ^{**}	1.80 ^{**}	26.12 ^{**}	0.12 ^{**}
سال × خاک‌ورزی Y × T	2	2.81 ^{ns}	1.13 ^{ns}	6.23 ^{ns}	6.02 ^{ns}	5.23 ^{ns}	4.25 ^{ns}	1.40 ^{**}	4.69 ^{ns}
خطای a	8	710975.81	43543.72	0.17	0.03	0.03	0.10	0.03	0.005
بقولات علوفه‌ای Forage crops (FC)	4	2317242.81 ^{**}	1670838.80 ^{**}	337.15 ^{**}	28.91 ^{**}	2.61 ^{**}	2.83 ^{**}	35.59 ^{**}	0.13 ^{**}
سال × بقولات علوفه‌ای Y × FC	4	7.02 ^{ns}	2.97 ^{ns}	8.91 ^{ns}	7.33 ^{ns}	1.27 ^{ns}	2.03 ^{ns}	2.93 ^{ns}	1.34 ^{ns}
خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای T × FC	8	117121.01 ^{**}	131732.57 ^{**}	9.17 ^{**}	1.07 ^{**}	0.10 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.007 ^{ns}
سال × خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای Y × T × FC	8	1.01 ^{ns}	5.60 ^{ns}	5.36 ^{ns}	9.50 ^{ns}	1.94 ^{ns}	1.27 ^{ns}	4.55 ^{ns}	4.67 ^{ns}
خطای b Error b	48	889652.13	36620.44	1.21	0.13	0.09	0.05	0.36	0.0008
ضریب تغییرات C.V (%)	-	9.4	8.7	4.3	4.0	6.4	10.79	10.1	16.6

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

ns, * and **: are non- significant and significant in probabilitie levels of 5 and 1 %, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی × کاشت بقولات علوفه‌ای بر عملکرد، برخی عناصر غذایی و صفات ریشه
Table 4- Comparison of the mean interaction of tillage × planting forage legumes on yield, some nutrients and root traits

تیمارها Treatments		عملکرد علوفه تر Fresh forage yield	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield	طول ریشه Root length (cm)	حجم ریشه Root volume (cm ³)	فسفر P (%)	مس Cu	روی Zn
خاک‌ورزی Tillage	بقولات علوفه‌ای Forage crops	(kg ha ⁻¹) (ppm)						
مرسوم Conventional	باقلا توده بروجرد Faba bean (Borujerd landrace)	10131.21 ^{abc*}	2370.99 ^{bcd}	27.36 ^d	8.86 ^{fg}	0.81 ^{cd}	39.98 ^e	41.99 ^{ef}
	ماشک رقم لامعی Vetch (c.v. Lamei)	10671.54 ^a	2820.9 ^a	33.89 ^a	10.28 ^b	0.85 ^a	50.17 ^a	49.34 ^{ab}
	خلر Grass pea	10398.06 ^{ab}	2461.16 ^{bcd}	28.76 ^c	8.21 ^h	0.82 ^{bcd}	42.41 ^{cd}	46.96 ^{bc}
	باقلا رقم برکت Faba bean (c.v. Barkat)	10093.17 ^{abc}	2352.8 ^{cde}	25.57 ^e	9.02 ^{fg}	0.80 ^d	37.57 ^f	46.77 ^{bcd}
	باقلا رقم فیض Faba bean (c.v. Feyz)	10255.11 ^{ab}	2391.16 ^{fg}	27.98 ^{cd}	8.62 ^{gh}	0.81 ^{cd}	42.11 ^d	46.91 ^{bcd}
کم‌خاک‌ورزی Reduced tillage	باقلا توده بروجرد Faba bean (Borujerd landrace)	9683.08 ^{abc}	2001.1 ^{fg}	23.23 ^{fg}	9.93 ^{bc}	0.74 ^g	33.51 ^h	43.68 ^{de}
	ماشک رقم لامعی Vetch (c.v. Lamei)	10581.19 ^a	2551.11 ^b	33.39 ^a	11.74 ^a	0.84 ^a	48.55 ^{ab}	50.69 ^a
	خلر Grass pea	9967.18 ^{abc}	2276.61 ^{de}	25.31 ^e	9.14 ^{def}	0.77 ^e	37.32 ^f	45.88 ^{bcd}
	باقلا رقم برکت Faba bean (c.v. Barkat)	9475.18 ^{ab}	1751.18 ^h	19.12 ^h	6.64 ^j	0.65 ^h	31.98 ⁱ	42.18 ^{ef}
	باقلا رقم فیض Faba bean (c.v. Feyz)	9873.09 ^{abc}	2047.82 ^{gh}	24.41 ^{ef}	9.36 ^{de}	0.74 ^{fg}	31.59 ^g	45.69 ^{bcd}
بدون خاک‌ورزی No tillage	باقلا توده بروجرد Faba bean (Borujerd landrace)	9595.21 ^{abc}	1834.5 ^{gh}	22.12 ^g	10.09 ^b	0.73 ^g	32.18 ⁱ	43.21 ^{de}
	ماشک رقم لامعی Vetch (c.v. Lamei)	10345.14 ^{ab}	2514.04 ^{bc}	30.64 ^b	7.59 ^j	0.83 ^{bc}	43.19 ^c	48.74 ^{ab}
	خلر Grass pea	9906.85 ^{abc}	2214.15 ^{ef}	25.15 ^e	9.19 ^{def}	0.77 ^{ef}	36.9 ^f	45.85 ^{bcd}
	باقلا رقم برکت Faba bean (c.v. Barkat)	9100.74 ^c	1331.14 ⁱ	17.21 ⁱ	6.24 ^j	0.63 ^h	28.26 ^j	38.74 ^f
	باقلا رقم فیض Faba bean (c.v. Feyz)	9732.12 ^{abc}	1941.12 ^{gh}	23.57 ^f	9.52 ^{cd}	0.74 ^g	34.77 ^g	44.92 ^{cde}

* میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون برای هر عامل تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح پنج درصد براساس آزمون LSD ندارند.
* Similar letters in each column for each factor are not significantly different based on LSD test (p≤0.05).

نتایج و بحث

عملکرد علوفه

متقابل خاک‌ورزی × تیمار بقولات علوفه‌ای، بیشترین عملکرد علوفه تر با میانگین‌های ۱۰۶۷۱/۵ و ۱۰۵۸۱/۱۹ کیلوگرم در هکتار با کاشت بقولات علوفه‌ای ماشک در خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد که با اکثر تیمارهای آزمایشی اختلاف معنی‌داری نداشتند و نسبت به کمترین میزان آن در تیمار کشت گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی به میزان ۱۲ و ۱۴ درصد عملکرد علوفه تر را افزایش داد. همچنین تیمار کاشت ماشک در خاک‌ورزی مرسوم با میانگین

براساس نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳)، اثر اصلی خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر عملکرد علوفه تر و خشک در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بودند. بر مبنای نتایج مقایسه میانگین اثر

برتری گیاه ماشک از نظر عملکرد علوفه به تثبیت نیتروژن توسط آن و جذب عناصر غذایی خاک، تجزیه به‌موقع و آزادسازی عناصر غذایی (Kebede, 2021; Gomez-Munoz et al., 2014) بر می‌گردد.

طول ریشه

تجزیه واریانس صفات ریشه در تیمارهای مختلف اعمال‌شده، تأثیر معنی‌دار سال، خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر طول ریشه در سطح احتمال خطای یک درصد را نشان داد (جدول ۳). مقایسه میانگین نشان داد که سال دوم نسبت به سال اول به‌میزان پنج درصد از طول ریشه بیشتری برخوردار بود (جدول ۴). براساس نتایج برهم‌کنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر طول ریشه، بیشترین میزان طول ریشه با میانگین‌های ۳۳/۸۹ و ۳۳/۳۴ سانتی‌متر در گیاه ماشک به‌ترتیب در خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد. همچنین کمترین طول ریشه با میانگین ۱۷/۲۱ سانتی‌متر از گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی به دست آمد (جدول ۴). روش‌های خاک‌ورزی به‌طور قابل توجهی بر طول و توزیع ریشه در خاک تأثیر می‌گذارند. به‌طور کلی، خاک‌ورزی مرسوم تمایل به تشویق رشد ریشه عمیق‌تر و گسترده‌تر دارد، درحالی که روش‌های بدون خاک‌ورزی اغلب منجر به سیستم‌های ریشه‌ای سطحی‌تر و افقی‌تر می‌شوند. بااین‌حال، اثرات خاص می‌تواند بسته به نوع خاک، محصول و سایر عوامل محیطی متفاوت باشد. سیستم‌هایی مانند خاک‌ورزی کاهش‌یافته یا حداقل خاک‌ورزی می‌توانند ترکیبی از ویژگی‌های هر دو روش مرسوم و بدون خاک‌ورزی را نشان دهند، به‌طوری که ریشه‌ها به‌طور بالقوه عمیق‌تر از روش بدون خاک‌ورزی رشد می‌کنند، اما به اندازه خاک‌ورزی مرسوم عمیق نیستند. به‌عنوان مثال، عدم شخم ممکن است در خاک‌های شنی مفیدتر باشد، زیرا به حفظ رطوبت و بهبود ساختار خاک کمک می‌کند، درحالی که شخم زدن مرسوم ممکن است در خاک‌های رسی برای کاهش فشردگی ترجیح داده شود. عواملی مانند بارندگی، دما و در دسترس بودن مواد مغذی نیز می‌توانند بر توسعه ریشه در پاسخ به شخم‌زدن تأثیر بگذارند. به‌طور خلاصه، شیوه‌های خاک‌ورزی با تغییر خواص خاک مانند تراکم و هوادهی، بر طول و توزیع ریشه تأثیر می‌گذارند. خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند رشد ریشه را عمیق‌تر کند، درحالی که بدون خاک‌ورزی اغلب منجر به یک سیستم ریشه‌ای کم‌عمق‌تر، اما بالقوه متراکم‌تر در خاک سطحی می‌شود. رویکرد بهینه به شرایط خاص سیستم کشاورزی و شرایط محیطی بستگی دارد (Holder et al., 2025).

۲۸۲۰/۹ کیلوگرم در هکتار و تیمار کاشت گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی با میانگین ۱۳۳۱/۱ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب بیشترین و کمترین عملکرد علوفه خشک را به خود اختصاص دادند. در این مقایسه میانگین تیمارهای کاشت باقلا رقم بروجرد و گیاه خلر در خاک‌ورزی مرسوم با کاشت گیاه ماشک و باقلا رقم فیض در کم‌خاک‌ورزی و گیاه ماشک در بدون خاک‌ورزی در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴).

در تولید علوفه، خاک‌ورزی مرسوم که شامل به‌هم‌خوردگی شدید خاک است، در برخی موارد، ممکن است به‌دلیل بهبود تماس بذر با خاک و آزادسازی سریع‌تر مواد مغذی منجر به عملکرد اولیه علوفه بالاتر به‌ویژه در کوتاه‌مدت شود. هدف از خاک‌ورزی کاهش‌یافته، کاهش به‌هم‌خوردگی خاک در مقایسه با خاک‌ورزی کاهش‌یافته است و می‌تواند مزایایی مانند بهبود نفوذ آب و کاهش فرسایش را ارائه دهد، اما ممکن است برای جلوگیری از کاهش عملکرد، نیاز به مدیریت دقیق نیز داشته باشد. بدون خاک‌ورزی، که در آن هیچ خاکی به‌هم‌خورده نمی‌شود، می‌تواند رطوبت خاک را حفظ کند، فرسایش را کاهش دهد و ساختار خاک را در طول زمان بهبود بخشد، اما در ابتدا ممکن است به‌دلیل عواملی مانند کندتر شدن چرخه مواد مغذی و احتمال فشردگی منجر به عملکرد کمتر شود (Torabi et al., 2020; Ramadhan & Muhsin, 2021). گزارش شده است که کاهش عملکرد در تیمارهای بدون خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم و حداقل، ناشی از عوامل متعددی است که شامل شرایط سرد و مرطوب خاک در زمان جوانه‌زنی (که باعث تأخیر در سبز شدن می‌شود)، وجود علف‌های هرز، تجمع بقایای گیاهی، و افزایش تراکم خاک (که مانع رشد ریشه می‌گردد) هستند. در سیستم کم‌خاک‌ورزی، آزادسازی نیتروژن به‌دلیل اختلاط کمتر بقایا با خاک کندتر است، اما این روش به‌دلیل ماده آلی بیشتر و کیفیت بهتر خاک، معمولاً عملکرد بالاتری نسبت به بدون خاک‌ورزی دارد. محدودیت جذب آب ناشی از تراکم زیاد خاک و تشکیل لایه سخت نیز از دیگر دلایل کاهش عملکرد در سیستم بدون شخم است (Ahmadi et al., 2024).

نائل و همکاران (Nael et al., 2023) در بررسی سه‌ساله خاک‌ورزی حفاظتی و گیاه پوششی ماشک و خلر بر عملکرد علوفه ذرت (*Zea mays* L.) اظهار داشتند که خاک‌ورزی حفاظتی موجب بهبود عملکرد علوفه در ذرت شدند. همچنین گزارش کردند که تأثیر ماشک بر این صفت بیشتر از خلر بود. فیض‌بخش (Feyzbakhsh, 2023) نیز در بررسی عملکرد کمی و کیفی علوفه گیاهان ماشک، باقلا و خلر در شرایط آب‌وهوایی گرگان گزارش کرد که بیشترین و کمترین علوفه خشک به‌ترتیب از ماشک و خلر با ۸۱۴۰ و ۵۹۰۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. همچنین به نظر می‌رسد که دلیل

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر اصلی سال بر برخی عناصر غذایی و صفات ریشه بقولات علوفه‌ای

Table 5- Means comparison of main effect of Year on forage crops some nutrients and root traits

سال Years	طول ریشه Root length (cm)	حجم ریشه Root volume (cm ³)	قطر ریشه Root diameter (mm)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	فسفر P (%)	مس Cu (%)	تنفس خاک Soil respiration (mg CO ₂ g ⁻¹ dm ⁻¹ 24 ⁻¹)
اول First	25.23 ^{b*}	8.17 ^b	1.65 ^b	1.76 ^b	5.13 ^b	0.75 ^b	35.42 ^b	0.52 ^b
دوم Second	26.20 ^a	9.79 ^a	2.26 ^a	2.49 ^a	6.66 ^a	0.86 ^a	38.74 ^a	0.61 ^a

* میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون برای هر عامل تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح پنج درصد براساس آزمون LSD ندارند.

* Similar letters in each column for each factor are not significantly different based on LSD test ($p \leq 0.05$).

در بدون خاک‌ورزی موجب افزایش ۴۵ درصد حجم ریشه شد (جدول ۴).

میزان رشد ریشه گیاهان زراعی با درجه تراکم خاک ارتباط معکوسی دارد و این ارتباط ممکن است تحت تأثیر خاک‌ورزی قرار گیرد. رشد ریشه نیز می‌تواند در کشت مستقیم به دلیل تراکم لایه سطحی خاک محدودتر گردد که نتیجه آن، تولید سیستم ریشه‌ای عمدتاً سطحی‌تر در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم است (Salih et al., 1998). حجم کمتر ریشه در سیستم بدون شخم به دلیل وجود لایه سخت حاصل می‌شود، ولی خاک‌ورزی متداول بر دمای خاک، مقاومت مکانیکی، پیوستگی حفرات درشت، رطوبت قابل دسترس و عمق توزیع ریشه اثر می‌گذارند. در یک مطالعه روی گیاه ذرت علوفه‌ای، بدون خاک‌ورزی موجب کاهش ۴۳ درصدی حجم ریشه نسبت به خاک‌ورزی مرسوم شد (Afshon et al., 2020). بره‌رسی همکاران (Burr-Hersey et al., 2017) اثر کاشت گیاهان پوششی مختلف بر حجم ریشه را بررسی کردند و اظهار داشتند که گیاه یولاف و ماشک به ترتیب از بیشترین حجم ریشه برخوردار بودند.

قطر ریشه

براساس نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳)، اثر اصلی خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای در سطح احتمال خطای یک درصد بر قطر ریشه معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که سال دوم نسبت به سال اول، ۲۷ درصد از قطر ریشه بیشتری برخوردار بود (جدول ۴). تغییرات قطر ریشه در نظام‌های خاک‌ورزی مختلف نیز نشان داد که خاک‌ورزی مرسوم با میانگین ۲/۴۰ میلی‌متر، بیشترین میزان قطر ریشه را به خود اختصاص داد که نسبت به کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی به میزان ۳۳ درصد قطر ریشه را افزایش داد. در بین بقولات علوفه‌ای نیز مشاهده شد که بیشترین کمترین قطر ریشه با میانگین‌های ۲/۵۲ و ۱/۴۵ میلی‌متر به ترتیب در گیاه ماشک و گیاه باقلا رقم برکت مشاهده شد. گیاه باقلا توده برورجد با گیاه خلر و باقلا رقم فیض اختلاف معنی‌داری نداشت

در این آزمایش، عملیات خاک‌ورزی با ایجاد تغییر در ساختمان خاک، شکستن لایه‌های خاک و سست نمودن آن باعث کاهش مقاومت خاک گردید و در نتیجه ریشه‌های بقولات علوفه‌ای توانستند از عمق نفوذ بیشتری برخوردار باشند. در پژوهشی، نتایج بررسی روش‌های خاک‌ورزی (حفاظتی، بدون خاک‌ورزی و شخم مرسوم) بر طول ریشه نشان داد که روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و فعالیت‌های ریشه محصول، شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشیده و غنای تغذیه‌ای آن را افزایش می‌دهند. این تغییرات به بهبود ترکیبات میکروبی و افزایش جمعیت میکروبی در ریزوسفر کمک کرده و در نهایت به بهبود شرایط غذایی خاک و طول ریشه منجر می‌شود (Wang et al., 2020). نتایج سایر محققان نیز بیانگر آن بود که در خاک‌هایی که خاک‌ورزی انجام می‌گیرد، به علت جابه‌جایی ذرات خاک، تراکم خاک کاهش یافته و نفوذ و گسترش ریشه‌ها بیشتر است (Sha et al., 2024). تأثیر کاشت بقولات علوفه‌ای بر طول ریشه قابل توجه است، زیرا بقولات دارای ویژگی‌های رشد ریشه منحصربه‌فرد است که سلامت خاک و پویایی مواد مغذی را افزایش می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که حبوبات علوفه‌ای، طول ریشه و معماری متفاوتی را نشان می‌دهند که می‌تواند ساختار خاک را بهبود ببخشد (Acikbas et al., 2021).

حجم ریشه

از نظر آماری اثر اصلی سال، خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر حجم ریشه تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال خطای یک درصد داشتند (جدول ۳). تغییرات حجم ریشه طی سال‌های زراعی مختلف نشان داد که بیشترین میزان حجم ریشه با میانگین ۹/۷۹ سانتی‌مترمکعب متعلق به سال دوم بود (جدول ۴). نتایج برهم‌کنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر حجم ریشه نشان داد که بیشترین میزان حجم ریشه با میانگین ۱۱/۷ سانتی‌مترمکعب در گیاه ماشک در کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد و نسبت به کمترین حجم ریشه در گیاه باقلا رقم برکت

(جدول ۵). در بیان چرایی این رویداد می‌توان گفت که خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند خاک را، به‌ویژه در خاک سطحی، فشرده کند و تعداد و اندازه منافذی را که ریشه‌ها برای رشد به آن نیاز دارند، کاهش دهد. این فشرده‌سازی می‌تواند باعث شود که ریشه‌ها به‌جای نفوذ عمیق، به‌صورت جانبی در نزدیکی سطح رشد کنند و در نتیجه سیستم ریشه‌ای کم‌عمق‌تر و فشرده‌تر ایجاد شود. در برخی موارد، فشرده‌سازی می‌تواند باعث افزایش قطر ریشه‌ها در اثر مواجهه با مقاومت شود، اما این اغلب با کاهش طول کلی ریشه و زیست‌توده

همراه است. ولی در سیستم‌های شخم حفاظتی، عملیات شخم موجب ایجاد ساختار خاک مطلوب‌تری با منافذ بزرگ‌تر و فشرده‌گی کمتر می‌شود. این می‌تواند منجر به نفوذ عمیق‌تر ریشه و توزیع یکنواخت‌تر ریشه‌ها شود، که به‌دلیل مقاومت کمتر، احتمالاً قطرهای کوچک‌تری دارند. اثر خاص شخم بر قطر ریشه به عوامل مختلفی از جمله نوع خاک، گونه‌های گیاهی و شیوه‌های خاص شخم مورد استفاده نیز بستگی دارد (Ahmadi et al., 2025; Holder et al., 2025).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر اصلی خاک‌ورزی و کاشت گیاهان علوفه بر برخی عناصر غذایی و صفات ریشه

Table 6- Mean the main effects Tillage and planting forage crops on some nutrients and root traits

تیماها Treatments	قطر ریشه Root diameter (mm)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)	نیتروژن N (%)	پتاسیم K (%)	آهن Fe (ppm)	منگنز Mn (ppm)	تنفس خاک Soil respiration (mg CO ₂ g ⁻¹ dm ⁻¹ 24 ⁻¹)
خاک‌ورزی Tillage								
مرسوم Conventional	2.40 ^{a*}	6.93 ^a	2.48 ^a	3.96 ^b	2.90 ^a	192.07 ^a	105.92 ^a	0.65 ^a
کم‌خاک‌ورزی Reduced tillage	1.67 ^b	5.58 ^b	2.09 ^b	4.95 ^a	2.311 ^b	184.29 ^b	98.81 ^b	0.56 ^b
بدون خاک‌ورزی No tillage	1.62 ^b	5.16 ^c	1.96 ^b	3.66 ^c	2.19 ^c	182.56 ^c	97.56 ^b	0.51 ^b
بقولات علوفه‌ای Forage crops								
باقلا توده بروجرد Faba bean (Borujerd landrace)	1.60 ^{bc}	5.59 ^c	1.93 ^{cd}	3.75 ^{cd}	2.19 ^b	182.32 ^c	97.28 ^c	0.55 ^{cd}
ماشک رقم لامعی Vetch (c.v. Lamei)	2.52 ^a	8.05 ^a	2.75 ^a	5.28 ^a	2.91 ^a	198.43 ^a	108.25 ^a	0.68 ^a
خلر Grass pea	1.74 ^b	6.03 ^b	2.31 ^b	4.35 ^b	2.36 ^b	187.13 ^b	103.23 ^b	0.60 ^b
باقلا رقم برکت Faba bean (c.v. Barkat)	1.45 ^c	4.20 ^d	1.74 ^d	3.47 ^d	2.10 ^b	178.64 ^d	94.20 ^d	0.47 ^d
باقلا رقم فیض Faba bean (c.v. Feyz)	1.69 ^b	5.72 ^{bc}	2.61 ^{bc}	4.02 ^c	2.27 ^b	185.13 ^{bc}	100.20 ^{bc}	0.53 ^{bc}

* میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون برای هر عامل تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح پنج درصد براساس آزمون LSD ندارند.

* Similar letters in each column for each factor are not significantly different based on LSD test ($p \leq 0.05$).

مطالعات نشان می‌دهند که خاک‌ورزی بر رشد و توزیع ریشه تأثیر دارند و روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی موجب رشد و توزیع بیشتر ریشه در لایه سطحی خاک می‌شوند (Wasaya et al., 2019). عملیات خاک‌ورزی با ایجاد تغییر در ساختمان خاک، شکستن لایه‌های خاک و سست نمودن آن باعث کاهش مقاومت خاک گردیده و در نتیجه ریشه‌های گیاهان مورد مطالعه توانستند از قطر

ریشه بیشتری برخوردار باشند. از سوی دیگر، نتایج تحقیقاتی نشان داد که گیاهان تحت خاک‌ورزی مرسوم، ریشه‌های طولانی‌تر و توده ریشه‌ای بزرگ‌تری (قطر بیشتر) داشتند که به جذب بهتر مواد مغذی و آب کمک کرده و رشد زیست‌توده و تجمع عناصر درشت را تحریک می‌کند (Szczepanek et al., 2024). نتایج یک پژوهش نشان داد که روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و فعالیت‌های ریشه محصول،

یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در بین دو سال زراعی، سال دوم با میانگین $0/61$ میلی گرم دی اکسیدکربن در سانتی مترمربع در روز از تنفس خاک بیشتری برخوردار بود (جدول ۴). در بین سیستم‌های خاک‌ورزی، بیشترین تنفس خاک به سیستم خاک‌ورزی مرسوم با میانگین $0/65$ میلی گرم دی اکسیدکربن در سانتی مترمربع در روز اختصاص یافت که نسبت به سیستم کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی به ترتیب 14 و 21 درصد تنفس خاک را افزایش داد. در بین گیاهان علوفه‌ای نیز بیشترین کمترین تنفس خاک با میانگین‌های $0/68$ و $0/47$ میلی گرم دی اکسیدکربن در سانتی مترمربع در روز به ترتیب در گیاه ماشک و باقلا رقم برکت مشاهده شد. گیاه باقلا توده بروجرد با باقلا رقم برکت و گیاه خلر با باقلا رقم فیض اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۵).

در این مطالعه در سیستم شخم مرسوم به دلیل زیرورو شدن خاک، اکسیژن بیشتری به ریزجانداران خاک رسیده و با در معرض هوا قرار گرفتن مواد آلی خاک، شرایط برای افزایش تجزیه مواد و در نتیجه افزایش تنفس فراهم می‌گردد و به همین دلیل، در سیستم شخم مرسوم میزان تنفس خاک بیشتر از دو سیستم دیگر می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد که خاک‌ورزی مرسوم با افزایش تجزیه‌پذیری بقایا سبب افزایش میزان تنفس در خاک نسبت به دو سیستم دیگر در منطقه مورد مطالعه شده و برخی از اثرات نامطلوب را تعدیل کرده است. صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2019) عنوان داشتند که سرعت بالای تجزیه در گیاهان در سیستم خاک‌ورزی مرسوم نسبت به سیستم کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی سبب افزایش تنفس میکروبی خاک شده است. در آزمایشی دیگر نائل و همکاران (Nael et al., 2023) در یک مطالعه، اثر خاک‌ورزی و گیاهان پوششی بر خصوصیات خاک در گیاه ذرت را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که خاک‌ورزی مرسوم در مقایسه با سیستم بدون خاک‌ورزی موجب بهبود اغلب خصوصیات خاک از جمله تنفس پایه شد. همچنین اظهار داشتند که دو گیاه پوششی ماشک و خلر باعث افزایش تنفس پایه به میزان 30 درصد بیشتر از تیمار بدون گیاهان پوششی شد. آن‌ها عنوان داشتند که دلیل اصلی افزایش تنفس در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، افزایش تجزیه کربن بوده که در هر منطقه بیشترین میزان تنفس در این سیستم مشاهده شد و سیستم‌های بدون شخم و حفاظتی به دلیل تجزیه کمتر کربن، میزان تنفس کمتری داشتند.

عناصر غذایی در اندام‌های هوایی

نیترژن

اثر اصلی خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای بر مقدار نیترژن

شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشیده و غنای تغذیه‌ای آن را افزایش می‌دهند. این تغییرات به بهبود ترکیبات میکروبی و افزایش جمعیت میکروبی در ریزوسفر کمک کرده و در نهایت به افزایش قطر ریشه منجر می‌شود (Wang et al., 2020).

وزن تر و خشک ریشه

طبق جدول تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳)، اثر اصلی سال، خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای در سطح احتمال خطای یک درصد بر وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی بر وزن خشک و تر ریشه (جدول ۴) نشان داد که سال دوم نسبت به سال اول، 29 درصد وزن خشک ریشه و 23 درصد وزن تر ریشه بیشتری برخوردار بود. در بین نظام‌های خاک‌ورزی نیز مشاهده شد که سیستم خاک‌ورزی مرسوم با میانگین‌های $2/48$ و $6/93$ گرم به ترتیب بیشترین میزان وزن خشک و تر ریشه را به خود اختصاص داد و نسبت به کمترین میزان آن‌ها در بدون خاک‌ورزی به میزان 20 درصد وزن خشک و 26 درصد وزن تر ریشه را افزایش داد. تغییرات وزن تر و خشک ریشه در بین بقولات علوفه‌ای مختلف کاشت‌شده نشان داد که گیاه ماشک با میانگین‌های $2/74$ و $8/05$ گرم به ترتیب از بیشترین وزن خشک و تر ریشه برخوردار بود که نسبت به کمترین میزان آن‌ها در گیاه باقلا رقم برکت به میزان 50 درصد وزن خشک و 49 درصد وزن تر ریشه را افزایش داد. گیاه باقلا توده بروجرد با گیاه باقلا رقم فیض اختلاف معنی‌داری از نظر وزن خشک و تر ریشه ایجاد نکرد (جدول ۵).

در این آزمایش به دلیل اینکه گیاه ماشک در بین نظام‌های خاک‌ورزی مختلف دارای بیشترین طول ریشه، حجم ریشه و قطر ریشه بود، در نتیجه از بیشترین وزن تر و خشک ریشه نیز برخوردار بود. در توجیه کاهش وزن ریشه در بدون خاک‌ورزی می‌توان چنین استنباط نمود که افزایش فشردگی خاک باعث کاهش تخلخل خاک و اکسیژن موجود در خاک گردید و در نتیجه اکسیژن که به عنوان فعال‌کننده تغذیه گیاه محسوب می‌شود، به اندازه کافی برای تهویه در دسترس ریشه قرار نگرفت. ربیعی و همکاران (Rabiee et al., 2021) در بررسی اثر خاک‌ورزی بر وزن ریشه اظهار داشتند که بیشترین وزن ریشه در خاک‌ورزی مرسوم حاصل شد که نسبت به بدون خاک‌ورزی به میزان 12 درصد وزن ریشه را افزایش داد.

تنفس خاک

تنفس خاک نقش مهمی در تولید کربن بوم‌نظام‌های خشکی دارد و اندازه‌گیری آن برای بودجه‌بندی کربن ضروری است. نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که تنفس خاک تحت تأثیر اصلی سال، سیستم خاک‌ورزی و کاشت گیاهان علوفه‌ای در سطح احتمال خطای

باشند، به این دلیل که راندمان استخراج نیتروژن در دسترس در نظام‌های مذکور کمتر از خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد. طی پژوهشی مشاهده شد که مقدار نیتروژن کل اندام هوایی و انباشتگی نیتروژن در دانه تحت تأثیر خاک‌ورزی قرار گرفت. بیشترین نیتروژن کل و نیتروژن محتوای دانه ذرت در خاک‌ورزی مرسوم و کمترین آن در بدون خاک‌ورزی گزارش شده است (Canisares et al., 2021). همچنین طی آزمایشی در بررسی تأثیر خاک‌ورزی بر غلظت عناصر و عملکرد گندم در ایلام گزارش شد که تیمار بدون خاک‌ورزی نسبت به دو تیمار دیگر باعث کاهش عناصر غذایی دانه از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم شد، به طوری که بیشترین میزان فسفر و پتاسیم در خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد که با کم‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری نداشت (Chaieb et al., 2020).

فسفر

تجزیه و تحلیل عنصر فسفر در تیمارهای مختلف اعمال شده، تأثیر معنی‌داری سال، خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای را در سطح احتمال خطای یک درصد نشان داد (جدول ۶). نتایج نشان داد که در بین دو سال زراعی، سال دوم با میانگین ۰/۸۶ درصد از فسفر بیشتری برخوردار بود که نسبت به سال اول ۱۳ درصد میزان فسفر را افزایش داد (جدول ۵). عناصر غذایی بالاتر در سال دوم می‌تواند به دلیل شرایط آب‌وهوایی مناسب و میزان بارندگی بیشتر باشد. نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر فسفر موجود در اندام‌های هوایی نشان داد که گیاه ماشک در نظام خاک‌ورزی مرسوم با میانگین ۰/۸۵ درصد و کم‌خاک‌ورزی با میانگین ۰/۸۴ درصد، بیشترین میزان فسفر را به خود اختصاص دادند. کمترین میزان فسفر با میانگین ۰/۶۳ درصد نیز در گیاه باقلا رقم برکت در نظام‌های بدون خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد. بین گیاه باقلا توده بروجرد با گیاهان خمر و باقلا رقم فیض در نظام خاک‌ورزی مرسوم و گیاه باقلا توده بروجرد با گیاه باقلا رقم فیض در کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴).

موجود در اندام‌های هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر خاک‌ورزی بر عنصر غذایی نیتروژن در اندام‌های هوایی نشان داد که بیشترین و کمترین میزان نیتروژن با میانگین‌های ۴/۹۵ و ۳/۶۶ درصد به ترتیب در شرایط کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی مشاهده شد. براساس نتایج مقایسه میانگین تیمار بقولات علوفه‌ای، بیشترین میزان نیتروژن به گیاه ماشک با میانگین ۵/۲۸ درصد تعلق داشت که نسبت به کمترین میزان آن در گیاه باقلا رقم برکت به میزان ۴۰ درصد نیتروژن را در اندام‌های هوایی افزایش داد. گیاه باقلا توده بروجرد با رقم برکت و فیض اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۴).

استفاده از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی مانند بی‌خاک‌ورزی می‌تواند کیفیت خاک را بهبود بخشد و از اختلال در ساختار آن جلوگیری کند. این روش‌ها به حفظ ساختار خاک کمک کرده و فرایندهای بیولوژیکی و تنوع زیستی میکروبی را افزایش می‌دهند. ریزوبیوم‌ها به عنوان شاخص کیفیت خاک شناخته می‌شوند و نقش مهمی در تثبیت نیتروژن دارند که می‌تواند به بهبود سیستم‌های کشاورزی کمک کند. همچنین روش‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های مختلف خاک تأثیر می‌گذارند که بر ترکیب میکروبی و تثبیت نیتروژن اثرگذار است (Torabian et al., 2019). خاک‌ورزی تأثیر زیادی بر وضعیت نیتروژن خاک و دسترسی آن برای گیاهان دارد. نیتروژن موجود در بقایای گیاهی تنها از طریق فعالیت‌های میکروبی و فرایندهای معدنی قابل استفاده است. خاک‌ورزی شدید با زیر و رو کردن خاک، تهویه را افزایش داده و باعث تجزیه سریع بقایای گیاهی و دسترسی فوری نیتروژن می‌شود. در مقابل، کم‌خاک‌ورزی یا بی‌خاک‌ورزی در کشاورزی حفاظتی، تجزیه آهسته‌تری از بقایای گیاهی را به همراه دارد و نیتروژن به تدریج آزاد می‌شود (Wu et al., 2021). محققان بیان داشتند که دلیل کاهش نیتروژن در خاک‌ورزی متداول تهویه مطلوب، اکسید شدن و کاهش مواد آلی خاک می‌باشد (Ramroudi et al., 2011).

گیاهان مذکور در دو نظام خاک‌ورزی کاهشی و بدون خاک‌ورزی برای اینکه عملکردی مشابه خاک‌ورزی مرسوم داشته باشند، ممکن است به مقدار بیشتری از کودهای شیمیایی نیتروژن نیاز داشته

جدول ۶- تجزیه واریانس مرکب اثر خاک‌ورزی بر برخی عناصر غذایی بقولات علوفه‌ای

Table 7- Combined analysis of variance of tillage on forage crops some nutrients

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares						
		نیترژن N	فسفر P	پتاسیم K	مس Cu	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn
سال Year (Y)	1	8.41 ^{ns}	0.0008 ^{**}	2.38 ^{ns}	48.11 ^{**}	48.10 ^{ns}	118.08 ^{ns}	225.84 ^{ns}
تکرار در سال R/Y	4	12.45	0.0001	5.50	5.31	1110.79	798.33	523.14
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	13.32 ^{**}	0.05 ^{**}	0.69 [*]	415.21 ^{**}	828.01 ^{**}	663.29 ^{**}	320.07 [*]
سال × خاک‌ورزی Y × T	2	9.74 ^{ns}	2.15 ^{ns}	4.92 ^{ns}	2.42 ^{ns}	2.20 ^{ns}	1.38 ^{ns}	8.35 ^{ns}
خطای a a	8	0.05	0.0003	0.01	0.86	3.40	7.32	24.38
بقولات علوفه‌ای Forage crops (FC)	4	9.29 ^{**}	0.05 ^{**}	1.69 ^{**}	448.99 ^{**}	1023.17 ^{**}	543.83 ^{**}	145.09 ^{**}
سال × بقولات علوفه‌ای Y × FC	4	1.05 ^{ns}	1.85 ^{ns}	1.89 ^{ns}	3.93 ^{ns}	1.52 ^{ns}	2.43 ^{ns}	7.61 ^{ns}
خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای T × FC	8	0.37 ^{ns}	0.005 ^{**}	0.07 ^{ns}	3.93 ^{**}	9.65 ^{ns}	33.77 ^{ns}	19.35 [*]
سال × خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای Y × T × FC	8	3.67 ^{ns}	1.45 ^{ns}	5.87 ^{ns}	3.66 ^{ns}	1.83 ^{ns}	7.97 ^{ns}	5.45 ^{ns}
خطای b Error b	48	0.24	0.0004	0.17	0.71	28.30	23.08	9.78
ضریب تغییرات C.V (%)	-	12.0	2.6	4.9	2.2	2.8	4.8	6.8

ns, * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطوح احتمال خطای پنج و یک درصد.

ns, * and **: are non-significant and significant in probability levels of 5 and 1 %, respectively.

کم‌خاک‌ورزی توانست میزان انتقال فسفر به گیاه را بهبود ببخشد. در ارتباط با چرای این پدیده گزارش شده است که افزایش سرعت جذب فسفر توسط گیاه میزبان به دلیل حضور انشعابات فراوان هیف‌های میکوریزا در داخل سلول‌های پوست ریشه گیاه است که سطح وسیعی را برای انتقال عناصر غذایی به خصوص فسفر به گیاه میزبان و دانه فراهم می‌نماید (Rahimzadeh & Pirzad, 2017). محققان بیان داشتند که علت افزایش فسفر گیاه در شرایط کم‌خاک‌ورزی به دلیل قابلیت دسترسی بیشتر به فسفر و نیترات در سطح خاک بود (Wright et al., 2009).

پتاسیم

نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۶)، نشان داد که اثر خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای بر مقدار پتاسیم در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین میزان پتاسیم با میانگین ۲/۹۰ درصد در خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد که نسبت به بدون خاک‌ورزی به میزان ۲۷ درصد

تفاوت درصد فسفر بین روش‌های مختلف خاک‌ورزی ناشی از بهبود دسترسی به فسفر با توجه به رشد مناسب ریشه و فشردگی کمتر خاک، در شرایط کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی متداول نسبت به بی‌خاک‌ورزی است. شرایط خاک در سامانه بی‌خاک‌ورزی برای رشد ریشه نامناسب بوده که سبب ایجاد محدودیت در جذب آب و عناصر غذایی برای گیاه می‌شود. به نظر می‌رسد که به هم‌خوردگی و آشفستگی خاک در سامانه خاک‌ورزی مرسوم، فسفر قابل جذب در محلول خاک و به دنبال آن قابلیت دسترسی ریشه به این عنصر پرمصرف را در یک بازه زمانی کوتاه افزایش می‌دهد. صرف نظر از نوع مدیریت خاک، فرآیند معدنی شدن عناصر موجود در ساختار بقایای آلی تحت شرایط تهویه‌ای مطلوب توسط آنزیم‌های فسفومونواستراز به آسانی انجام می‌گیرد (Xiaozhu et al., 2016). استانکوفسکی و همکاران (Stankowski et al., 2022) اشاره کردند که در کشت معمولی، توزیع فسفر در نیم‌رخ خاک یکنواخت‌تر از کشت حفاظتی است. این تفاوت ناشی از اختلاط و چرخش مکرر خاک در سیستم شخم است، درحالی که در کشت حفاظتی، به دلیل تحرک کمتر، فسفر در لایه‌های کم‌عمق خاک تجمع می‌یابد. عدم به هم‌خوردگی خاک در

۴). برهم‌کنش خاک‌ورزی $\times$ بقولات علوفه‌ای بر میزان مس در اندام هوایی گویای این مطلب بود که بیشترین میزان مس به گیاه ماشک در خاک‌ورزی مرسوم با میانگین $50/17$ پی‌پی‌ام تعلق یافت و نسبت به کمترین میزان آن در گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی به میزان 44 درصد عنصر مس را افزایش داد. گیاه باقلا رقم برکت در خاک‌ورزی مرسوم با گیاه خلر در دو نظام دیگر، گیاه خلر با گیاه باقلا رقم فیض در خاک‌ورزی مرسوم، گیاه باقلا رقم برکت در کم‌خاک‌ورزی با گیاه باقلا توده بروجرد در بدون خاک‌ورزی و گیاه باقلا در رقم فیض در کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. همچنین نتایج برهم‌کنش خاک‌ورزی $\times$ بقولات علوفه‌ای بر عنصر روی نشان داد که بیشترین میزان این عنصر در گیاه ماشک در کم‌خاک‌ورزی با میانگین $50/69$ پی‌پی‌ام مشاهده شد که با همین رقم در دو نظام دیگر اختلاف معنی‌داری نداشت و از طرفی نسبت به کمترین میزان روی در گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی به میزان 24 درصد روی را افزایش داد. بین گیاه خلر با گیاه باقلا رقم برکت و فیض در خاک‌ورزی مرسوم با گیاه خلر و باقلا رقم فیض در کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴).

نتایج مقایسه میانگین خاک‌ورزی بر عنصر آهن و منگنز اندام هوایی نشان داد که بیشترین و کمترین میزان آهن با میانگین‌های $192/08$ و $182/56$ پی‌پی‌ام و منگنز با میانگین‌های $105/92$ و $97/56$ پی‌پی‌ام به ترتیب در خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی مشاهده شد. در بین بقولات علوفه‌ای نیز گیاه ماشک با میانگین $198/43$ و $178/64$ پی‌پی‌ام به ترتیب از بیشترین میزان آهن و منگنز برخوردار بود که نسبت به کمترین میزان آن در گیاه باقلا رقم برکت به میزان 11 درصد آهن و 47 درصد منگنز را افزایش داد. گیاه باقلا رقم فیض با گیاه باقلا توده بروجرد در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۵). خاک‌ورزی مرسوم گاهی اوقات می‌تواند به دلیل افزایش معدنی شدن و کاهش اختلاط خاک منجر به غلظت بیشتر این ریزمغذی‌ها در خاک سطحی شود، اما می‌تواند باعث شسته شدن یا کاهش دسترسی این مواد مغذی به گیاهان نیز شود. عوامل دیگری مانند نوع خاک، pH و محتوای مواد آلی نیز نقش مهمی در دسترسی به ریزمغذی‌ها دارند (Shiwakoti et al., 2019; Stankowski et al., 2022). با توجه به محدودیت عناصر غذایی به‌ویژه عناصر کم‌مصرف که در مناطق جنوبی کشور تحت عملیات خاک‌ورزی رایج و کاهش ماده آلی خاک تشدید شده است، استفاده از کودهای شیمیایی را جهت حفظ پتانسیل عملکرد گیاه زراعی اجتناب‌ناپذیر می‌کند. بنابراین، تلفیق مدیریت خاک‌ورزی و کوددهی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در تولید محصول، بهره‌وری پایدار و بهبود کارایی عناصر غذایی داشته باشد (Sarikhani et al., 2018). محققان در بررسی اثر تراکم خاک بر جذب مواد معدنی و فعالیت آنزیم‌های تنفسی کلیدی

پتاسیم را افزایش داد. بیشترین و کمترین میزان پتاسیم با میانگین‌های $2/91$ و $2/10$ درصد به ترتیب از گیاه ماشک و گیاه باقلا رقم برکت به دست آمد. گیاه باقلا رقم برکت با رقم فیض و توده بروجرد و گیاه خلر در یک گروه آماری قرار داشتند (جدول ۵). در سیستم کشاورزی حفاظتی، عناصری مانند پتاسیم تحت تأثیر مدیریت کم‌خاک‌ورزی قرار می‌گیرند و تمایل به انباشته شدن در سطح خاک را دارند. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده مداوم از نظام بدون شخم باعث توزیع لایه‌ای پتاسیم در نیم‌رخ خاک می‌شود. در این توزیع، غلظت‌های نسبتاً زیاد پتاسیم در نزدیکی سطح و غلظت‌های نسبتاً کم در عمق‌های پایین‌تر نسبت به سیستم کشاورزی مرسوم مشاهده می‌شود (Kumar et al., 2022). خاک‌ورزی مرسوم، با روش‌هایی مانند شخم زدن و چنگک زدن، ساختار خاک را مختل می‌کند و مواد آلی را در معرض تجزیه سریع‌تر قرار می‌دهد. این می‌تواند منجر به آزاد شدن پتاسیم شود و آن را به‌ویژه در خاک‌های شنی، مستعد آب‌شویی کند. از طرفی، ساختار سست خاک ناشی از خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند احتمال شسته شدن پتاسیم توسط آب را افزایش دهد، به‌ویژه در مناطقی که بارندگی یا آبیاری وجود دارد (Hosseini et al., 2015). محققان طی آزمایشی طولانی‌مدت به منظور بررسی اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر کربن آلی خاک و مواد مغذی خاک در سورگوم گزارش دادند که پتاسیم خاک در بدون خاک‌ورزی بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم است (Malobane et al., 2020)، که با نتایج این تحقیق متفاوت بود. لیبیک و همکاران (Lipiec et al., 2003) گزارش کردند که تراکم شدن خاک به دلیل کاهش سطح ریشه، جذب پتاسیم توسط ذرت را کاهش داد. آن‌ها بیان کردند که در خاک‌های فشرده بدون استفاده از کود پتاسیم، جذب پتاسیم در واحد سطح ریشه نمی‌تواند کمبود پتاسیم ناشی از محدودیت رشد ریشه را جبران کند. چگنی و همکاران (Chegeni et al., 2014) اظهار کردند که در روش‌های بدون خاک‌ورزی به دلیل بازگشت بقایای گیاه‌های به افق‌های سطحی خاک، افزایش میزان مواد آلی مشاهده شد، درحالی که در روش‌های خاک‌ورزی مرسوم به هم خوردن خاک باعث تجزیه بیشتر و زودتر بقایای گیاهی شده که در نتیجه کاهش میزان پتاسیم را به همراه داشت.

عناصر میکرو (مس، آهن، منگنز و روی)

از نظر آماری اثر اصلی سال بر عنصر مس، خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای بر عناصر آهن، روی، مس و منگنز و اثر متقابل خاک‌ورزی $\times$ بقولات علوفه‌ای بر عنصر مس و روی در اندام‌های هوایی تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال خطای یک و پنج درصد داشتند (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین، سال دوم نسبت به سال اول هشت درصد از میزان مس بیشتری برخوردار بود (جدول

برخوردار بود، به دست آمد. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی $\times$ کاشت بقولات علوفه‌ای نشان داد که بیشترین پتانسیل عملکرد خشک و تر علوفه، طول ریشه، غلظت عنصر فسفر و تنفس خاک در خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی و کاشت گیاه ماشک بدون تفاوت معنی‌دار با یکدیگر مشاهده شد. همچنین بیشترین میزان حجم ریشه و غلظت عنصر روی از کم‌خاک‌ورزی و گیاه ماشک به دست آمد. مقایسه میانگین اثرات کاشت بقولات علوفه‌ای مختلف بر صفات اندازه‌گیری نیز نشان داد که بیشترین میزان عملکرد، صفات ریشه و عناصر غذایی در گیاه ماشک مشاهده شد. در مجموع، گیاه ماشک مناسب‌ترین بقولات علوفه‌ای برای روش‌های مختلف خاک‌ورزی تحت شرایط آب‌وهوایی خرم‌آباد قابل توصیه است. در بین روش‌های مختلف خاک‌ورزی، اگرچه تفاوتی بین خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی در گیاه ماشک مشاهده نشد، اما خاک‌ورزی حداقل به‌منظور حفاظت از منبع تولید خاک و بهره‌مندی از مزایای کشاورزی حفاظتی و کاهش هزینه تهیه بستر، مناسب‌تر از خاک‌ورزی مرسوم است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از اساتید محترم و کارکنان آزمایشگاه مرکز تحقیقات خرم‌آباد بابت راهنمایی و کمک‌هایشان در طول پروژه تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

در گیاه سویا (*Glycine max* L.) به این نتیجه دست یافتند که تراکم بالای خاک منجر به تجمع پتاسیم، فسفر، منیزیم، منگنز، آهن، مس، روی و کلسیم در خاک شده و کاهش فعالیت آنزیم‌های ایزوسیسترات دهیدروژناز و سیتوکروم c اکسیداز را به دنبال دارد که در ادامه منجر به کاهش اندازه سلول‌های ریشه در گیاه سویا می‌گردد (Wang et al., 2019). فشردگی خاک باعث کاهش انتشار اکسیژن و ایجاد شرایط بی‌هوازی در اطراف ریشه گیاه می‌شود که این امر منجر به کاهش رشد ریشه و مختل شدن جذب فعال عناصر آهن، روی و مس می‌شود. همچنین تحقیقات محمودی و همکاران (Mahmoudi et al., 2015) نشان داد که به‌طور کلی، تأثیر فشردگی خاک بر جذب عناصر غذایی به وضعیت سیستم ریشه بستگی دارد. ریشه‌های گیاهی برای تأمین مواد مغذی از طریق خاک رشد می‌کنند. از آنجاکه ریشه در خاک رشد می‌کند، به‌طور کلی فقط با حدود یک درصد حجم خاک در تماس می‌باشد. ساختار خوب خاک در فرآیند رهگیری ریشه ضروری است. فشردگی خاک می‌تواند به‌طور قابل توجهی رشد ریشه و رهگیری با مواد مغذی در سراسر خاک را محدود کند. برخی از عناصر ماکرو و ریزمغذی مهم مانند کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز و روی توسط ریشه جذب می‌شوند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که طول ریشه، حجم ریشه، قطر ریشه، وزن خشک و تر ریشه، غلظت عناصر مس، فسفر و تنفس خاک بالاتر در سال دوم آزمایش که از میزان و توزیع بارش بهتری

References

- Acikbas, S., Ozyazici, M. A., & Bektas, H. (2021). Root system architecture and seed weight relations in forage pea (*Pisum sativum* ssp. *arvense* L.). *Ciência Rural*, 52(6), e20210032. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210032>
- Afshon, E., Moghadam, H., Jahansooz, M. R., Soufizadeh, S., & Oveisi, M. (2020). Effect of tillage, water stress and nitrogen fertilizer on forage quality of maize in Karaj. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(3), 25-40. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2020.295521.654681>
- Ahmadi, H., Mirseyed Hosseini, H., Moshiri, F., Alikhani, H. A., & Etesami, H. (2024). Impact of varied tillage practices and phosphorus fertilization regimes on wheat yield and grain quality parameters in a five-year corn-wheat rotation system. *Scientific Reports*, 14(1), 14717. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65784-w>
- Ahmadi, S. H., Seidel, S. J., Lopez, G., Kamali, B., Gaiser, T., Hadir, S., & Ochoa, I. H. (2025). Root: Shoot ratio of field crops under conventional and conservation tillage: A Meta analysis. *Soil Use and Management*, 41(1), e70026. <https://doi.org/10.1111/sum.70026>
- Anderson, J. P. (1982). Soil respiration. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 831-871. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41>
- Burr-Hersey, J. E., Mooney, S. J., Bengough, A. G., Mairhofer, S., & Ritz, K. (2017). Developmental morphology of cover crop species exhibits contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *Plos One*, 12(7), e0181872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181872>
- Canisares, L. P., Grove, J., Miguez, F., & Poffenbarger, H. (2021). Long-term no-till increases soil nitrogen mineralization but does not affect optimal corn nitrogen fertilization practices relative to inversion tillage. *Soil and Tillage Research*, 213, 105080. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105080>
- Chaieb, N., Rezguia, M., Ayedeb, S., Bahria, H., Cheikh, H., M'hameda, M. R., & Annabia, M. (2020). Effects of

- tillage and crop rotation on yield and quality parameters of durum wheat in Tunisia. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 44(2), 7654-7676. <https://doi.org/10.35759/JANmPLSci.v44-2.7>
9. Chegeni, M., Ansari-Dust, S. H., & Eskandari, H. (2014). Effect of tillage methods and residuals management on some physical properties of soil to achieve sustainable agriculture. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(2), 31-40. (in Persian with English abstract).
10. Feyzbakhsh, M. (2023). Comparison of quantitative and qualitative forage yield of forage plants vetch, khollar and faba bean in the climatic conditions of Gorgan. *Forage and Animal Feed*, 4(1), 48-55. (in Persian).
11. Gomez-Munoz, B., Hatch, D. J., Bol, R., & García-Ruiz, R. (2014). Nutrient dynamics during decomposition of the residues from a sown legume or ruderal plant cover in an olive oil orchard. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 184, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.020>
12. Holder, A. J., Robson, P., & McCalmont, J. P. (2025). Effect of tillage method on early root growth of *Miscanthus*. *Annals of Applied Biology*, 1-13. <https://doi.org/10.1111/aab.70006>
13. Hosseini, M., Movahedi Naeini, S. A. R., & Bameri, A. (2015). The Effects of different tillage methods on available soil potassium measured by various extractors in a soil with high specific surface area. *Water and Soil*, 29(4), 966-979. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.21882>
14. Howard, J., & Lincoln, J. M. (2023). Future of work in agriculture. *Journal of Agromedicine*, 28(1), 14. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2022.2137615>
15. Kebede, E. (2021). Contribution, utilization, and improvement of legumes-driven biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 767998. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.767998>
16. Kumar, G., Kumari, R., Shambhavi, S., Kumar, S., Kumari, P., & Padbhushan, R. (2022). Eight-year continuous tillage practice impacts soil properties and forms of potassium under maize-based cropping systems in inceptisols of Eastern India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(5), 602-621. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.2017961>
17. Khosropour, E., Attarod, P., Shirvany, A., Pypker, T. G., Bayramzadeh, V., Hakimi, L., & Abbasian, P. (2018). Management of pomegranate orchards influences the decomposition of soil organic matter and soil aggregate stability under drought conditions. *Journal of Arid Land*, 10(3), 391-402.
18. Lipiec, J., Medvedev, V. V., Birkas, M., Dumitru, E., Lyndina, T. E., Rousseva, S., & Fulajtar, E. (2003). Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics*, 17(2), 61-69. <https://www.international-agrophysics.org/pdf-106728-37570?filename=Effect-of-soil-compaction.pdf>
19. López-Garrido, R., Madejón, E., León-Camacho, M., Girón, I., Moreno, F., & Murillo, J. M. (2014). Reduced tillage as an alternative to no-tillage under Mediterranean conditions: A case study. *Soil and Tillage Research*, 140, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.008>
20. Mahmoudi, S., Najafi, N., & Reyhanitabar, A. (2015). Effect of soil moisture and sewage- sludge compost on some soil chemical properties and alfalfa forage macronutrients concentrations in greenhouse conditions. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 6(22), 37-55. (in Persian with English abstract).
21. Malobane, M. E., Nciizah, A. D., Mudau, F. N., & Wakindiki, I. I. (2020). Tillage, crop rotation and crop residue management effects on nutrient availability in a sweet sorghum-based cropping system in marginal soils of South Africa. *Agronomy*, 10(6), 776. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060776>
22. Mansour, E., Mahgoub, H. A., Mahgoub, S. A., El-Sobky, E. S. E., Abdul-Hamid, M. I., Kamara, M. M., & Desoky, E. S. M. (2021). Enhancement of drought tolerance in diverse *Vicia faba* cultivars by inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria under newly reclaimed soil conditions. *Scientific Reports*, 11(1), 24142. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02847-2>
23. Nael, M., Salehi, S. S., Hamzei, J., & Zandi Baghche-Maryam, M. (2023). Three-year effects of conservation tillage and cover on selected soil quality indicators and corn yield components. *Journal of Water and Soil*, 36(6), 773-785. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78321.1195>
24. Peigné, J., Vian, J. F., Payet, V., & Saby, N. P. (2018). Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 175, 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.008>
25. Rabiee, M., Majedian, M., & Kavooosi, M. (2021). Effects of tillage systems, planting method and nitrogen amounts on the yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) and some properties of soil in paddy field conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(1), 221-237. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/SAPS.2021.12809>
26. Rahimzadeh, S., & Pirzad, A. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas* in reduce drought stress damage in flax (*Linum usitatissimum* L.): A field study. *Mycorrhiza*, 27(6), 537-552. <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0775-y>
27. Ramadhan, M., & Muhsin, S. (2021). Evaluation of the response of sorghum to tillage systems and nitrogen fertilization. *International Journal of Agronomy*, 2021(1), 6614962. <https://doi.org/10.1155/2021/6614962>
28. Ramesh, J. V. N., Khandekar, S. D., Baburao, D., Singh, M., Biban, L., Muniyandy, E., & Desingurajan, N.

- (2024). Harnessing remote sensing and geographic information systems to address soil degradation and water scarcity in climate change era. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 7(2), 139-147. <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00108-0>
29. Ramroudi, M., Majnoon Hosseini, N., Hossien Zadeh, A., Mazaheri, D., & Hossieni, M. (2011). Effects of cover crops, tillage systems and nitrogen fertilizer on soil characteristics and forage yield of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Journal of Agriculture*, 92, 1-23. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084811.1389.41.4.12.7>
 30. Renard, D., & Tilman, D. (2019). National food production stabilized by crop diversity. *Nature*, 571(7764), 257-260. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y>
 31. Sadeghi, S., Kiani, F., Kamkar, B., & Ebrahimi, S. (2019). Effect of different tillage systems on the biological and enzymatic activity of soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(2), 151-164. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2019.15917.1850>
 32. Salih, A. A., Babiker, H. M., & Ali, S. A. M. (1998). Preliminary observations on effects of tillage systems on soil physical properties, cotton root growth and yield in Gezira Scheme, Sudan. *Soil and Tillage Research*, 46, 187-191. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00032-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00032-4)
 33. Sarikhani, Sh. K., Kazemeini, S. A., Afzalnia, S., & Gathala, M. K. (2018). Changes in soil properties and productivity under different tillage practices and wheat genotypes: A short-term study in Iran. *Sustainability*, 10, 2-17. <https://doi.org/10.3390/su10093273>
 34. Selvan, T., Panmei, L., Murasing, K. K., Guleria, V., Ramesh, K. R., Bhardwaj, D. R., & Deshmukh, H. K. (2023). Circular economy in agriculture: Unleashing the potential of integrated organic farming for food security and sustainable development. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1170380. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1170380>
 35. Sha, Y., Liu, Z., Hao, Z., Huang, Y., Shao, H., Feng, G., & Mi, G. (2024). Root growth, root senescence and root system architecture in maize under conservative strip tillage system. *Plant and Soil*, 495(1), 253-269. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2675962/v1>
 36. Shiwakoti, S., Zheljaskov, V. D., Gollany, H. T., Kleber, M., & Xing, B. (2019). Micronutrients decline under long-term tillage and nitrogen fertilization. *Scientific Reports*, 9(1), 12020. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48408-6>
 37. Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66-87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
 38. Spiegel, H., Dersch, G., Hosch, J., & Baumgarten, A. (2007). Tillage effects on soil organic carbon and nutrient availability in a long-term field experiment in Austria. *Auswirkungen Unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Organische Substanz und Verfügbare Nährstoffe in Boden in Einem Langzeitversuch in*, 47-58.
 39. Stankowski, S., Jaroszewska, A., Osińska, B., Tomaszewicz, T., & Gibczyńska, M. (2022). Analysis of long-term effect of tillage systems and pre-crop on physicochemical properties and chemical composition of soil. *Agronomy*, 12, 2072. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092072>
 40. Szczepanek, M., Piekarczyk, M., & Błaszczuk, K. (2024). Spatial distribution of soil macroelements, their uptake by plants, and green pea yield under strip-till technology. *Agronomy*, 14(4), 711. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040711>
 41. Torabi, M., & Heidarisoltanabadi, M. (2020). Effect of different seed rates on yield and some agronomic traits of alfalfa Mohageran ecotype in no-till and conventional tillage methods in Semirrom region. *Plant Productions*, 43(3), 375-386. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27979.1690>
 42. Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., & Denton, M. D. (2019). Do tillage systems influence nitrogen fixation in legumes? A review. *Soil and Tillage Research*, 185, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.006>
 43. Waling, I., Van Vark, W., Houba, V. J. G., & Van Der Lee, J. J. (1989). Soil and Plant Analysis, a Series of Syllabi part 7. Plant Analysis Procedures. Wageningen Agriculture University.
 44. Wang, H., Wang, S., Yu, Q., Zhang, Y., Wang, R., Li, J., & Wang, X. (2020). No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming system. *Journal of Environmental Management*, 261, 110261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110261>
 45. Wang, M. H. E., Shen, F., & Huang, G. (2019). Effects of soil compactions on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soyabean seedling. *Enviornmental Science and Pollution*, 1, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05606-z>
 46. Wang, X., Qi, J. Y., Zhang, X. Z., Li, S. S., Virk, A. L., Zhao, X., Xiao, X. P., & Zhang, H. L. (2019). Effects of tillage and residue management on soil aggregates and associated carbon storage in a double paddy cropping system. *Soil and Tillage Research*, 194, 104339. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104339>
 47. Wang, X., Qi, J., & Kan, Z. (2024). Sustainable management and tillage practice in agriculture. *Agronomy*, 14(12), 2891. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122891>
 48. Wasaya, A., Yasir, T. A., Ijaz, M., & Ahmad, S. (2019). Tillage effects on agronomic crop production. *Agronomic Crops: Management Practices*, 73-99. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_5

49. Wright, A. L., Hanlon, E. A., Sui, D., & Rice, R. (2009). Soil pH Effects on Nutrient Availability in the Everglades Agricultural Area. Document SL287, Institute of Food and Agricultural Sciences. Gainesville (FL): University of Florida, p. 1-5.
50. Wu, G., Chen, Z., Jiang, N., Jiang, H., & Chen, L. (2021). Effects of long-term no-tillage with different residue application rates on soil nitrogen cycling. *Soil and Tillage Research*, 212, 105044. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105044>
51. Xiaozhu, Y. A. N. G., Zhuang, L. I., & Cheng, C. (2016). Effect of conservation tillage practices on soil phosphorus nutrition in an apple orchard. *Horticultural Plant Journal*, 2(6), 331-337. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2016.11.005>



Investigation of the Protective Effects of Sodium Hydrosulfide and Sodium Nitroprusside on the Toxicity of Silver Nanoparticles in Soybeans (*Glycine max* L.)

S. Moayeri¹, M. Baradaran Firouzabadi^{1*}, M. Parsaeian¹, A. Gholami¹, H. Makarian¹

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

(*- Corresponding author's Email: mbaradaran@shahroodut.ac.ir)

Received: 22 June 2025

Revised: 26 October 2025

Accepted: 12 November 2025

Available Online: 02 December 2025

How to cite this article:

Moayeri, S., Baradaran Firouzabadi, M., Parsaeian, M., Gholami, A., & Makarian, H. (2026). Investigation of the protective effects of sodium hydrosulfide and sodium nitroprusside on the toxicity of silver nanoparticles in soybeans (*Glycine max* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 183-203. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94122.1409>

Introduction

Nanotechnology is actually one of the new technologies that has recently entered the agricultural field. Nanoparticles are atomic or molecular assemblies with minimum dimensions between 1-100 nanometers. One of the first effects of reducing the size of particles to below 100 nanometers and converting them into nanoparticles is an increase in surface area to volume, which causes more atoms to be placed on the surface compared to the volume, and subsequently changes the physical and chemical properties of the particles. In the meantime Nanosilver is known as a stress factor in plants due to its unique properties such as small size and high specific surface area, which can cause plant damage by inducing oxidative stress. Increasing of resistance to abiotic stresses in some plants is done through external application of various organic compounds. In this study, the role of sodium hydrosulfide (NaHS) and sodium nitroprusside (SNP) in reducing the negative effects of nanosilver on the physiology, growth and yield of soybean cultivar Williams was investigated.

Materials and Methods

The experiment was conducted at the research farm of the Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology. The evaluated traits included shoot dry matter, forage yield, chlorophyll a and b contents, relative water content, plasma membrane stability, flavonoid content, anthocyanin content, and leaf soluble sugar concentration. The experiment was carried out as a factorial experiment in a randomized complete block design with three replications with three levels of nanosilver (0, 1.5 and 3 g L⁻¹), three levels of NaHS (0, 0.5 and 1 mM) and two levels of SNP (0 and 120 µM) in 1402. After testing, the obtained data was analyzed by SAS statistical software (version 9.1). The comparison of means was done based on minimum mean difference test (LSD) at 5 % probability level. The shape of the mold was studied using excel software.

Results and Discussion

The results showed that nanosilver reduced yield, relative leaf water content, and pigment concentration, while the combined use of NaHS and SNP reduced stress-induced damage by increasing the levels of protectants such as flavonoid, anthocyanin, and soluble sugars. In the treatment containing 3 g L⁻¹ of silver nanoparticles, 0.5 mM sodium hydrosulfide, and no sodium nitroprusside, the chlorophyll a content of 0.78 mg g⁻¹ fresh leaf weight showed the lowest value among all treatments. The highest soluble sugar content was recorded in plants treated



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.2025.94122.1409>

with 1.5 g L⁻¹ silver nanoparticles. The amount of flavonoid in plants sprayed with 1.5 g L⁻¹ nanosilver was significantly increased as the amount of this trait in the application of 0.5 mM and non - consuming sodium hydrosulfide increased 0.0771 and 0.0769 g.g⁻¹ fresh weight of leaves and increased 48 percent. The highest anthocyanin content was observed in the control treatment (0 g L⁻¹ nanosilver) and in the 1.5 g L⁻¹ nanosilver treatment in the absence of sodium hydrosulfide. All other treatment combinations significantly reduced anthocyanin content compared with the control. Nanosilver application reduced plasma membrane stability. The plasma membrane stability of the control plants was 71.55%, which decreased to 68.9% following application of 1.5 g L⁻¹ nanosilver; however, this reduction was not statistically significant. Increasing the nanosilver concentration to 3 g L⁻¹ resulted in a significant decline in plasma membrane stability, with a mean value of 61.6%. The shoot dry matter content in the control plants was 109.6 g m⁻². In the effect of spraying of plants with 1.5 g L⁻¹ nanosilver and non - consumption of sodium nitroprusside and sodium hydrosulfide to 99.5 g.m⁻² and by infecting plants with 3 g L⁻¹ nanosilver with a significant drop of 51.7 g m⁻². The highest grain yield (420.3 g m⁻²) was obtained in the treatment without nanosilver and with the use of 1 mM NaHS, which showed a 36% increase compared to the control (270 g m⁻²).

Conclusion

Overall, the application of NaHS and SNP under nanosilver stress conditions left effective protective effects and can be suggested as an efficient approach for managing stresses caused by heavy metals in plants.

Keyword: Antioxidant, Heavy metals, Oxidative stress, Pigments

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱۸۳-۲۰۳

بررسی اثرات حفاظتی سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر سمیت نانوذرات نقره، در
سویا (*Glycine max* L.)

سعید معیری^۱، مهدی برادران فیروزآبادی^{۱*}، مهدیه پارسائیان^۱، احمد غلامی^۱، حسن مکاریان^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱

چکیده

غلظت‌های زیاد نانوذرات نقره به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مانند اندازه کوچک و سطح ویژه بالا، به عنوان یک عامل تنش‌زا در گیاهان شناخته می‌شوند که می‌توانند از طریق القای تنش اکسیداتیو موجب آسیب به گیاه شوند. در این پژوهش، نقش بهبوددهنده سدیم هیدروسولفید (NaHS) و سدیم نیتروپروساید (SNP) کاهش اثرات منفی نانوذرات نقره بر فیزیولوژی، رشد و عملکرد سویا (*Glycine max* L.) رقم ویلیامز بررسی شد. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار با سه سطح محلول‌پاشی نانوذرات نقره (۰، ۱/۵ و ۳ گرم در لیتر)، سه سطح محلول‌پاشی سدیم هیدروسولفید (۰، ۵/۰ و ۱ میلی‌مولار) و دو سطح محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید (۰ و ۱۲۰ میکرومولار) در سال ۱۴۰۲ اجرا گردید. نتایج نشان داد که نانوذرات نقره موجب کاهش عملکرد، محتوای نسبی آب برگ و غلظت رنگدانه‌ها شد، در حالی که استفاده ترکیبی از سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید با افزایش سطح محافظت‌کننده‌هایی نظیر فلاونوئیدها، آنتوسیانین و قندهای محلول، آسیب‌های ناشی از تنش را کاهش داد. در تیمار حاوی سه گرم در لیتر نانوذرات نقره، ۵/۰ میلی‌مولار سدیم هیدروسولفید و عدم مصرف سدیم نیتروپروساید، میزان کلروفیل a با مقدار ۰/۷۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ کمترین مقدار را در بین تمامی تیمارها نشان داد. بیشترین عملکرد دانه (۳۲۰/۳ گرم در مترمربع) در تیمار بدون نانوذرات نقره و با مصرف یک میلی‌مولار سدیم هیدروسولفید به دست آمد که نسبت به شاهد (۲۷۰ گرم در مترمربع) افزایش ۳۶ درصدی نشان داد. در مجموع، کاربرد سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش نانوذرات نقره، اثرات حفاظتی مؤثری بر جای گذاشت و می‌تواند به عنوان رویکردی کارآمد برای مدیریت تنش‌های ناشی از فلزات سنگین در گیاهان پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، تنش اکسیداتیو، رنگدانه‌ها، فلزات سنگین

مقدمه

ساخت وسایل زندگی و انواع مواد و پودرهای شوینده مورد استفاده در منازل و استفاده در لوازم و تجهیزات پزشکی و کودهای کشاورزی شدت یافته است. قابل توجه‌ترین ویژگی ذرات در ابعاد نانو، توانایی عبور از سد هایی است که برای ذرات مشابه با ابعاد بزرگ‌تر غیرممکن است. این ویژگی واکنش‌پذیری نانوذرات به‌ویژه نانوذرات فلزی را به شدت افزایش می‌دهد (Baker et al., 2013). بنابراین رهاسازی هر نوع نانوذره‌ای در محیط زیست ممکن است دارای آثار مضر بالقوه‌ای باشد که همین امر مطالعه آن‌ها را در سطوح مختلف زیستی دارای اهمیت می‌نماید. به عنوان مثال، در گزارش‌های مختلف آمده است که نانوذرات نقره دارای خواص بیولوژیکی مختلف از جمله خواص ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی (Venkatesan et al., 2016)، بهبودی (Yugal et al., 2017) و ضدسرطانی (Ahmed et al., 2016) هستند. این نانوذره که امروزه به‌وفور در صنایع به‌ویژه پوشاک

نانوتکنولوژی یا کاربرد فناوری در مقیاس اتم و مولکول یکی از تکنولوژی‌های نوظهور در قرن حاضر می‌باشد که آینده اقتصادی جهان را به شدت متأثر خواهد کرد. گستردگی دامنه تأثیر این فناوری بسیار زیاد است و می‌تواند بیشتر جنبه‌های زندگی بشر را تحت تأثیر قرار دهد. هم‌اکنون با پیشرفت نانوفناوری، استفاده از آن‌ها در صنایع مختلف از ساخت خودرو، لاستیک، رنگ، صنایع هوافضا، ساختمان‌سازی، شیشه‌سازی، الکترونیک، صنایع دریایی گرفته تا

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: mbaradaran@shahrroodut.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.94122.1409>

هیدروژن به‌عنوان دهنده هیدروژن به‌صورت خارجی سبب کاهش تنش ناشی از فلزات سنگین مانند آلومینیوم در گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) (Chen et al., 2013)، سرب در کلزا (*Brassica napus* L.) (Ali et al., 2014) و کادمیوم در یونجه (*Medicago sativa* L.) (Li, Wang et al., 2012) شده است. مطالعات انجام‌شده روی تأثیر پرایمینگ بذرهای آفتابگردان با سدیم هیدروسولفید در شرایط تنش خشکی نشان داد که تیمار بذر با سدیم هیدروسولفید شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها را در شرایط تنش خشکی اعمال‌شده توسط پلی اتیلن گلایکول بهبود داده است (Ocvirk et al., 2021). در گیاهان برنج، پیش‌تیمار با سولفید هیدروژن با حفاظت از کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئیدها و پروتئین سبب کاهش معنی‌دار نشانه‌های سمیت کادمیوم شد (Mostofa et al., 2015). همچنین سدیم هیدروسولفید می‌تواند با تأمین گوگرد احیاءپذیر موجب افزایش مخزن گلوکاتایون در گیاهان شود. گلوکاتایون به‌عنوان یک ترکیب کلیدی در سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه، حاوی گوگرد است و سنتز آن وابسته به حضور اسیدآمینو سیستئین می‌باشد. تأمین گوگرد از طریق سدیم هیدروسولفید با فراهم کردن پیش‌سازهای ضروری برای مسیرهای بیوسنتزی، نقش مؤثری در افزایش سطح گلوکاتایون ایفا می‌کند. طبق گزارش کوشواها و همکاران (Kushwaha et al., 2020)، تیمار گیاهان با سدیم هیدروسولفید باعث افزایش معنی‌دار غلظت گلوکاتایون و کاهش اثرات مخرب تنش کروم شد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که کاربرد ترکیبات گوگردی مانند سدیم هیدروسولفید با تقویت ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه از طریق افزایش تولید گلوکاتایون، می‌تواند رویکردی مؤثر برای مقابله با تنش‌های اکسیداتیو باشد. سدیم نیتروپروساید (SNP) یک ترکیب رهاکننده اکسیدنیتریک (NO) است که بررسی نقش آن در گیاهان موضوع پژوهش‌های متعدد بوده است (Li et al., 2008b). اسدی صنم و همکاران (Asadi Sanam et al., 2014) بیان کردند که اکسیدنیتریک، یکی از گونه‌های فعال نیتروژن است که می‌تواند به‌عنوان یک مولکول پیام‌رسان در پاسخ‌های سازشی گیاهان به تنش‌های زیستی و غیرزیستی در گیاهان نقش ایفا کند و به‌عنوان یک عامل آنتی‌اکسیدان، گونه‌های فعال اکسیژن را از بین ببرد. در مطالعه‌ای در اثر محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید مقدار کلروفیل، درصد اسانس و فعالیت آنتی‌اکسیدانی مرزه (*Satureja khuzestanica* L.) افزایش پیدا کرد (Gorgini Shabankareh & Khorasani Nejhad, 2018). همچنین در مطالعه‌ای روی کدو حلوائی (*Lagenaria siceraria*) تیمار با ۰/۲۵ میلی‌مولار سدیم نیتروپروساید منجر به افزایش ۲۱/۸۴ درصد در وزن خشک شد. این افزایش به‌دلیل بهبود فتوسنتز، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش آسیب اکسیداتیو بود (Zhang et al., 2024). در پژوهشی دیگر، تأثیر محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید روی گیاه رز (*Rosa*

استفاده می‌شود به‌راحتی با شست‌وشو وارد آب‌های زیرزمینی می‌شود و در صورت مصرف آثار متعددی بر گیاهان برجای خواهد گذاشت. نانوذرات نقره با غلظت پنج گرم در لیتر می‌تواند سبب کاهش فتوسنتز، تولید کلروفیل و عملکرد کوانتومی فتوسیستم II در گیاهان شود (Miao et al., 2009). گزارش شده است که نانوذرات نقره باعث کاهش معنی‌دار کلروفیل در برگ‌های گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) شد. این کاهش، در مقایسه با شاهد، با افزایش غلظت نانوذرات شدت بیشتری یافته و نشان‌دهنده اثر منفی نقره بر ظرفیت فتوسنتزی گیاه است (Rai et al., 2020). در آزمایشی نشان داده شد که نانوذرات نقره به‌طور معنی‌داری سبب کاهش عملکرد فتوسنتزی، رنگدانه‌ها و آنتی‌اکسیدان‌هایی نظیر گلوکاتایون ریداکتاز، آسکوربات کل و محتوای گلوکاتایون در غلظت ۱۰۰۰ میکرومولار شد (Tripathi et al., 2017). سونگ و همکاران (Song et al., 2013) بیان کردند که نانوذرات نقره می‌تواند سبب کاهش محتوای کلروفیل و افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز در گیاه گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) شود. در پاسخ به تنش نانونقره، میزان بالایی از بیان ژن‌های مرتبط با آسمیلاسیون گوگرد، بیوسنتز گلوکاتایون ریداکتاز و گلوکاتایون اس ترانسفراز دیده شده است (Nair & Chang, 2014). اگرچه امروزه مصرف خاکی کودهای گوگردی در راستای تأمین نیاز این عنصر در گیاهان زراعی مرسوم است، ولی مواد و ترکیبات متعددی وجود دارند که می‌توانند به‌عنوان منبع گوگرد برای گیاه در نظر گرفته شوند و علاوه‌بر آن از سایر مزایای آن‌ها نیز بهره‌مند گردند، به‌عنوان مثال گیاهان قادر به جذب برگی سولفید هیدروژن (H_2S) به‌عنوان منبعی از گوگرد برای رشد هستند به‌خصوص تحت شرایطی که دسترسی به گوگرد در محیط ریشه محدود شده باشد (Koralewska et al., 2008). سولفید هیدروژن در گیاهان به‌عنوان یک مولکول پیام‌رسان، در تنظیم فرایندهای فیزیولوژیکی مختلف مانند جوانه‌زنی بذر، فتوسنتز، حرکت روزنه‌ای، القای ریشه‌های نابه‌جا و تأخیر در پیری گل‌ها نقش دارد. این ترکیب همچنین با کاهش خسارت اکسیداتیو، به افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌ها کمک می‌کند (Zhang et al., 2008). مطالعه‌ای روی برنج (*Oryza sativa* L.) نشان داد که استفاده از سدیم هیدروسولفید (NaHS) تحت تنش گرمایی منجر به افزایش وزن خشک ساقه تا ۲۱/۸ درصد در رقم Taipei-309 و ۲۰ درصد در رقم Rasi شد. این افزایش می‌تواند به‌دلیل بهبود تعادل اکسیداسیون-احیا، حفظ ساختار فتوسنتزی و کاهش آسیب اکسیداتیو باشد (Gautam et al., 2022). سولفید هیدروژن در گیاهچه‌های گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش شوری میزان فعالیت آنزیم‌های ضداکسایشی مانند سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز را به‌ترتیب ۱۴/۲، ۱۲/۳ و ۸/۳ درصد نسبت به گیاهان شاهد افزایش داد (Ding et al., 2019). همچنین بیان شده است که هیدروسولفید

پاسخ‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و متابولیکی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. این گیاه به‌ویژه در مراحل اولیه رشد نسبت به تغییرات در ترکیب خاک، سمیت فلزی و تنش‌های اکسیداتیو بسیار واکنش‌پذیر است. بنابراین، درک بهتر سازوکارهای دفاعی و تنظیمی گیاه سویا در برابر چنین تنش‌هایی می‌تواند نقش مهمی در توسعه راهکارهای بهبود رشد و عملکرد آن تحت شرایط تنش‌زا ایفا کند. به همین منظور، این آزمایش با اهداف مقایسه اثر غلظت‌های مختلف نانونقره بر رشد و برخی شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه سویا و بررسی پاسخ‌های زراعی و فیزیولوژیک این گیاه به محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید و سدیم هیدروسولفید انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود اجرا شد. حداقل و حداکثر دمای منطقه به‌ترتیب ۱۰- و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه در این منطقه حدود ۱۵۴ میلی‌متر است که این بارندگی‌ها عمدتاً در فصل پاییز و بهار رخ می‌دهد. مزرعه در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ۵۵ دقیقه طول شرقی واقع شده و میانگین ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۶۶ متر می‌باشد. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری در **جدول ۱** نشان داده شده است.

gallica L.) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با کاربرد این تیمار، اثرات منفی قلیائیت خاک بر گیاه کاهش می‌یابد و شاخص‌های رشدی گیاه از جمله تعداد و ضخامت برگ، وزن تر و خشک برگ و ساقه و ریشه، همچنین شاخص‌های گل‌دهی، رنگیزه-های فتوسنتزی، قندهای محلول و میزان پروتئین کل افزایش می‌یابد و غلظت دو میلی‌مولار سدیم نیتروپروساید مؤثرتر از بقیه غلظت‌ها عمل کرد (Moazam Babasheikhali et al., 2021). استفاده از سدیم نیتروپروساید به‌عنوان دهنده اکسیدنیتریک سبب توسعه رشد گیاه نخود در شرایط تنش کادمیوم و کاهش غلظت کادمیوم موجود در قسمت‌های مختلف این گیاه شده است (Kumari et al., 2010). در سال ۲۰۲۴ تولید جهانی گیاه سویا (*Glycine max* L.) به حدود ۴۲۹ میلیون تن رسید که نسبت به سال قبل ۸/۷ درصد افزایش داشت، به‌ویژه در کشورهای پیشرو مانند برزیل، ایالات متحده و آرژانتین که به‌ترتیب ۱۶۹، ۱۱۸۸۴ و ۵۱ میلیون تن تولید داشتند (USDA, 2024). این افزایش تولید عمدتاً ناشی از شرایط مساعد آب‌وهوایی و بهبود مدیریت کشاورزی بوده است. در ایران، سطح کشت سویا نسبت به سال‌های گذشته روند افزایشی داشته و عمدتاً در استان‌های شمال غربی و غرب کشور کشت می‌شود، هرچند میزان تولید داخلی هنوز با کشورهای پیشرو جهانی فاصله دارد و بخش عمده نیاز کشور به سویا از طریق واردات تأمین می‌شود (FAO, 2023). از آنجاکه سویا گیاهی نسبتاً حساس به شرایط تنش‌زا به‌ویژه فلزات سنگین و نانوذرات فلزی محسوب می‌شود، بررسی دقیق

جدول ۱- خصوصیات خاک محل آزمایش

Table 1- Soil characteristics of the test site

بافت	شن	رس	سیلت	کربن آلی	نیتروژن کل	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب
Texture	Sand	Clay	Silt	Organic carbon	Total nitrogen	Absorbable potassium	Absorbable phosphorus
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)
لومی رسی	20.1	30.7	35	0.4	0.1	280	10

آماده گردید، این ترکیب با فرمول شیمیایی $\text{Na}[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، کریستال مانند با رنگ قهوه‌ای، محلول در آب، رهاکننده اکسید نیتریک (NO)، pH محلول تقریباً ۷/۵-۷ داشت که از شرکت مرک تهیه شده بود. این آزمایش در قالب فاکتوریل برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار بود. به‌منظور آماده‌سازی زمین پس از انجام عملیات شخم و دیسک، پشته‌هایی به فواصل ۵۰ سانتی‌متر به‌وسیله فاروئر ایجاد و سپس شیلنگ‌های قطره‌ای پهن گردید. بذر سویا مورد استفاده رقم ویلیامز بود و عملیات کاشت با دست در ۲۷ خرداد ماه، به‌صورت هیرم‌کاری و در عمق سه سانتی‌متر انجام شد. در هر کرت آزمایشی، چهار خط کاشت به‌طول چهار متر با فاصله روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر قرار

تیمارها شامل محلول‌پاشی نانوذرات نقره در سه سطح (صفر، غلظت ۱/۵ و غلظت ۳ گرم بر لیتر)، محلول نانوذرات نقره با خلوص ۹۹/۹۹ درصد از شرکت پیشگامان نانومواد به‌صورت کلوتیدی در آب مقطر تهیه شد. ذرات نقره دارای اندازه ۵-۸ نانومتر، شکل کروی و سطح ویژه ۲۵-۴۲ مترمربع بر گرم بودند. چگالی واقعی ذرات نقره ۱۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. pH محلول حدود ۰/۵±۱۱ و رنگ آن قهوه‌ای پررنگ بود. محلول سدیم هیدروسولفید در سه سطح (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) آماده گردید، این ترکیب با فرمول شیمیایی NaHS، پودری با رنگ زرد روشن، محلول در آب، رهاکننده یون H_2S ، قلیایی و با pH حدود ۱۲ بود که از شرکت مرک تهیه شده بود. محلول سدیم نیتروپروساید در دو سطح (صفر و ۱۲۰ میکرومولار)

دور سانتیفریوژ گردید. سپس در طول موج ۵۳۰ و ۶۵۷ نانومتر خوانده شد. میزان آنتوسیانین برای هر عصاره با استفاده از رابطه (۴) و (۵) اندازه‌گیری گردید (Mita et al., 1997).

$$A=A530 - (0.25 A654) \quad (4)$$

$$C(\text{mg}/100\text{g}) = A/eL \times MV \times DF \times V/G \times 100 \quad (5)$$

که در آن، e: مقدار جذب مولی آنتوسیانین و برابر ۲۶۰۰۰، L: طول مسیر طی شده در سل و برابر یک سانتی‌متر، MV: وزن مولی آنتوسیانین و برابر ۲/۴۴۹، DF: ضریب رقیق‌سازی، V: حجم نمونه و G: وزن نمونه به میلی‌گرم است.

فلانونوئید برگ

برای سنجش میزان فلانونوئید در مرحله پیش از گل‌دهی، ۱/۰ گرم وزن تر برگ در ۱۰ میلی‌لیتر اتانول اسیدی (شامل الکل اتیلیک ۹۵ درصد و اسیداستیک گلاسیال به نسبت حجمی ۱:۹۹) به‌خوبی ساییده شد و عصاره حاصل به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتیفریوژ گردید. محلول رویی جدا و به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد گرما داده شد و سپس در طول موج ۳۰۰ نانومتر خوانده شد. برای محاسبه میزان فلانونوئید از منحنی استاندارد کوئرستین (شکل ۱) استفاده گردید (Krizek, 1998).

پایداری غشای پلاسمایی

برای اندازه‌گیری پایداری غشای پلاسمایی برگ در مرحله پیش از گل‌دهی، از هر کرت دو تا سه برگ هم‌سن انتخاب و سپس پانچ ۰/۰۱ گرم دیسک برگی تهیه گردید. نمونه‌ها در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفتند. از هر ترکیب تیماری دو نمونه تهیه شد. یک نمونه در بن‌ماری در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ دقیقه (a) و نمونه دیگر در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه (b) قرار گرفتند. بعد از خنک شدن نمونه‌ها و هم‌دمای محیط شدن با استفاده از دستگاه EC متر، هدایت الکتریکی نمونه‌ها خوانده شد و پایداری غشای پلاسمایی آن‌ها از رابطه (۶) محاسبه شد (Sairam & Srivastava, 2001).

$$(6) \quad \text{پایداری غشاء} = (1 - (a/b)) \times 100$$

محتوای نسبی آب برگ

از هر کرت دو بوته به‌طور تصادفی انتخاب شد و از هر بوته یک برگ جوان و کاملاً رشدیافته در مرحله پیش از گل‌دهی قطع گردید. نمونه‌ها پس از توزین با ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم (وزن تر)، به مدت ۲۴ ساعت درون آب مقطر و در یخچال با دمای چهار درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. سپس برگ‌ها از آب مقطر خارج و آب روی آن‌ها را با دستمال گرفته و خشک گردیدند و دوباره توزین شدند (وزن

گرفتند. دو خط کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و صفات مورد نظر روی دو خط وسط اندازه‌گیری گردید. آبیاری به‌صورت قطره‌ای و هر چهار الی پنج روز یک بار انجام شد و مقدار آب مصرفی برای همه تیمارها یکسان بود. ۲۰ و ۴۰ روز بعد از کاشت به‌ترتیب اولین و دومین وجین به‌صورت دستی انجام گرفت. محلول‌پاشی با نانوذرات نقره طی یک مرحله و قبل از گل‌دهی (۴۶ روز پس از کاشت) به‌وسیله سم‌پاش دستی هنگام غروب و در هوایی کاملاً آرام انجام شد. پس از گذشت یک هفته محلول‌پاشی با سدیم هیدروسولفید و دو روز بعد با سدیم نیتروپروساید صورت گرفت. به‌منظور بررسی ماده خشک بخش‌های مختلف گیاه، از هر کرت آزمایشی، تعداد پنج بوته به‌طور تصادفی برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌ها به بخش‌های برگ، ساقه و غلاف تفکیک گردید و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند. سپس ماده خشک برحسب گرم در مترمربع محاسبه گردید. در ۲۵ مهر ماه و پس از رسیدن گیاهان به مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، از هر کرت پنج بوته برای اندازه‌گیری عملکرد برداشت شد.

رنگیزه‌های فتوسنتزی

به‌منظور اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ، ۰/۰۱ گرم از بافت تازه برگ در مرحله پیش از گل‌دهی توزین و به قطعات کوچکی خرد شد. به‌نمونه‌ها شش میلی‌لیتر دی‌متیل سولفوکسید اضافه شد و محلول حاصل به مدت چهار ساعت درون حمام آب گرم (بن‌ماری) با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس در دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Jenway ۶۳۰۵ ساخت کشور آلمان)، میزان جذب نمونه‌های حاوی کلروفیل در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد (Hiscox & Israelstam, 1978).

$$(1) \quad \text{Chl a } (\mu\text{g}/\text{ml}) = (12.25 A 663) - (2.55 A 645)$$

$$(2) \quad \text{Chl b } (\mu\text{g}/\text{ml}) = (20.31 A 645) - (4.91 A 663)$$

$$(3) \quad \text{Car } (\mu\text{g}/\text{ml}) =$$

$$(1000 A 470 - 1.90 \text{ chl a} - 63.14 \text{ chl b})/214$$

اعداد به‌دست‌آمده در $v/w \times 1000$ ضرب گردید تا اعداد برحسب

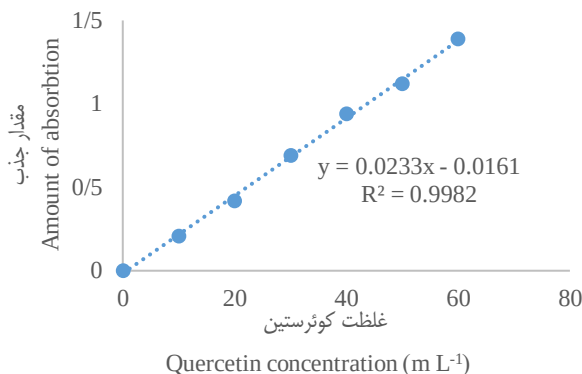
میلی‌گرم بر گرم وزن تر به دست آیند. که در آن، v: حجم محلول کلروفیلی برحسب میلی‌لیتر و w: وزن نمونه تر برگ برحسب گرم می‌باشد.

آنتوسیانین برگ

در مرحله پیش از گل‌دهی، مقدار ۰/۰۲ گرم از بافت برگ تازه گیاهی با چهار میلی‌لیتر محلول اسیدکلریدریک یک درصد نرمال و متانول در یک هاون چینی ساییده شد. محلول حاصل به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۳۰۰۰

اشباع)، در نهایت نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید (وزن خشک). محتوای نسبی آب برگ با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد (Kramer, 1983).

(۷) مقدار نسبی آب برگ = $100 \times (\text{وزن خشک} - \text{وزن اشباع}) / (\text{وزن خشک} - \text{وزن تر})$

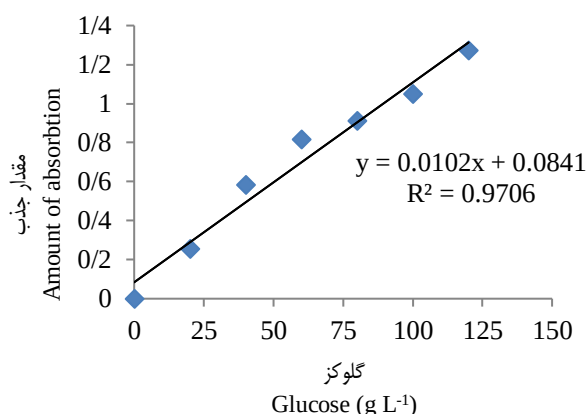


شکل ۱- منحنی استاندارد فلاونوئید در طول موج ۳۰۰ نانومتر
Figure 1- Flavonoid standard curve at 300 nm wavelength

سپس میزان جذب آن‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۸۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. محلول شاهد نیز با افزودن یک میلی‌لیتر فنل پنج درصد و پنج میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به دو میلی‌لیتر آب مقطر تهیه گردید. منحنی استاندارد (شکل ۲) در همان روز، با استفاده از محلول‌های گلوکز خالص در غلظت‌های ۰ تا ۱۲۰ میلی‌گرم بر لیتر تهیه شد. برای این منظور، تمام مراحل روش فنل-اسید سولفوریک روی دو میلی‌لیتر از هر محلول تکرار گردید تا مقادیر ثبت‌شده توسط اسپکتروفتومتر به غلظت قند موجود در محلول تبدیل شود. معادله حاکم بر منحنی استاندارد $ABS = aC + b$ می‌باشد که در آن، ABS: مقدار جذب، C: غلظت قند موجود در محلول، و a و b: اعداد ثابت هستند (Hellubust & Caraigie, 1978).

قند محلول برگ

به‌منظور اندازه‌گیری میزان قند محلول برگ، ۱۰۰ میلی‌گرم از پودر نمونه برگ‌های خشک‌شده در فالكون ۱۵ میلی‌لیتری ریخته شد، هشت میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد به آن افزوده شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب گرم قرار داده شدند. سپس به مدت ۲۰ دقیقه در ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. به روشناور جمع‌شده به‌ترتیب ۳/۵ میلی‌لیتر سولفات روی ($ZnSO_4$) پنج درصد و ۳/۵ میلی‌لیتر باریم هیدروکسید ($Ba(OH)_2$) ۰/۳ نرمال اضافه گردید و دوباره ۲۰ دقیقه در ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. روشناور به‌حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. براساس این روش دو میلی‌لیتر محلول برداشته شده است. ابتدا یک میلی‌لیتر فنل پنج درصد و سپس پنج میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ با فشار اضافه گردید.



شکل ۲- منحنی استاندارد قند محلول در طول موج ۴۸۵ نانومتر
Figure 2- Standard curve of soluble sugar at a wavelength of 485 nm

داده‌های به‌دست‌آمده به‌وسیله نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام گردید. رسم شکل‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار EXCEL انجام گردید.

نتایج و بحث

ماده خشک اندام‌هوایی

مطابق جدول ۲ اثر دوگانه سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال پنج درصد و بقیه منابع تغییر به‌جز تکرار در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند. میزان ماده خشک اندام هوایی در گیاهان شاهد ۱۰۹/۶ گرم در مترمربع بود؛ که در اثر محلول‌پاشی گیاهان با میزان ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره و شرایط عدم مصرف سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید به ۹۹/۵ گرم در مترمربع و با آلوده کردن گیاهان با سه گرم در لیتر نانوذرات نقره با

افت چشمگیر به ۵۱/۷ گرم در مترمربع رسید. در شرایط عدم مصرف نانونقره، محلول‌پاشی سدیم هیدروسولفید با و بدون مصرف سدیم نیتروپروساید، مقدار ماده خشک را به‌ترتیب ۴۱/۳ و ۱۰۷/۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داد و به ۱۵۴/۸۳ و ۲۲۷/۵۳ گرم در مترمربع رسانید که بیشترین مقادیر این صفت در بین کلیه ترکیبات تیماری بود. در شرایط اعمال ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره در هر سه سطح سدیم هیدروسولفید (عدم، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار)، محلول‌پاشی گیاهان با سدیم نیتروپروساید سبب افزایش معنی‌دار این صفت نسبت به شرایط عدم مصرف سدیم نیتروپروساید و همین‌طور شاهد شد. در زمان آلوده‌سازی گیاهان با بیشترین میزان نانوذرات نقره، همه ترکیبات تیماری حاصل از سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید سبب بهبود معنی‌دار ماده خشک شدند، ولی فقط تیمار یک میلی‌مولار سدیم هیدروسولفید و مصرف سدیم نیتروپروساید سبب افزایش این صفت نسبت به گیاهان شاهد شد (جدول ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر نانوذرات نقره، سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر کلروفیل a و b، کاروتنوئید، عملکرد دانه و ماده خشک بخش هوایی گیاه سویا

Table 2- Analysis of variance (mean of squares) of the effect of silver nanoparticles, sodium hydrosulfide and sodium nitroprusside on chlorophyll a and b, carotenoids, grain yield and aerial dry matter soybean plant

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	ماده خشک بخش هوایی Shoot dry matter	عملکرد دانه Grain yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoid
تکرار Repetition	2	39.966	1815.505	0.000364	0.00624	0.00038
نانونقره Nanosilver (a)	2	9774.511**	124884.94**	0.0460**	0.1880**	0.15477**
سدیم هیدروسولفید NaHS (b)	2	9383.143**	9167.706**	0.0261**	0.00487*	0.00012
سدیم نیتروپروساید SNP (c)	1	999.320**	71.38	0.00633*	0.000261	0.00148*
نانونقره × سدیم هیدروسولفید a × b	4	6089.0171**	11364.65**	0.03364**	0.007736**	0.00323**
نانونقره × سدیم نیتروپروساید a × c	2	5998.717**	12477.3**	0.00620*	0.002953	0.000815
سدیم هیدروسولفید × سدیم نیتروپروساید b × c	2	112.655*	1636.4	0.003344	0.001538	0.00033
نانونقره × سدیم هیدروسولفید × سدیم نیتروپروساید a × b × c	4	2570.826**	3541.28**	0.004863**	0.00555**	0.000197
خطا Error	34	30.263	730.831	0.001281	0.000998	0.000270
ضریب تغییرات C.V (%)		5.0	13.1	3.7	5.3	2.5

* و **: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد می‌باشد.

* and **: are significant at the 1 and 5 percent levels, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر برهم کنش نانوذرات نقره، سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر برخی صفات فیزیولوژیک و زراعی گیاه سویا

Table 3- Comparison of the average effect of the interaction of silver nanoparticles, sodium hydrosulfide and sodium nitroprusside on some physiological and agronomic traits of soybean plant								
نانونقره Nanosilver (g L ⁻¹)	سدیم هیدروسولفید NaHS (mM)	سدیم نیتروپروساید SNP (μM)	ماده خشک بخش هوایی Shoot dry matter (g m ⁻²)	عملکرد دانه Grain yield	کلروفیل a Chlorophyll a (g g ⁻¹ Fw)	کلروفیل b Chlorophyll b (g g ⁻¹ Fw)		
0	0	0	109.600 ^{e*}	270.03 ^{bc}	0.988 ^{bcd}	0.651 ^{bc}		
		120	70.100 ^{ij}	193.45 ^{def}	1.011 ^{ab}	0.623 ^{cd}		
		0	97.667 ^f	288.32 ^b	0.927 ^{ef}	0.701 ^{ab}		
		120	115.467 ^e	292.02 ^b	0.902 ^{fg}	0.718 ^a		
	0.5	0	227.533 ^a	420.26 ^a	1.008 ^{ab}	0.708 ^a		
		120	154.833 ^b	310.16 ^b	1.012 ^{ab}	0.706 ^a		
		1.5	0	0	99.500 ^f	208.41 ^d	0.983 ^{bcd}	0.595 ^d
				120	139.933 ^c	209.02 ^d	1.013 ^{ab}	0.609 ^{cd}
0	100.100 ^f			150.97 ^{fg}	1.028 ^{ab}	0.577 ^{de}		
120	139.600 ^c			225.94 ^{cd}	1.055 ^a	0.579 ^{de}		
0.5	0		87.000 ^g	151.74 ^{fg}	1.005 ^{abc}	0.702 ^{ab}		
	120		127.033 ^d	198.50 ^{de}	0.948 ^{cdef}	0.596 ^d		
	3		0	0	51.700 ^k	93.43 ^h	0.840 ^{hi}	0.473 ^{gh}
				120	61.900 ^j	116.08 ^{gh}	0.843 ^{gh}	0.536 ^{ef}
0		98.867 ^f		160.64 ^{efg}	0.783 ⁱ	0.489 ^{fgh}		
120		82.700 ^{gh}		138.99 ^g	0.933 ^{def}	0.442 ^h		
0.5		0	74.833 ^{hi}	119.51 ^{gh}	1.017 ^{ab}	0.453 ^{gh}		
		120	132.667 ^{cd}	158.48 ^{efg}	1.057 ^a	0.501 ^{fg}		
		LSD 5%			9.128	44.858	0.0594	0.0525

* وجود حرف مشترک در هر ستون نشانه عدم اختلاف معنی دار است

* The presence of a common letter in each column indicates no significant difference.

این تغییرات منجر به افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه گردید (Dai et al., 2024). افزایش فتوسنتز و کارایی آن به واسطه افزایش نیتریک اکسید (NO) که توسط سدیم نیتروپروساید آزاد می‌شود منجر به افزایش سطح انرژی گیاه و بهبود فرآیندهای متابولیکی می‌شود. این امر در نهایت موجب تولید بیشتر مواد فتوسنتزی و افزایش وزن خشک غلاف‌ها می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط امید و سپهری (Omid & Sepehri, 2015) انجام شد، نتایج نشان داد که تیمار با سدیم نیتروپروساید موجب افزایش معنی دار وزن خشک اندام‌های هوایی در گیاه لوبیا قرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) گردید.

عملکرد دانه

عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر کلیه منابع تغییر به جز تکرار، سدیم نیتروپروساید و اثر دوگانه هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید قرار گرفت (جدول ۲). نتایج حاصل از برهم کنش سه گانه تیمارهای آزمایش مزرعه‌ای بر میزان عملکرد نشان داد که جذب برگی نانوذرات نقره سبب کاهش عملکرد دانه شد. میزان عملکرد در گیاهان شاهد ۲۷۰ گرم در مترمربع بود که افت چشمگیر در زمان استفاده از ۱/۵ و ۳ گرم در لیتر نانوذرات نقره و عدم مصرف

نانوذرات نقره با القای گونه‌های فعال اکسیژن منجر به تخریب ساختارهای سلولی، پراکسیداسیون لیپیدها، آسیب به پروتئین‌ها و اختلال در فتوسنتز می‌شود. در چنین شرایطی، اگر سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه قادر به مهار ROS نباشد، روند مرگ سلولی و اختلال در تقسیم و تمایز سلول‌های افزایش می‌یابد و در نتیجه وزن خشک به شدت کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای نشان داده شد که کاربرد نانوذرات نقره در گیاه آبزی *Spirodela polyrhiza* باعث افزایش تجمع ROS، تخریب کلروپلاست و تغییر در عملکرد سیستم آنتی‌اکسیدانی شد که این تغییرات به طور مستقیم با کاهش رشد گیاه مرتبط بودند (Zhang et al., 2024). سدیم هیدروسولفید می‌تواند با افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی مانند کلروفیل، کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها، کارایی فتوسنتز را بهبود بخشد. این افزایش در فتوسنتز منجر به تولید بیشتر مواد آلی و در نتیجه افزایش وزن خشک غلاف می‌شود. همچنین نتایج نشان داده است که تیمار گیاهان با سدیم هیدروسولفید باعث افزایش محتوای سولفید هیدروژن درون‌زا، بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و بهبود صفات زراعی مانند ارتفاع گیاه، قطر ساقه و مساحت برگ‌ها در گیاه تنباکو (*Nicotiana tabacum* L.) شد که

سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید (به ترتیب به میزان ۲۰۸/۴ و ۹۳/۴ گرم در مترمربع) مشاهده گردید. بیشترین میزان عملکرد در سطح صفر نانوقره، یک میلی مولار سدیم هیدروسولفید و عدم مصرف سدیم نیتروپروساید (۴۲۰/۳ گرم در مترمربع) به دست آمد، اما همین ترکیبات تیماری در دو سطح ۱/۵ و ۳ گرم در لیتر نانوذرات نقره (به ترتیب با مقادیر ۱۵۱/۷ و ۱۱۹/۵ گرم در مترمربع) کاهش قابل توجه داشتند و استفاده از تیمارهای آزمایشی توانست تا حد زیادی کاهش عملکرد ناشی از سطح بالای نانوقره را جبران نماید. به عنوان مثال، محلول پاشی با ۰/۵ میلی مولار سدیم هیدروسولفید سبب افزایش ۷۲ درصدی عملکرد نسبت به سطح صفر تیمارها در شرایط سمیت بالای نانوقره گردید. افزایش حاصل از کاربرد یک میلی مولار سدیم هیدروسولفید به همراه ۱۲۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید نیز در این شرایط حدود ۷۰ درصد بود (جدول ۳). نانوذرات ممکن است سبب اختلال در جذب عناصر غذایی ضروری مانند نیتروژن، فسفر و آهن شوند. از سوی دیگر، نانوذرات نقره می تواند با آسیب به ساختار کلروپلاست و کاهش کلروفیل، فرآیند فتوسنتز را مختل کند. در نهایت، این نانوذرات ممکن است از طریق برهم زدن تعادل هورمون های گیاهی مانند اکسین، رشد و نمو طبیعی گیاه را کاهش دهند (Yan & Chen, 2019). سدیم هیدروسولفید با آزادسازی H_2S ، موجب افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی می شود که از گیاه در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت می کنند. این ترکیب همچنین باعث افزایش محتوای کلروفیل و بهبود فتوسنتز می شود و در نتیجه رشد گیاه را تقویت می کند. از طرفی، سولفید هیدروژن با تنظیم تعادل یونی و جذب بهتر عناصر غذایی، تغذیه گیاه را بهبود می دهد. در نهایت، با تنظیم بیان ژن ها و مسیرهای هورمونی، فرآیندهای رشد و توسعه گیاه را فعال تر می کند و به این ترتیب عملکرد گیاه افزایش می یابد (Dai et al., 2024). گزارش شده است که مصرف نانوقره سبب کاهش عملکرد در لوبیاسبز (*Phaseolus vulgaris* L.) می شود (Rafaati Alashti et al., 2021).

کلروفیل a

نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می دهد که اثر اصلی نانوذرات نقره، سدیم هیدروسولفید و اثر دوگانه نانوقره و هیدروسولفید و اثر سه گانه نانوذرات نقره، سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی سدیم نیتروپروساید و اثر دوگانه نانوذرات نقره و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال پنج درصد بر میزان کلروفیل a معنی دار شدند. در بین ترکیبات تیماری حاصل از برهم کنش سه گانه تیمارها، در مجموع تعداد کمی از ترکیبات تیماری توانستند اختلاف معنی داری نسبت با شاهد داشته باشند. آلودگی با سطح سوم نانوذرات نقره (سه گرم بر لیتر) کاهش

معنی دار قابل توجهی در مقدار کلروفیل a برگ ایجاد نمود که با مصرف سدیم هیدروسولفید با غلظت یک میلی مولار دوباره به سطح گیاهان شاهد برگشت و با اضافه شدن سدیم نیتروپروساید حتی بهتر از گیاهان شاهد شد. از این رو در بین تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین میزان کلروفیل a مربوط به ترکیبات تیماری سه گرم در لیتر نانوقره، یک میلی مولار سدیم هیدروسولفید و مصرف سدیم نیتروپروساید، با میزان ۱/۰۶ گرم بر گرم وزن تر برگ بود که البته تفاوت معنی داری با هشت ترکیب تیماری دیگر نداشت. کمترین میزان این صفت نیز مربوط به تیمار سه گرم در لیتر نانوذرات نقره، ۰/۵ میلی مولار سدیم هیدروسولفید و عدم مصرف سدیم نیتروپروساید (۰/۷۸ گرم بر گرم وزن تر برگ) بود که البته با تیمار سه گرم در لیتر نانوذرات نقره و عدم مصرف سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید تفاوت معنی دار نداشت اما نسبت به شاهد (۰/۹۹ گرم بر گرم وزن تر برگ) کاهش ۲۱ درصدی داشت (جدول ۳). در تحقیقاتی که طباطبایی پژوه و همکاران (Tabatabaei Pazouh et al., 2013) روی کلزا انجام دادند، بیان شد که نانوقره باعث کاهش میزان کلروفیل در گیاهان می شود که این اثر به دلیل تنش اکسیداتیو ناشی از نانوذرات نقره بوده است.

همچنین گزارش شده است که سولفید هیدروژن مولکولی مشارکت کننده در سیگنالینگ است که فرآیند فتوسنتز را با افزایش بیوزن کلروپلاست و تثبیت دی اکسید کربن بهبود می بخشد که این تغییرات متابولیکی می تواند به حفظ و افزایش محتوای کلروفیل a کمک کند (Mostofa et al., 2015). علی و همکاران (Ali et al., 2014) گزارش کردند که سدیم هیدروسولفید سبب افزایش کلروفیل در گیاه کلزا می شود. همچنین سدیم نیتروپروساید به عنوان دهنده نیتریک اکسید می تواند نقش مهمی در تنظیم فرآیندهای متابولیکی در گیاهان داشته باشد. یکی از این فرآیندها، سنتز کلروفیل a است. نیتریک اکسید از طریق تأثیر بر فعالیت های آنزیمی و مسیرهای سیگنال دهی، می تواند باعث افزایش سنتز کلروفیل a و بهبود فرآیند فتوسنتز در گیاهان شود. بنابراین، نیتریک اکسید به طور غیرمستقیم بر تولید کلروفیل a تأثیر می گذارد و به این ترتیب در بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان کمک می کند (Chamizo et al., 2017). همچنین در تحقیقات یزدی و میرزایی (Yazdi & Mirzaei, 2021) گزارش شد که مصرف سدیم نیتروپروساید سبب افزایش کلروفیل روی گیاه همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) می شود.

کلروفیل b

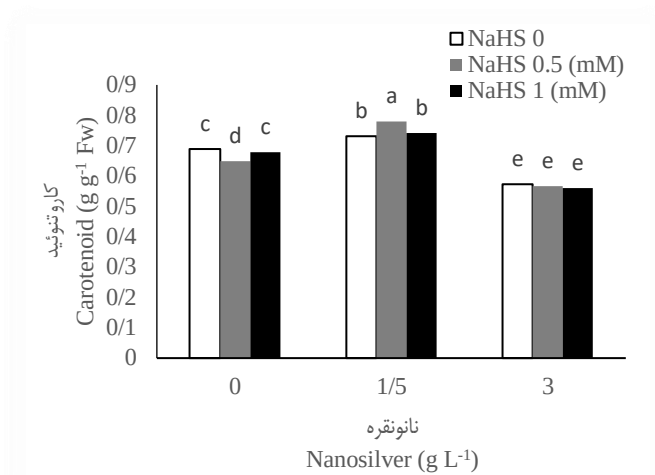
اثر اصلی نانوذرات نقره، اثر دوگانه نانوذرات نقره و سدیم هیدروسولفید و اثر سه گانه نانوذرات نقره، سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی سدیم

هیدروسولفید در سطح احتمال پنج درصد بر میزان کلروفیل b معنی دار شد (جدول ۲). مطابق جدول ۳، استفاده از غلظت سه گرم در لیتر نانوذرات نقره سبب کاهش میزان این صفت در کلیه ترکیبات تیماری نسبت به شاهد شد. البته مقدار کاهش در گیاهانی که فقط با سدیم نیتروپروساید محلول پاشی شدند، کمتر بود. در گیاهان آلوده به ۱/۵ گرم در لیتر نانوقره، تیمارهای یک میلی مولار هیدروسولفید و عدم مصرف سدیم نیتروپروساید (۰/۷ گرم بر گرم وزن تر برگ) و عدم مصرف سدیم هیدروسولفید و مصرف سدیم نیتروپروساید (۰/۶۱ گرم بر گرم وزن تر برگ) با شاهد (۰/۶۵ گرم بر گرم وزن تر برگ) اختلاف معنی دار نداشت. سایر ترکیبات تیماری سبب کاهش میزان کلروفیل b شدند. در سطح صفر نانوذرات نقره، بیشترین افزایش کلروفیل b با مصرف غلظت یک میلی مولار سدیم هیدروسولفید و عدم مصرف و مصرف سدیم نیتروپروساید (به ترتیب ۰/۷۰۸ و ۰/۷۰۶ گرم بر گرم وزن تر برگ) و مصرف ۰/۵ میلی مولار سدیم هیدروسولفید و مصرف سدیم نیتروپروساید (۰/۷۱۸ گرم بر گرم وزن تر برگ) دیده شد. گزارش شده است که سدیم هیدروسولفید سبب افزایش مقدار کلروفیل در گیاه ذرت می شود (Zangeneh et al., 2018). مطالعات متعددی نشان داده اند که نانوذرات نقره با تولید گونه های فعال اکسیژن سبب بروز تنش اکسیداتیو در سلول های گیاهی می شود و در نتیجه، فعالیت آنزیم های درگیر در سنتز کلروفیل مانند آمینولولوبینیک اسید سنتاز و کلروفیل سنتاز را مختل می کند. همچنین نقره ممکن است با جانشینی یون های فلزی ضروری نظیر منیزیم در ساختار کلروفیل موجب بی ثباتی آن شود (Yin et al., 2012).

کاروتنوئید

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می گردد، مقدار کاروتنوئید برگ تحت تأثیر اثر اصلی نانوذرات نقره و اثر دوگانه نانوذرات نقره و سدیم هیدروسولفید در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت. مطابق شکل ۳، میزان کاروتنوئید در برگ گیاهان شاهد در سطح صفر نانوذرات نقره ۰/۶۹ گرم بر گرم وزن تر برگ بود. محلول پاشی با سدیم هیدروسولفید در این سطح از نانوذرات نقره اثر مثبتی نداشت. در سطح ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره، افزایش معنی داری در مقدار این صفت ثبت گردید. به طوری که هم حضور نانوذرات نقره و هم غلظت های سدیم هیدروسولفید مقادیر بالایی از کاروتنوئید نشان دادند. در این میان، مصرف ۰/۵ میلی مولار سدیم هیدروسولفید با ۰/۷۸ گرم بر گرم وزن تر برگ کاروتنوئید از نظر آماری برتر بود. کمترین مقادیر این صفت در اثر آلودگی با سه گرم در لیتر نانوذرات نقره دیده شد. در این سطح از نانوقره نیز محلول پاشی با سدیم هیدروسولفید مفید نبود. براساس نتایج به دست آمده، کاروتنوئید در برگ گیاهان دریافت کننده

سدیم نیتروپروساید ۰/۶۵۷ گرم بر گرم وزن تر برگ بود که نسبت به شرایط عدم مصرف آن (۰/۶۶۸ گرم بر گرم وزن تر برگ) کاهش ۱/۶ درصدی داشت (شکل ۴). در غلظت های بالای نانوذرات از جمله نانوذرات نقره شواهد متعددی نشان داده اند که این مواد می توانند به جای تحریک سیستم دفاعی گیاه منجر به ایجاد تنش اکسیداتیو شدید، تخریب کلروپلاست ها و در نتیجه کاهش سنتز کاروتنوئیدها شوند. کاروتنوئیدها به عنوان رنگدانه های فتوسنتزی و آنتی اکسیدان های مهم، در پاسخ به تنش های محیطی تنظیم می شوند. باین حال، تحت تنش شدید ناشی از نانوقره، مسیرهای بیوسنتزی آنها ممکن است مختل گردد یا فعالیت آنزیم های دخیل در تولید آنها مهار شود. مطالعاتی همچون رالیا و همکاران (Raliya et al., 2015) نیز نشان داده اند که اگرچه نانوذرات در غلظت های پایین باعث افزایش کاروتنوئیدها می شوند، اما در غلظت های بالا ممکن است اثر معکوس داشته باشند. بر همین اساس، کاهش مشاهده شده در محتوای کاروتنوئید در برخی تیمارهای حاوی نانوذرات نقره می تواند ناشی از آثار تخریبی این نانوذره در غلظت های بالا تلقی شود. افزایش میزان کاروتنوئید در تیمار حاوی سدیم هیدروسولفید احتمالاً ناشی از نقش سیگنال دهی گاز سولفید هیدروژن در تنظیم پاسخ های آنتی اکسیدانی و فتوسنتزی گیاه است. گزارش شده است که سولفید هیدروژن با فعال سازی آنزیم های آنتی اکسیدان مانند SOD، CAT و APX از ساختار و عملکرد کلروپلاست محافظت می کند و در نتیجه، پایداری مسیرهای بیوسنتزی کاروتنوئید نظیر مسیر موالونوئیک اسید را تقویت می کند. همچنین شواهد نشان می دهد که سولفید هیدروژن ممکن است باعث افزایش بیان ژن های کلیدی مانند PSY و DXS شود که نقش اصلی در مراحل آغازین بیوسنتز کاروتنوئید دارند (Li, Gong et al., 2012). سدیم نیتروپروساید به عنوان دهنده ی NO در گیاهان شناخته می شود و در بسیاری از پاسخ های تنظیمی از جمله القای دفاع آنتی اکسیدانی، تنظیم رشد، و تعامل با گونه های فعال اکسیژن نقش دارد (Delledonne, 1998). باین حال، در شرایطی خاص، آزادسازی بیش از حد NO ممکن است منجر به شکل گیری گونه های فعال نیتروژن (RNS) مانند پرکسی نیتريت (ONOO⁻) شود، که ترکیبات زیستی حساس از جمله رنگدانه های کاروتنوئیدی را هدف قرار می دهد (Arasimowicz & Floryszak, 2014). کاروتنوئیدها به دلیل داشتن پیوندهای دوگانه گسترده، به شدت نسبت به تنش اکسیداتیو و نیتروژاتیو حساس اند و می توانند در حضور گونه های فعال نیتروژن دچار تخریب ساختاری شوند (Havaux, 2014). علاوه بر آن، مطالعات نشان داده اند که NO می تواند از طریق نیتروزیلاسیون آنزیم های کلیدی در مسیر بیوسنتز کاروتنوئید، مانند phytoene synthase یا lycopene cyclase، فعالیت آنها را کاهش دهد (Zhang et al., 2024).

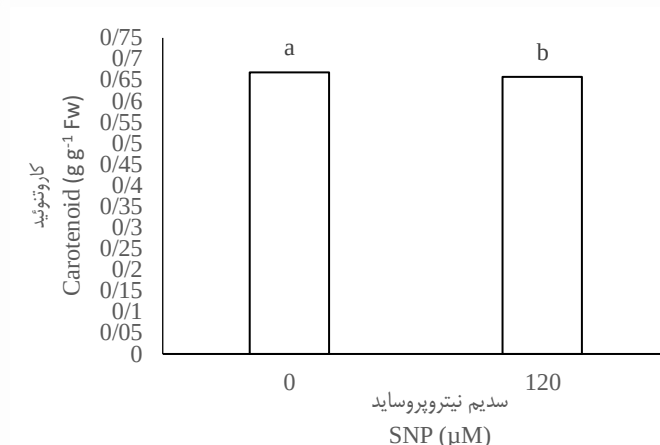


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نانوذرات نقره و سدیم هیدروسولفید بر کاروتنوئید برگ سویا

Figure 3- Comparison of the average effect of the interaction of silver nanoparticles and sodium hydrosulfide on soybean leaf carotenoids

وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (LSD 0.05).

The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر سطوح سدیم نیتروپروساید بر میزان کاروتنوئید برگ سویا

Figure 4- Comparison of the mean effect of sodium nitroprusside levels on soybean leaf carotenoid

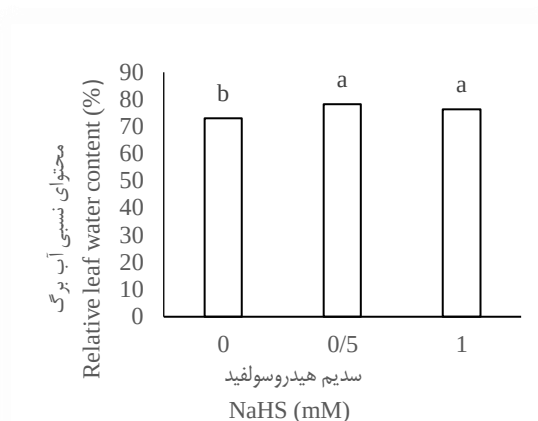
وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (LSD 0.05).

The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).

را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشیدند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که سولفید هیدروژن از طریق تعدیل فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، حفظ سلامت غشای سلولی و کاهش نفوذپذیری غشاء سلولی در برابر تنش‌های محیطی می‌تواند به بهبود وضعیت آبی گیاه کمک کند. به‌علاوه، سولفید هیدروژن با افزایش فشار تورژسانسی و بهبود ساختار و عملکرد غشاهای سلولی، باعث افزایش جذب و نگهداری آب در گیاه می‌شود (Zhao et al., 2021).

محتوای نسبی آب برگ

همان‌طور که در نتایج حاصل از تجزیه واریانس در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تنها اثر اصلی سدیم هیدروسولفید بر این صفت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. مطابق شکل ۵ کمترین میزان محتوای نسبی آب برگ در تیمار شاهد معادل ۷۳/۱۴ درصد به‌دست آمد که با محلول‌پاشی غلظت‌های سدیم هیدروسولفید (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) به‌ترتیب به ۷۸/۷ و ۷۶/۳ درصد رسید که اگرچه با یکدیگر تفاوت معنی‌دار نداشتند، ولی نسبت به سطح صفر، این صفت



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر سطوح سدیم هیدروسولفید بر محتوای نسبی آب برگ سویا

Figure 5- Comparison of the average effect of sodium hydrosulfide levels on the relative soybean leaf water content

وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی دار می باشد (LSD 0.05).

The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر نانوذرات نقره، سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشای پلاسمایی، فلاونوئید، آنتوسیانین و قند محلول برگ گیاه سویا

Table 4- Analysis of variance (mean of squares) of the effect of silver nanoparticles, sodium hydrosulfide and sodium nitroprusside on relative leaf water content, plasma membrane stability, flavonoid, anthocyanin and leaf soluble sugar soybean plant

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	محتوای نسبی آب برگ Relative leaf water content	پایداری غشای پلاسمایی Plasma membrane stability	فلاونوئید Flavonoid	آنتوسیانین Anthocyanin	قند محلول برگ Leaf soluble sugar
تکرار Repetition	2	32.47	10.084	0.000095	0.000218	0.000225
نانونقره Nanosilver (a)	2	30.25	481.91**	0.01245**	0.1508**	0.01057**
سدیم هیدروسولفید NaHS (b)	2	116.0522**	28.65	0.00036	0.0041	0.000058
سدیم نیتروپروساید SNP (c)	1	16.604	30.066	0.00049**	0.0024	0.000012
نانونقره × سدیم هیدروسولفید a × b	4	8.804	11.019	0.000274**	0.0252**	0.000093
نانونقره × سدیم نیتروپروساید a × c	2	1.185	3.191	0.00003	0.0185**	0.00023
سدیم هیدروسولفید × سدیم b × c	2	3.116	2.465	0.00075**	0.0168*	0.0000617
نانونقره × سدیم هیدروسولفید × سدیم a × b × c	4	6.251	6.616	0.000857	0.00676	0.000102
خطا Error	34	12.077	15.455	0.000057	0.00318	0.000159
ضریب تغییرات CV (%)		4.6	5.8	17.3	7.4	21.2

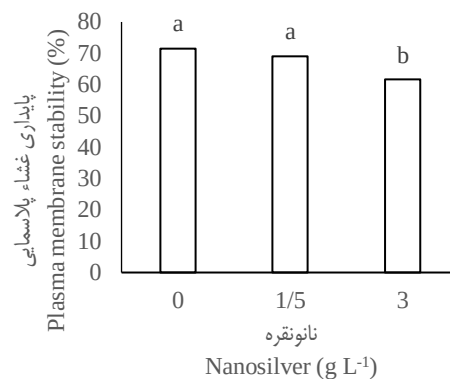
* و **: به ترتیب معنی داری در سطح ۱ و ۵ درصد می باشد.

* and **: are significant at the 1 and 5 percent levels, respectively.

پایداری غشای پلاسمایی

اثر اصلی نانوذرات نقره در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنی دار بود (جدول ۴). نانوذرات نقره سبب کاهش پایداری غشای پلاسمایی شد. میزان پایداری غشای پلاسمایی در برگ گیاهان شاهد ۷۱/۵۵ درصد بود که با غلظت ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره به ۶۹/۱ درصد کاهش پیدا کرد که البته از نظر آماری معنی دار نبود. دو برابر شدن آلودگی نانوذرات نقره ۳ گرم در لیتر اثر منفی بیشتر و معنی دار از لحاظ آماری داشت و مقدار این صفت را به ۶۱/۶ درصد رساند (شکل ۶). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که نانونقره می‌تواند غشاهای سلولی را تحت تأثیر قرار دهد و باعث آسیب و پاره‌گی غشاها شود. این اثرات می‌تواند به کاهش کارایی غشا در حفظ

یکپارچگی سلولی به‌ویژه در غلظت‌های بالا منجر شود (Kumari et al., 2009). غلظت بالای نانوذرات نقره به دلیل خواص نانوذره‌ای و واکنش‌پذیری بالای آن، می‌تواند موجب تنش اکسیداتیو شدید در سلول‌های گیاهی شود. این حالت با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن همراه است که در غلظت‌های پایین نقش سیگنال‌دهنده دارند، اما در غلظت‌های بالا سبب آسیب به ساختارهای سلولی می‌شوند. یکی از اهداف اصلی ROS، لیپیدهای غشای پلاسمایی هستند که تحت فرآیند پراکسیداسیون لیپید قرار می‌گیرند. پراکسیداسیون لیپیدها باعث کاهش پایداری غشا و افزایش نفوذپذیری آن و در نهایت موجب نشت یون‌ها و مولکول‌های حیاتی از سلول می‌گردد (Mukhopadhyay, 2014)



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر سطوح نانوذرات نقره بر پایداری غشای پلاسمایی برگ سویا

Figure 6- Comparison of the average effect of silver nanoparticles surfaces on the stability of the soybean leaf plasma membrane

وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی دار می‌باشد (LSD 0.05).

The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).

آنتوسیانین

آنتوسیانین برگ از نانوذرات نقره و برهم‌کنش آن با سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال پنج درصد تأثیر پذیرفت (جدول ۴). بررسی ۹ ترکیب تیماری حاصل از نانوذرات نقره و سدیم هیدروسولفید نشان داد که بیشترین میزان آنتوسیانین در دو غلظت صفر و ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره بدون استفاده از سدیم هیدروسولفید ثبت شد سایر ترکیبات تیماری این صفت را به‌طور معنی داری نسبت به شاهد کاهش دادند. کمترین میزان ثبت شده زمان استفاده از ۳ گرم در لیتر نانوذرات نقره و عدم مصرف سدیم هیدروسولفید (۰/۵۹۲ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) بود که نسبت به شاهد کاهش ۳۳ درصدی داشت. محلول‌پاشی با دو

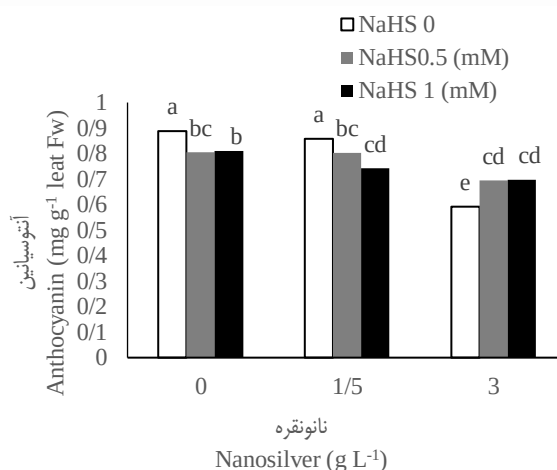
غلظت ۰/۵ و ۱ میلی مولار هیدروسولفید تنها در سطح آلودگی شدید نانونقره (۳ گرم بر لیتر) مفید بود و تا حد زیادی اثر منفی این فلز سنگین را کاهش داد ولی باز هم نتوانست شرایط را به حالت عادی در گیاهان شاهد بازگرداند (شکل ۷). در بررسی برهم‌کنش نانوذرات نقره و سدیم نیتروپروساید نیز تقریباً نتایج مشابهی به‌دست آمد به‌طوری که میزان آنتوسیانین در گیاهان شاهد ۰/۸۶۳ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ بود که اگرچه با محلول‌پاشی ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره کاهش جزئی یافت ولی معنی داری نبود. کمترین میزان آنتوسیانین زمان استفاده از ۳ گرم در لیتر نانوذرات نقره و عدم مصرف سدیم نیتروپروساید (۰/۶۳۱ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) ثبت شد که نسبت به شاهد ۲۷ درصد کمتر بود. محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید در دو سطح صفر و ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره سبب

آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، و آسکوربات پراکسیداز، سطح ROS را کنترل کرده و در نتیجه نیازی به سنتز بیشتر آنتوسیانین احساس نمی‌کند. این پدیده کاهش تقاضای گیاه برای سازوکارهای دفاعی غیرآنزیمی مانند آنتوسیانین را توضیح می‌دهد (Li, Wang et al., 2012).

فلاونوئید

اثر نانونقره، سدیم نیتروپروساید، برهم‌کنش نانوذرات نقره و سدیم هیدروسولفید و برهم‌کنش سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر این صفت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴). میزان فلاونوئید در برگ گیاهانی که با ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره محلول‌پاشی شده بودند، افزایش چشمگیر داشت، به‌طوری که مقدار این صفت در شرایط مصرف ۰/۵ میلی‌مولار و عدم مصرف سدیم هیدروسولفید به‌ترتیب ۰/۰۷۶۹ و ۰/۰۷۷۱ گرم بر گرم وزن تر برگ به حداکثر خود رسید و نسبت به شاهد افزایش ۴۸ درصدی داشت. دُر بالای سدیم هیدروسولفید در این سطح از نانوذرات نقره موجب کاهش معنی‌دار فلاونوئید گردید. مقدار فلاونوئید برگ در غلظت بالای نانوذرات نقره (سه گرم بر لیتر) به‌طور قابل توجهی پایین بود. این مقدار در سطح صفر سدیم هیدروسولفید نسبت به متناظر خود در سطح صفر و ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره به‌ترتیب ۵۰ و ۷۴ درصد کمتر بود (شکل ۱۰).

کاهش این صفت شد ولی در سطح ۳ گرم در لیتر این صفت را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید (شکل ۸). از طرفی در بررسی ۶ ترکیب تیماری حاصل از سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید، بیشترین میزان آنتوسیانین در برگ گیاهان شاهد (۰/۸۲ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) ثبت شد که البته با ترکیب تیماری ۰/۵ میلی‌مولار سدیم هیدروسولفید و ۱۲۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید تفاوت معنی‌دار نداشت. سایر ترکیبات تیماری بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر، نسبت به شاهد به‌طور قابل توجهی کمتر بودند. بنابراین در این شرایط اثر مثبت و معنی‌داری از هیچ‌کدام از تیمارهای سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید مشاهده نشد (شکل ۹). گونه‌های فعال اکسیژن، در غلظت‌های کم، به‌عنوان سیگنال‌های سلولی عمل کرده و پاسخ‌های دفاعی گیاه، مانند سنتز فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها را تحریک می‌کنند. اما در غلظت‌های بالاتر نانوذرات نقره، تجمع بیش از حد ROS منجر به آسیب اکسیداتیو شدید به ساختارهای سلولی و آنزیم‌های دخیل در مسیرهای بیوسنتزی این ترکیبات می‌شود. به‌طور خاص، آنتوسیانین‌ها که نقش آنتی‌اکسیدانی و حفاظتی در گیاه دارند، تحت تنش شدید نانوذرات نقره کاهش می‌یابند، چرا که فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند فنیل‌آلانیل آمونیاک‌لیاز (PAL) و سایر آنزیم‌های مسیر بیوسنتز آن‌ها مهار می‌شود (Mukhopadhyay, 2014). با کاربرد سدیم هیدروسولفید به‌عنوان دهنده سولفید هیدروژن و سدیم نیتروپروساید به‌عنوان دهنده نیتریک‌اکسید (NO)، گیاه قادر است از طریق تنظیم مسیرهای آنتی‌اکسیدانی مانند فعالیت

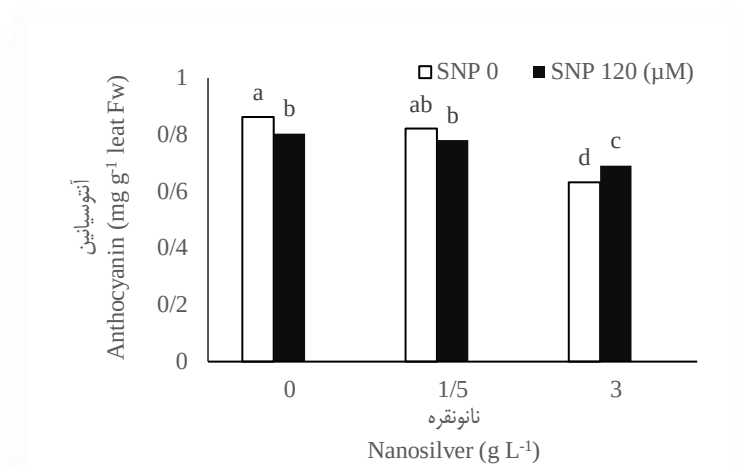


شکل ۷- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نانوذرات نقره و سدیم هیدروسولفید بر آنتوسیانین برگ سویا

Figure 7- Comparison of the average effect of silver nanoparticles and sodium hydrosulfide on soybean leaf anthocyanin

وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (LSD 0.05).

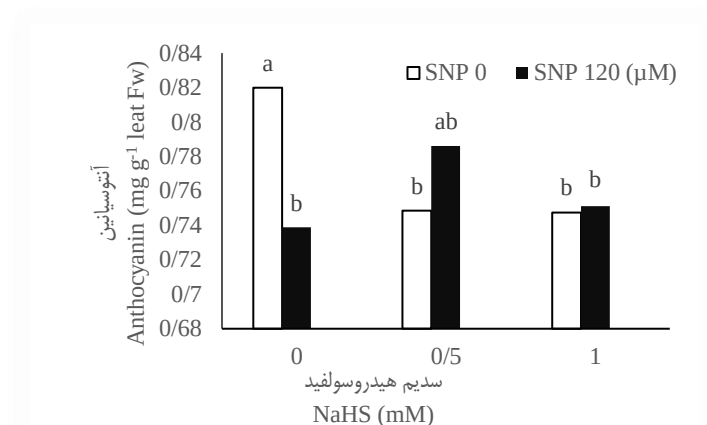
The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح نانوذرات نقره و سدیم نیتروپروساید بر آنتوسیانین برگ سویا
Figure 8- Comparison of the average effect of silver nanoparticles and sodium nitroprusside levels on soybean leaf anthocyanin levels

وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (LSD 0.05)

The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).



شکل ۹- مقایسه میانگین اثر سطوح سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر میزان آنتوسیانین برگ سویا
Figure 9- Comparison of the average effect of sodium hydrosulfide and sodium nitroprusside levels on soybean leaf anthocyanin

وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی‌دار (LSD 0.05).

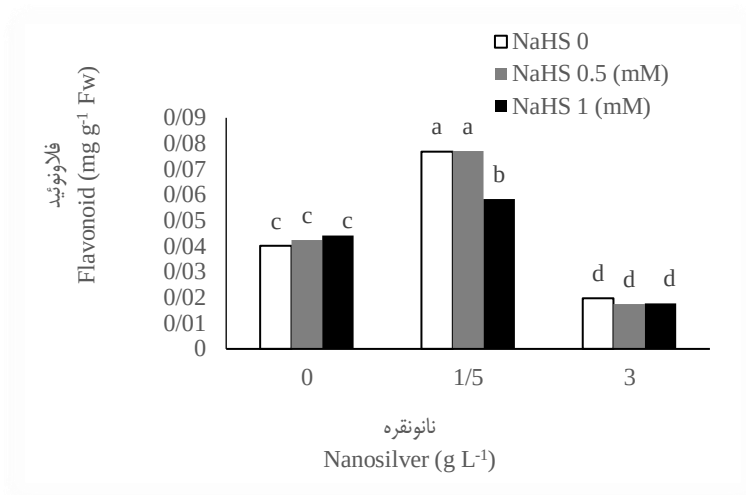
The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).

خود (۰/۰۵۶ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) رسید (شکل ۱۱). در غلظت بالای نانوذرات نقره (سه گرم بر لیتر)، کاهش شدید فلاونوئیدها نسبت به شاهد مشاهده شد. این افت شدید می‌تواند ناشی از افزایش بیش از حد ROS، اختلال در تعادل آنتی‌اکسیدانی سلول و آسیب به ساختارهای سلولی از جمله آنزیم‌های دخیل در بیوسنتز فلاونوئیدها باشد. در واقع، در غلظت‌های بالا، نانوذرات نقره به‌جای تحریک موجب تنش اکسیداتیو شدید و سرکوب سازوکارهای دفاعی

اثر برهم‌کنش سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر مقدار فلاونوئید برگ نیز نشان داد که مصرف و عدم مصرف سدیم نیتروپروساید در غلظت‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سدیم هیدروسولفید اگرچه از لحاظ عددی با یکدیگر تفاوت داشتند، اما از لحاظ آماری هیچ تفاوت معنی‌داری بین این چهار ترکیب تیماری دیده نشد. میزان فلاونوئید در شاهد ۰/۳۵۱ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ بود و زمانی که گیاهان فقط با سدیم نیتروپروساید محلول‌پاشی شدند به حداکثر

افزایش می‌یابد. این ترکیبات نه تنها به عنوان آنتی اکسیدان‌های قوی، در حذف رادیکال‌های آزاد نقش دارند، بلکه به پایداری غشاء، تنظیم رشد سلولی و حفاظت نوری نیز کمک می‌کنند (Del Río, 2015). بنابراین، افزایش فلاونوئید در پاسخ به سدیم نیتروپروساید می‌تواند نتیجه یک پاسخ دفاعی تنظیم شده توسط نیتریک اکسید باشد که به کاهش تنش اکسیداتیو و افزایش تحمل گیاه کمک می‌کند.

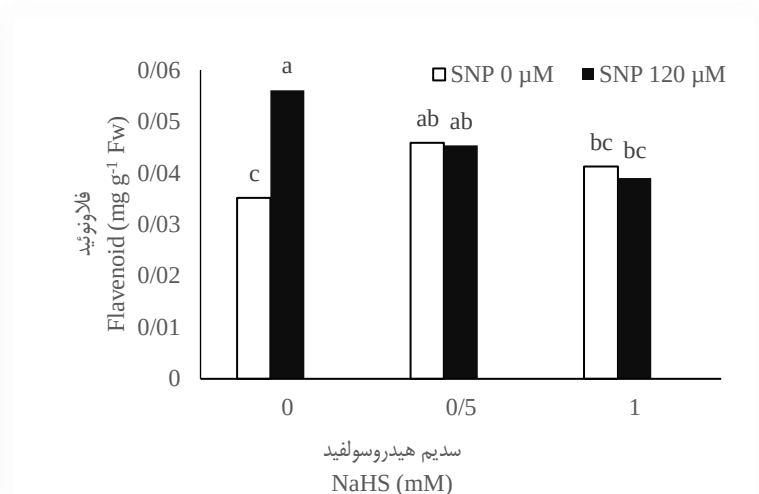
گیاه می‌شود (Vannini et al., 2014). نیتریک اکسید به عنوان یک مولکول پیام‌رسان ثانویه، مسیرهای سیگنال‌دهی متعددی را در سلول‌های گیاهی فعال می‌کند که از جمله آن‌ها فعال‌سازی آنزیم فنیل آلانین آمونیالیز (PAL) است (Neill et al., 2008). افزایش فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالیز در حضور NO باعث تحریک مسیر فنیل پروپانویید می‌شود و تولید ترکیبات فنلی به ویژه فلاونوئیدها



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نانوذرات نقره و سدیم هیدروسولفید بر فلاونوئید برگ سویا

Figure 10- Comparison of the average effect of silver nanoparticles and sodium hydrosulfide levels on soybean leaf flavonoid
وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (LSD 0.05).

The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).



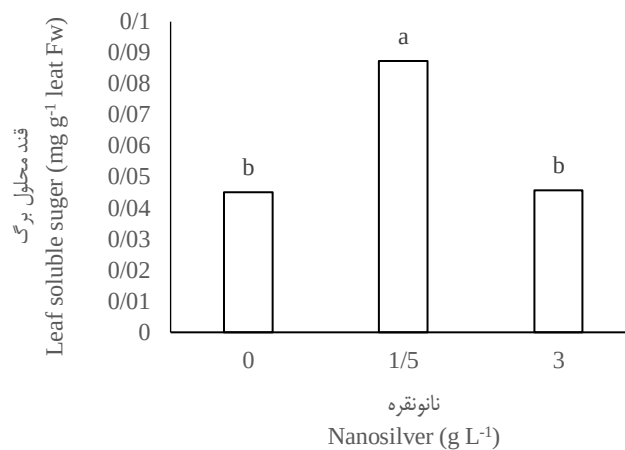
شکل ۱۱- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید بر فلاونوئید برگ سویا

Figure 11- Comparison of the average effect of sodium hydrosulfide and sodium nitroprusside on soybean leaf flavonoid
وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (LSD 0.05).

The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).

قند محلول برگ

از بین منابع تغییر، تنها اثر نانوذرات نقره در سطح احتمال یک درصد بر صفت قند محلول برگ معنی‌دار شد (جدول ۴). بیشترین میزان قند محلول برگ در گیاهان محلول‌پاشی شده با ۱/۵ گرم در لیتر نانوذرات نقره (۰/۰۸۷ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) ثبت شد و تفاوت معنی‌داری بین شاهد و سه میلی گرم در لیتر نانوذرات نقره دیده نشد (شکل ۱۲). نانوذرات نقره در غلظت‌های پایین ممکن است به‌عنوان یک عامل محرک ملایم عمل کنند و باعث فعال‌سازی مسیرهای دفاعی و متابولیسم ثانویه از جمله افزایش سنتز قندهای محلول شوند. قندهای محلول در این شرایط نقش کلیدی در تنظیم



شکل ۱۲- مقایسه میانگین اثر سطوح نانوذرات نقره بر فلاونوئید برگ سویا

Figure 12- Comparison of the average effect of silver nanoparticles levels on soybean leaf flavonoid

وجود حرف مشترک نشانه عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (LSD 0.05).

The presence of a common letter indicates no significant difference (LSD 0.05).

سطح کلروفیل‌ها، RWC و پایداری غشاء در مقایسه با تیمار نانونقره به‌تنهایی مشاهده گردید. همچنین عملکرد نهایی گیاه در حضور این مواد افزایش یافت و به سطح شاهد نزدیک شد یا حتی در برخی موارد از آن فراتر رفت. از نظر ترکیبات بیوشیمیایی، کاربرد نانونقره موجب افزایش معنی‌دار فلاونوئید، آنتوسیانین و قند محلول برگ شد که بیانگر فعال‌سازی مسیرهای دفاعی و تنظیم‌کننده تنش در گیاه است. اما تیمارهای ترکیبی با مواد بهبوددهنده موجب تعادل در تولید این متابولیت شدند که نشان‌دهنده کاهش تنش اکسیداتیو و برگشت نسبی به شرایط فیزیولوژیکی پایدار است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه سویا تحت تیمار نانوذرات نقره به‌عنوان عامل تنش‌زا و دو ترکیب سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید به‌عنوان مواد بهبوددهنده نشان داد که نانونقره به‌تنهایی موجب کاهش معنی‌دار در میزان کلروفیل a و b، پایداری غشای پلاسمایی، محتوای نسبی آب برگ و ماده خشک اندام هوایی شد، که این امر می‌تواند ناشی از افزایش تنش اکسیداتیو و آسیب به ساختارهای سلولی باشد. در مقابل، کاربرد سدیم هیدروسولفید و سدیم نیتروپروساید (به‌ویژه در تیمارهای ترکیبی) سبب بهبود معنی‌دار در این صفات شد، به‌طوری که افزایش

References

1. Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2016). A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise. *Journal of Advanced Research*, 7, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.02.007>.
2. Ali, B., Mwamba, T. M., Gill, R. A., Yang, C., Ali, S., Daud, M. K., Wu, Y., & Zhou, W. (2014). Improvement of element uptake and antioxidative defense in *Brassica napus* under lead stress by application of hydrogen sulfide. *Plant Growth Regul*, 74, 261-273. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9917-9>
3. Arasimowicz, M., & Floryszak, J. (2014). Nitric oxide in the offensive strategy of fungal and oomycete plant pathogens. *Frontiers in Plant Science*, 5, 301. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00252>
4. Asadi Sanam, S., Zavareh, M., Pirdashti, H., & Hashempour, A. (2014). The effect of sodium nitroprusside (SNP) on some biochemical properties of barley seedlings in salinity. *Journal Plant Prod Research*, 21(3), 19-32. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222050.1393.21.3.9.3>
5. Baker, S., Rakshith, D., Kavitha, K. S., Santosh, P., Kavitha, H. U., Rao, Y., & Satish, S. (2013). Plants: Emerging as nano factories towards Facimile route in synthesis of nanoparticles. *Bioimpacts*, 3, 111-117. <https://doi.org/10.5681/bi.2013.012>
6. Chamizo, A., Leticia, P., Llamas, F., Moreno, J., García, M., Javier, M., Ramos, A., Gutiérrez, R., & Enrique, J. (2017). Nitrate reductase regulates plant nitric oxide homeostasis. *Trends in Plant Science*, 22(2), 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.12.001>
7. Chen, J., Wang, W., Wu, F., You, C., Liu, T., Dong, X., He, J., & Zheng, H. (2013). Hydrogen sulfide alleviates aluminum toxicity in barley seedlings. *Plant and Soil*, 362, 301-318.
8. Dai, J., Wen, D., Li, H., Yang, J., Rao, X., Yang, Y., Yang, J., Yang, C., & Yu, J. (2024). Effect of hydrogen sulfide (H₂S) on the growth and development of tobacco seedlings in absence of stress. *BMC Plant Biology*, 24, 162. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04819-w>
9. Del Río, L. A. (2015). ROS and RNS in plant physiology: An overview. *Journal of Experimental Botany*, 66(10), 2827-2837. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv099>.
10. Delledonne, M., Xia, Y., Dixon, R. A., & Lamb, C. (1998). Nitric oxide functions as a signal in plant disease resistance. *Nature*, 394(6693), 585-588. <https://doi.org/10.1038/29087>.
11. Ding, H., Ma, D., Huang, X., Hou, J., Wang, C., Xie, Y., Wang, Y., Qin, H., & Guo, T. (2019). Exogenous hydrogen sulfide alleviates salt stress by improving antioxidant defenses and the salt overly sensitive pathway in wheat seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(7), 1-11.
12. FAO. (2023). FAOSTAT Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
13. Gautam, H., Fatma, M., Sehar, Z., Mir, I. R., & Khan, N. A. (2022). Hydrogen sulfide, ethylene, and nitric oxide regulate redox homeostasis and protect photosynthetic metabolism under high temperature stress in rice plants. *Antioxidants*, 11(8), 1478. <https://doi.org/10.3390/antiox11081478>
14. Gorgini Shabankareh, H., & Khorasani Nejjad, S. (2018). Effects of sodium nitroprusside on physiological, biochemical and essence characteristics of savory (*Satureja khuzestanica*) under deficit water regimes. *Journal of Plant Production Research*, 24(3), 55-70. <https://doi.org/10.22069/jopp.2017.11747.2079>.
15. Havaux, M. (2014). Carotenoid oxidation products as stress signals in plants. *The Plant Journal*, 79(4), 597-606. <https://doi.org/10.1111/tpj.12386>.
16. Hellubust, J. A., & Caraigie, J. S. (1978). Handbook of Physiological Methods: Physiological and Biochemical Methods. Cambridge University Press.
17. Hiscox, J. D., & Israelstam, G. F. (1978). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, 57, 1332-1334. <https://doi.org/10.1139/b79-163>
18. Koralewska, A., Stuiiver, C. E., Posthumus, F. S., Kopriva, S., Hawkesford, M. J., & De Kok, L. J. (2008). Regulation of sulfate uptake, expression of the sulfate transporters SULTR 1;1 and SULTR 1;2 and APS reductase in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*) as affected by atmospheric H₂S nutrition and sulfate deprivation. *Functional Plant Biology*, 35, 318-327. <https://doi.org/10.1071/FP07283>
19. Kramer, P. J. (1983). Water Relations of Plants. Academic Press.
20. Krizek, D. T., Britz, S. J., & Mirecki, R. M. (1998). Inhibitory effects of ambient levels of solar UV-A and UV-B radiation on growth of cv. New Red Fire lettuce. *Physiologia Plantarum*, 103, 1-7. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1030101.x>
21. Kumari, A., Sheokand, S., & Kumari, S. (2010). Nitric oxide induced alleviation of toxic effects of short term and long term Cd stress on growth, oxidative metabolism and Cd accumulation in chickpea. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 22(4), 271-284. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202010000400004>.
22. Kumari, M., Mukherjee, A., & Chandrasekaran, N. (2009). Genotoxicity of silver nanoparticles in *Allium cepa*. *Science of the Total Environment*, 407(19), 5243-5246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.024>.
23. Kushwaha, B. K., Srivastava, S., & Singh, N. (2020). Glutathione and hydrogen sulfide are required for sulfur-

- mediated mitigation of Cr (VI) toxicity in tomato, pea and brinjal seedlings. *Physiologia Plantarum*, 168(2), 301-319. <https://doi.org/10.1111/ppl.13024>
24. Li, L., Wang, Y., & Shen, W. (2012). Roles of hydrogen sulfide and nitric oxide in the alleviation of cadmium-induced oxidative damage in alfalfa seedling roots. *Biometals*, 25(3), 617-631. <https://doi.org/10.1007/s10534-012-9551-9>
 25. Li, Z. G., Gong, M., & Liu, P. (2012). Hydrogen sulfide is a signal molecule in plant responses to heat stress. *Plant, Cell & Environment*, 35(4), 714-721.
 26. Li, Q. Y., Niu, H. B., Yin, J., Wang, M. B., Shao, H. B., Deng, D. Z., Chen, X. X., Ren, J. P., & Li, Y. C. (2008). Protective role of exogenous nitric oxide against oxidative-stress induced by salt stress in barley (*Hordeum vulgare*). *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 65(2), 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.04.007>
 27. Miao, A. J., Schwehr, K. A., Xu, C., Zhang, S. J., Luo, Z., Quigg, A., & Santschi, P. H. (2009). The algal toxicity of silver engineered nanoparticles and detoxification by exopolymeric substances. *Environmental Pollution*, 157(11), 3034-3041. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.05.047>
 28. Mita, S., Murano, N., & Nakamura, K. (1997). Mutants of *Arabidopsis thaliana* with pleiotropic effects on the expression of the gene for beta-amylase and on the accumulation of anthocyanin that is inducible by sugars. *The Plant Journal*, 11(4), 841-851. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1997.11040841.x>
 29. Moazam Babasheikhali, M., Jabbarzadeh, Z., Amiri, J., Barin, B., & Razavi, M. (2021). Foliar application of sodium nitroprusside and salicylic acid alleviates the adverse effects of alkaline soil on roses. *European Journal of Horticultural Science*, 86, 78-87.
 30. Mostofa, M. G., Rahman, A., Ansary, M. M. U., Watanabe, A., Fujita, M., & Tran, L. S. P. (2015). Hydrogen sulfide modulates cadmium-induced physiological and biochemical responses to alleviate cadmium toxicity in rice. *Scientific Reports*, 5, Article 14078. <https://doi.org/10.1038/srep14078>
 31. Mukhopadhyay, S. S. (2014). Nanotechnology in agriculture: Prospects and constraints. *Nanotechnology, Science and Applications*, 7, 63-71. <https://doi.org/10.2147/NSA.S39409>
 32. Nair, P. G., & Chang, I. (2014). Assessment of silver nanoparticle-induced physiological and molecular changes in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(15), 8858-8869. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2822-y>
 33. Neill, S., Desikan, R., & Hancock, J. (2008). Nitric oxide signalling in plants. *New Phytologist*, 179(4), 873-887. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00804.x>
 34. Ocvirk, D., Špoljarević, M., Kristić, M., Hancock, J. T., Teklić, T., & Lisjak, M. (2021). The effects of seed priming with sodium hydrosulphide on drought tolerance of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in germination and early growth. *Annals of Applied Biology*, 178(3), 400-413. <https://doi.org/10.1111/aab.12658>
 35. Omid, F., & Sepehri, A. (2015). Effects of sodium nitroprusside application on leaf area, growth, and water use efficiency of red bean cultivars under drought stress. *Journal of Agricultural Crop Improvement*, 16(4), 871-885.
 36. Rafaati Alashti, M., Baradaran Firoozabadi, M., Dehestani, A., Gholami, A., & Parsaeian, M. (2021). Morphological and physiological responses of green bean to foliar application of citric acid and hydrogen sulfide under silver nanoparticle stress. *Journal of Plant Processes and Functions*, 10(12), 283-300. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222727.1400.10.44.22.8>
 37. Rai, R., Tripathi, S., Rai, S. K., & Srivastava, R. (2020). Biochemical changes in sunflower plant exposed to silver nanoparticles / silver ions. *Journal of Food Science & Technology*, 4(2), 629-644.
 38. Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., & Biswas, P. (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, 7(12), 1584-1594. <https://doi.org/10.1039/c5mt00168d>
 39. Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 3485-3498. <https://doi.org/10.1021/jf104517j>
 40. Sairam, R. K., & Srivastava, G. C. (2001). Water stress tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.): Variations in hydrogen peroxide accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186(1), 63-70. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2001.00461.x>
 41. Song, V., Jun, H., Waldman, B., Roh, J., Kim, Y., Yi, J., & Lee, E. J. (2013). Functional analysis of nanoparticle toxicity: A comparative study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 93, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.03.033>
 42. Tabatabaei Pazouh, Z., Razavizadeh, R., & Rostami, F. (2013). The effect of silver nanoparticles on chlorophyll and carotenoid pigments in canola (*Brassica napus*) under *in vitro* culture conditions. Proceedings of the 2nd National Conference on Nanotechnology: From Theory to Application. (In Persian).
 43. Tripathi, D., Swati, S., Shweta, S., Prabhat, K., Vijay, P., & Samiksha, S. (2017). Nitric oxide alleviates silver nanoparticles (AgNPs)-induced phytotoxicity in *Pisum sativum* seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.015>
 44. USDA. (2024). World Agricultural Production. United States Department of Agriculture.

45. Vannini, C., Domingo, G., Marsoni, M., & Bracale, M. (2014). Phytotoxic and genotoxic effects of silver nanoparticles exposure on germinating wheat seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 171(12), 1142-1148. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.05.002>
46. Venkatesan, J., Kim, S. K., & Shim, M. S. (2016). Antimicrobial, antioxidant, and anticancer activities of biosynthesized silver nanoparticles using marine algae *Ecklonia cava*. *Nanomaterials*, 6(11), 235. <https://doi.org/10.3390/nano6120235>
47. Yan, A., & Chen, Z. (2019). Impairment of photosynthesis by engineered nanoparticles. *Plant Physiology*, 181(3), 1220-1233.
48. Yazdi, Z., & Mirzaei, N. (2021). Effect of foliar application of sodium nitroprusside on some morphological, physiological, and biochemical traits of marigold (*Calendula officinalis*) under different irrigation regimes. *Plant Production Technology*, 21(1), 1-17. (In Persian).
49. Yin, L., Cheng, Y., Espinasse, B., Colman, B. P., Auffan, M., Wiesner, M., Rose, J., Liu, J., & Bernhardt, E. S. (2012). More than the ions: The effects of silver nanoparticles on *Lolium multiflorum*. *Environmental Science & Technology*, 45(6), 2360-2367. <https://doi.org/10.1021/es103995x>
50. Yugal, K., Mohanta, S., Sujogya, K. P., Rasu, J., Nanaocha, S., Akshaya, K. B., & Tapan, K. M. (2017). Antimicrobial, antioxidant and cytotoxic activity of silver nanoparticles synthesized by leaf extract of *Erythrina suberosa* (Roxb.). *Frontiers in Molecular Biosciences*, 32(3), 136-141. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2017.00014>
51. Zangeneh, R., Jamei, R., Hoseini Sarghin, S., & Kargozar Khorrami, S. (2018). Effect of seed pre-treatment with sodium hydrosulfide on some physiological and anatomical traits of maize (*Zea mays*) under lead stress. *Iranian Journal of Plant Biology*, 10(36), 19-34. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/ijpb.2018.107473.1060>
52. Zhang, H., Hu, L. Y., Hu, K. D., He, D. Y., Wang, S. H., & Luo, J. P. (2008). Hydrogen sulfide promotes wheat seed germination and alleviates oxidative damage against copper stress. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(12), 1518-1529. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00769.x>
53. Zhang, X., Qi, S., Liu, S., Mu, H., & Jiang, Y. (2024). Exogenous sodium nitroprusside alleviates drought stress in *Lagenaria siceraria*. *Plants*, 13(14), 1972. <https://doi.org/10.3390/plants13141972>
54. Zhao, R., Yin, K., & Chen, S. (2021). Hydrogen sulphide signalling in plant response to abiotic stress. *Plant Biology*, 24(4), 523-531. <https://doi.org/10.1111/plb.13367>



Research Article

Vol. 24, No. 2, Summer 2026, p. 205-231

Calibration, Evaluation, and Validation of the Most Appropriate Machine Learning Algorithms for Predicting Corn (*Zea mays* L.) Seed Yield under Biofertilizer Applications: An Interdisciplinary Approach

M. Jahan^{1*}

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

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

Received: 24 June 2025

Revised: 16 August 2025

Accepted: 29 September 2025

Available Online: 04 October 2025

How to cite this article:Jahan, M. (2026). Calibration, evaluation, and validation of the most appropriate machine learning algorithms for predicting corn (*Zea mays* L.) seed yield under biofertilizer applications: An Interdisciplinary Approach. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 205-231. (In Persian with English abstract)<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94148.1410>

Introduction

The escalating degradation of water and soil resources, coupled with global warming, population growth, and climate change, necessitates a reevaluation of food production systems. Corn (*Zea mays* L.), as the third most strategic crop worldwide, faces increasing demand due to rising food needs. Optimizing seed yield under varying environmental conditions is critical, with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) playing pivotal roles by enhancing nutrient uptake (e.g., phosphorus and nitrogen) and improving plant resilience to stresses and pathogens. However, the complex eco-physiological interactions influencing seed yield remain poorly understood, underscoring the need for advanced modeling tools. Traditional regression models often fail to capture non-linear and interactive relationships among factors such as photosynthesis rates, nutrient levels, and plant anatomical traits. Consequently, machine learning models like Deep Neural Networks (DNN) and Transformers have emerged as powerful alternatives for precision agriculture. This study aims to identify key features affecting corn seed yield using stepwise regression and compare eight machine learning algorithms, Enhanced DNN, Transformer, XGBoost, SVM, ANN, ANFIS, LightGBM, and SVR, to determine the most accurate model for predicting yield and unveiling hidden eco-physiological relationships.

Materials and Methods

The experiments were conducted over two consecutive years at the research farm of Ferdowsi University of Mashhad, Iran (latitude 36°15'N, longitude 59°28'E, altitude 985 m), located in the Kashafrud River basin. The region features a semi-arid climate with an average annual rainfall of 252 mm and a mean temperature of 15°C, with loamy soil of moderate organic carbon content. The dataset comprised 96 samples and 73 features, collected over two growing seasons, including plant traits (e.g., leaf chlorophyll content via SPAD index, nitrogen concentration) and soil characteristics. Of these, 32 were primary features (e.g., photosynthesis rate, leaf area index, canopy temperature), and 41 were engineered interaction features (e.g., Pmax, Mean_Leaf Area Index, Canopy Temp, 1_Root Colonization), designed based on domain knowledge of agro-ecophysiology, soil ecology, AMF, and PGPR. Data were randomly split (random_state = 42) into 70% training (67 samples), 15% validation (14 samples), and 15% test (15 samples) sets, with standardization applied using StandardScaler. Feature selection employed stepwise backward regression, reducing 73 features to 13 key variables (e.g., Canopy Temp_3, % P plant) based on adjusted R², multicollinearity, and variance inflation factor (VIF). Among the 15 machine learning algorithms evaluated, eight were configured with model-specific architectures, including an

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.2025.94148.1410>

Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) implemented using TensorFlow-based layers, a Transformer model with two attention heads, an Artificial Neural Network (ANN) with three hidden layers, and a Support Vector Regression (SVR) model with a radial basis function (RBF) kernel. Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and Willmott's index of agreement (d). In addition, the Shapiro–Wilk test was used to assess the normality of model residuals.

Results and Discussion

Stepwise regression yielded a model with an adjusted R^2 of 58.53% and a predictive R^2 of 51.06%, identifying 13 features (e.g., Canopy Temp_3, coefficient = 0.2451, $p = 0.002$). Machine learning results identified ANFIS ($R^2 = 0.555$), the Transformer model ($R^2 = 0.545$), and ANN ($R^2 = 0.518$) as the top-performing models, whereas SVM ($R^2 = 0.325$) exhibited the lowest performance. The Nemenyi diagram ranked ANN first (mean rank = 1.50, Willmott's $d = 0.848$), followed by the Transformer model, with a critical distance of 1.11 indicating significant differences ($\alpha = 0.05$) between the highest- and lowest-ranked models. Taylor diagrams highlighted the superior performance of the Transformer model (RMSE = 2.834, $R^2 = 0.545$), with ANFIS and ANN performing similarly. SHAP plots revealed that interactions such as Leaf Area Index–Dry Matter Yield were among the most influential predictors, while SVR shared nine features with the regression model. Correlation analysis grouped the features into physiological (e.g., SPAD_Mean) and yield-related (e.g., Dry Matter Yield) categories, with strong positive correlations (e.g., SPAD_2 and cob diameter, $r = 0.82$) and strong negative correlations (e.g., Canopy Temp_Mean and Root Colonization, $r = -0.82$). Skewed distributions in KDE plots underscored the need for non-linear models. Force plots (e.g., LightGBM sample) showed features like Leaf Area Index_Dry Matter Yield (+280.047) driving predictions, while loss curves for Enhanced DNN indicated effective convergence.

Conclusion

The study suggests that neural network-based models excel in capturing complex eco-physiological interactions, with canopy temperature and root-nitrogen interactions as key predictors, offering insights for sustainable corn production despite data size limitations.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi, Artificial Neural Network, Eco-physiological interactions, Feature engineering, Input efficiency, Plant growth-promoting rhizobacteria

محسن جهان ^۱ ID *

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

۱- گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)
(*) نویسنده مسئول:
<https://doi.org/10.22067/jcscs.2025.94148.1410>

رشد گیاه، اغلب به دلیل تثبیت سریع در خاک‌های کشاورزی، محدود است و قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار نقش مهمی در آزادسازی فسفر خاک و افزایش دسترسی آن برای گیاهان ایفا می‌کند (Mitra et al., 2023). به‌طور مشابه، ریزوباکتری‌های تحریک‌کننده رشد گیاه با حل کردن عناصر غذایی، تولید مواد محرک رشد و بهبود توسعه سیستم ریشه، به حاصلخیزی خاک کمک کرده و رشد و عملکرد گیاه را در شرایط نامطلوب بهبود می‌بخشد (Khoso et al., 2024). استفاده ترکیبی از قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و ریزوباکتری‌های تحریک‌کننده رشد گیاه نشان داده است که محتوای کلروفیل برگ را افزایش می‌دهد، بهره‌وری آب را بهبود می‌بخشد و دمای تاج‌پوشش را کاهش می‌دهد، که در نهایت منجر به عملکرد بالاتر گیاه زراعی و تحمل بهتر تنش‌ها می‌شود (Salvador et al., 2022). با این حال، سازوکارهای اکوفیزیولوژیکی که این تعاملات هم‌افزا را پشتیبانی می‌کنند، و همچنین پویایی‌های اکولوژیکی آن‌ها در سیستم‌های زراعی ذرت، هنوز به‌خوبی شناخته نشده‌اند و نیازمند ابزارهای پیشرفته برای کمی‌سازی مشارکت و بهینه‌سازی کاربرد آن‌ها است (Bao et al., 2022).

در این مطالعه، ابتدا بین ویژگی‌های رشد و نمو ذرت و ویژگی‌های خاک، ضرایب همبستگی محاسبه شدند. سپس، با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام پس‌رونده^۴، مهم‌ترین تأثیرگذارترین متغیرها بر عملکرد دانه ذرت شناسایی شدند. در ادامه و به‌منظور بهره‌گیری از مزایای الگوریتم‌های یادگیری ماشین همچون شناسایی و تبیین روابط پیچیده غیرخطی، اعتبارسنجی متقابل، انتخاب دقیق‌ترین و پایدارترین مدل، و تعمیم‌پذیری بیشتر، هاپرپارامترهای ۱۵ الگوریتم یادگیری ماشین تنظیم و اجرا شدند. پس از ارزیابی‌های اولیه، هشت الگوریتم برتر شامل سه الگوریتم درختی و چهار الگوریتم مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی و یک الگوریتم بینابینی مورد واسنجی، ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. هدف نهایی این بود که تعیین شود کدام مدل با استفاده از ویژگی‌های تعاملی (اینتراکشن) می‌تواند بهترین دقت و کارایی را داشته باشد و روابط اکوفیزیولوژیکی پنهان در شکل‌گیری عملکرد دانه را آشکار سازد.

مواد و روش‌ها

مکان اجرای آزمایش

آزمایش‌ها طی دو سال متوالی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد (موقعیت: عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه

محرک رشد گیاه^۱، به‌دلیل پتانسیل آن‌ها در بهبود رشد گیاه، عملکرد و تحمل تنش بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Brar et al., 2024). قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه با افزایش جذب عناصر غذایی مثل فسفر و نیتروژن، همچنین بهبود مقاومت گیاه به تنش‌ها و عوامل بیماری‌زا، نقش مهمی در بهبود عملکرد ذرت دارند. با وجود این، روابط پیچیده اکوفیزیولوژیکی بین این عوامل و عملکرد دانه، هنوز به‌خوبی شناخته نشده و نیاز به ابزارهای پیشرفته برای مدل‌سازی دارد.

پیش‌بینی دقیق عملکرد گیاهان زراعی از موضوعات کلیدی برای بهبود تولید غذا و پایداری اقتصادی می‌باشد. ذرت سومین گیاه زراعی مهم و راهبردی در سطح جهانی بوده و پیش‌بینی دقیق عملکرد دانه آن برای بهینه‌سازی روش‌های کشاورزی، مدیریت منابع و درک بهتر تعاملات اکوفیزیولوژیکی در سیستم‌های زراعی از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به پیچیدگی داده‌های کشاورزی که شامل متغیرهای متعدد، روابط غیرخطی و نویز زیاد است، اخیراً استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها مطرح شده است (Fashoto et al., 2021; Nayak et al., 2022; Pentos et al., 2024; Wang et al., 2024). مدل‌های سنتی (رگرسیونی) معمولاً نمی‌توانند روابط غیرخطی و تعاملی بین عوامل اکوفیزیولوژیکی مثل نرخ فتوسنتز، سطح عناصر غذایی، و ویژگی‌های آناتومیک (ساختاری) گیاه را به‌خوبی شبیه‌سازی کنند (Khaki et al., 2020; Pentos et al., 2022). به همین دلیل، الگوریتم‌های یادگیری ماشین مثل شبکه‌های عصبی عمیق^۲ و الگوریتم‌های جدیدتر مثل ترنسفورمر^۳ به‌عنوان ابزارهای قدرتمند برای این کار شناخته شده‌اند (Nayak et al., 2022). علاوه بر این، تکنیک‌های تفسیری مانند تحلیل SHAP (SHapley Additive Model Explanations) بینش‌های عمیق‌تری درباره اهمیت هر ویژگی و اثرات علی تغییرات خاص ارائه می‌دهند (Abekoon et al., 2025). این روش‌ها به پژوهشگران اجازه می‌دهند که نه تنها عملکرد ذرت را پیش‌بینی کنند، بلکه درک کنند که چگونه کودهای زیستی و سایر نهاده‌های طبیعی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی کلیدی مانند نرخ فتوسنتز، شاخص سطح برگ و کارایی مصرف آب تحت شرایط مختلف محیطی تأثیر می‌گذارند.

قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با بیش از ۹۰ درصد گیاهان خشکی از جمله ذرت، رابطه هم‌زیستی متقابل برقرار می‌کنند و جذب عناصر غذایی (به‌ویژه فسفر (P)) را افزایش داده و مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های محیطی بهبود می‌بخشند (Bhupenchandra et al., 2024). فراهمی فسفر، به‌عنوان دومین عنصر غذایی ضروری برای

- 1- Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)
- 2- Deep Neural Networks (DNN)
- 3- Transformer

4- Bckward Elimination Stepwise Regression Method

تأثیر تنش دمایی بر کارکرد ریشه را مشخص کند. ۴۱ ویژگی اینتراکشن به ۳۲ ویژگی اصلی اضافه شد تا الگوریتم‌های یادگیری ماشین بتوانند الگوهای پنهان بین داده‌ها را دقیق‌تر پیدا کنند.

پیش‌پردازش

در مرحله آماده‌سازی داده‌ها، همه ویژگی‌های عددی با استفاده از ماژول StandardScaler در پایتون استاندارد شدند. این کار مقیاس ویژگی‌ها را یکسان کرده و باعث می‌شود که مدل‌هایی مثل SVR و Enhanced DNN که به مقیاس حساس هستند، عملکرد بهتری داشته باشند.

انتخاب ویژگی‌ها (فیچرها): از روش رگرسیون گام‌به‌گام پس‌رونده برای انتخاب ویژگی‌های مؤثر استفاده شد، به این ترتیب که ابتدا مدل با همه ۷۳ ویژگی اجرا شد و سپس طی چندین مرحله و به‌صورت تکراری^۳ ویژگی‌های کم‌اهمیت حذف شدند. در این مرحله، معیارهایی مثل ضریب تبیین، هم‌خطی چندگانه^۴ و فاکتور تورم واریانس^۵ در نظر گرفته شدند. در نهایت، از بین ۷۳ ویژگی، ۱۳ ویژگی مهم‌تر انتخاب شدند که فهرست آن‌ها در **جدول ۱** آورده شده است.

دلیل اینکه با وجود مدل رگرسیونی گام‌به‌گام پس‌رونده، چندین الگوریتم یادگیری ماشین مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفتند، این است که مدل‌های رگرسیونی به‌صورت جعبه سیاه عمل کرده و توانایی کشف روابط پیچیده و غیرخطی را ندارند. علاوه‌بر این، مدل‌های رگرسیونی همواره با خطر بیش‌برازش^۶ و کم‌برازش^۷ مواجه هستند.

الگوریتم‌ها، تنظیمات و پارامترها

به‌منظور شناسایی الگوریتم‌های متناسب با مجموعه داده، ابتدا ۱۵ الگوریتم (۱۴ الگوریتم مستقل و یک الگوریتم ترکیبی) مورد بررسی و ارزیابی‌های اولیه قرار گرفتند. به این ترتیب که ابتدا هایپرپارامترهای این الگوریتم‌ها تنظیم شدند و سپس بر روی داده‌ها آموزش داده شدند. در ادامه، هایپرپارامترها^۸ از طریق روش‌هایی شامل تعیین اعتبار متقابل، گرید سرچ و آزمون و خطا بهینه شدند. در نهایت، خروجی این الگوریتم‌ها مورد واریسی و ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، به سبب عدم

شرقی، ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا) انجام شد. این منطقه در حوضه رودخانه کشفرد در شمال شرق ایران قرار دارد. آب‌وهوای منطقه، نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه ۲۵۲ میلی‌متر و دمای متوسط ۱۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. خاک محل آزمایش، لومی با محتوای کربن آلی متوسط بود.

منشأ مجموعه داده

مجموعه داده شامل ۹۶ نمونه و ۷۳ ویژگی^۱ بود که طی دو فصل رشد اندازه‌گیری و ثبت شده بودند. این داده‌ها شامل ویژگی‌های گیاهی مثل محتوای کلروفیل برگ (شاخص SPAD)، غلظت نیتروژن گیاه و ویژگی‌های ریشه، به‌علاوه ویژگی‌های خاک بود (شرح کامل ویژگی‌ها به‌دلیل محدودیت صفحات در این متن آورده نشده است). از این ۷۳ ویژگی، ۳۲ ویژگی اصلی بودند (مثل نرخ فتوسنتز، شاخص سطح برگ و دمای تاج‌پوشش) و ۴۱ ویژگی، ویژگی‌های تعاملی (اینتراکشن) مهندسی‌شده بودند (مثل PmaxMean_LeafAreaIndex و CanopyTemp1_RootColonization). داده‌ها با استفاده از تقسیم تصادفی (random_state=42) به ۷۰ درصد آموزش (۶۷ نمونه)، ۱۵ درصد اعتبارسنجی (۱۴ نمونه) و ۱۵ درصد تست (۱۵ نمونه) تقسیم شدند. برای استانداردسازی داده‌ها، از ماژول StandardScaler استفاده شد.

مهندسی ویژگی‌های تعاملی (اینتراکشن)

ویژگی‌های اینتراکشن به‌منظور مدل‌سازی روابط پیچیده بین متغیرها ساخته شدند. در داده‌های زراعی، تعاملات بین متغیرها معمولاً غیرخطی و به هم وابسته است. مثلاً تأثیر دمای تاج‌پوشش روی عملکرد دانه ممکن است به‌میزان کولونیزاسیون ریشه بستگی داشته باشد. معیار انتخاب ویژگی‌های اینتراکشن، دانش حوزه‌ای^۲ و در نظر گرفتن روابط و دانش اگرواکوفیزیولوژیکی، اکولوژی خاک، اکوفیزیولوژی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (که جزو تیمارهای آزمایش بودند) بود (برای آگاهی از جزئیات آزمایش‌های مزرعه‌ای به منبع <https://doi.org/10.1007/s44396-025-00001-0> مراجعه شود). برای مثال، RootColonization_SPAD1 تعامل بین کولونیزاسیون ریشه و محتوای کلروفیل را نشان می‌دهد، که رابطه بین جذب عناصر غذایی توسط ریشه و کارایی سیستم فتوسنتزی گیاه را منعکس می‌کند. CanopyTemp1_RootColonization این ویژگی تعامل بین دمای تاج‌پوشش و کولونیزاسیون ریشه را نشان می‌دهد و می‌تواند

3- Iterative

4- Multicollinearity

5- Variance Inflation Factor (VIF)

6- Overfitting

7- Underfitting

۸- تنظیماتی هستند که قبل از آموزش مدل باید توسط کاربر تعیین شوند (و مدل برخلاف پارامترها، آن‌ها را از داده‌ها یاد نمی‌گیرد)، مثلاً تعداد لایه‌ها یا نورون‌ها در شبکه عصبی، نرخ یادگیری (Learning rate)، یا تعداد درخت‌ها در رندوم فورتست.

1- Feature

2- Domain knowledge

ترنسفورمر و اس وی آر بود، به دلیل مشابهت معیارهای ارزیابی آن با تک الگوریتم‌های سازنده آن، از مجموعه مورد بررسی حذف شد و تجزیه و تحلیل داده‌ها با هشت الگوریتم که شرح آن‌ها در ادامه می‌آید، انجام گرفت.

تناسب روش شناختی برخی الگوریتم‌ها با ماهیت مجموعه داده، شش الگوریتم شامل CNN (Convolutional Neural Network)، LSTM (Long Short-Term Memory)، Random Forest، CatBoost، TabNet، K-NN (K-Nearest Neighbors) حذف شدند. الگوریتم ترکیبی مورد بررسی که حاصل تلفیق دو الگوریتم

جدول ۱- سیزده ویژگی گیاهی-خاکی انتخاب شده توسط مدل رگرسیون گام به گام پس‌رونده

Table 1- Thirteen plant-soil features selected by the stepwise backward regression model

ویژگی	Feature
دمای تاج‌پوشش در مرحله کاکل‌دهی	Canopy Temp_3
درصد فسفر اندام‌های گیاهی	% P plant
درصد نیتروژن کل خاک	% N soil
اثر متقابل ارتفاع بوته و تعداد بلال	PlantHeight_CobNumber
اثر متقابل درصد نیتروژن اندام‌های گیاهی و طول ویژه ریشه	Nplant_SpecificRootLength
اثر متقابل شاخص سطح برگ و میانگین عدد اسپد	Leaf Area Index_SPAD_Mean
اثر متقابل شاخص سطح برگ و عملکرد ماده خشک	Leaf Area Index_Dry Matter Yield
اثر متقابل درصد کلونیزاسیون ریشه و عملکرد ماده خشک	Root Colonization_Dry Matter Yield
اثر متقابل قطر ساقه و عملکرد ماده خشک	Stem Diameter_Dry Matter Yield
مجدور طول ویژه ریشه	(Specific Root Length) ^2
اثر متقابل مجدور میانگین دمای تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ	(Canopy Temp_Mean) ^2 * Leaf Area Index
اثر متقابل مجدور درصد کلونیزاسیون ریشه و طول ویژه ریشه	(Root Colonization) ^2 * Specific Root Length
اثر متقابل مجدور درصد کلونیزاسیون ریشه و عملکرد ماده خشک	(Specific Root Length) ^2 * Dry Matter Yield

ترنسفورمر (Transformer)

- معماری: دو لایه attention با دو سر (head) و feed-forward dimension⁴ برابر با ۳۲
- نرخ Dropout⁵ برابر با ۰/۱
- نرخ یادگیری: ۰/۰۰۱ با بهینه‌ساز AdamW
- تنظیمات: تعداد epochها برابر با ۱۵۰ با early stopping
- patience برابر با ۱۵ epoch
- نحوه تنظیم: تنظیم دستی برای تعداد لایه‌ها، نورون‌ها، نرخ

سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (Adaptive)

(Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

- معماری: یک مدل ترکیبی با TensorFlow شامل:
- لایه ورودی با تعداد نورون‌های برابر با تعداد ویژگی‌ها (تعداد ستون‌های X)
- یک لایه مخفی با ۳۲ نورون و فعال‌ساز sigmoid (شبیه‌سازی توابع عضویت)
- یک لایه مخفی با ۱۶ نورون و فعال‌ساز ReLU¹ (قوانین فازی)
- لایه خروجی با یک نورون (بدون فعال‌ساز)
- نرخ یادگیری: ۰/۰۰۱ با بهینه‌ساز Adam
- تنظیمات: تعداد epochها ۱۰۰ با batch size³ برابر ۸.

- تعداد نمونه‌هایی که در هر مرحله از آموزش به مدل داده می‌شود تا پارامترها به‌روزرسانی شوند. مثلاً اگر بچ ساز ۳۲ باشد، یعنی مدل هر بار روی ۳۲ نمونه داده آموزش می‌بیند. اگر بچ سائز کوچک‌تر باشد حافظه کمتری نیاز است، ولی آموزش ممکن است کندتر انجام گیرد.
- اندازه لایه مخفی در به شبکه عصبی پیش‌خور (Feed-Forward) یعنی در آن لایه ۳۲ نورون وجود دارد که داده‌ها را پردازش می‌کنند.
- درصد نورون‌هایی که در هر لایه شبکه عصبی به‌صورت تصادفی در حین آموزش غیرفعال (خاموش) می‌شوند تا از بیش‌برازش (Overfitting) جلوگیری شود، مثلاً نرخ ۰/۰۵ یعنی ۵۰ درصد نورون‌ها به‌طور تصادفی خاموش می‌شوند.
- یعنی اگر مدل به مدت ۱۵ دور آموزش (Epoch) روی داده‌های اعتبارسنجی (Validation) بهبود پیدا نکند (مثلاً خطا کم نشود)، آموزش متوقف می‌شود تا از بیش‌برازش (Overfitting) جلوگیری گردد.

- یک تابع فعال‌سازی (Rectified Linear Unit) که خروجی نورون را اگر مثبت باشد، همان عدد را برمی‌گرداند، و اگر منفی باشد صفر می‌کند مثلاً: $f(x) = \max(0, x)$ یادگیری را به‌طور ساده و سریع بهتر می‌کند.
- در یادگیری ماشین، اپوک یعنی یک دور کامل که الگوریتم کل داده‌های آموزشی را یک بار می‌بیند و پردازش می‌کند. مثلاً اگر ۱۰۰۰ نمونه داده آموزشی داشته باشیم و Batch Size برابر با ۱۰۰ باشد، در هر اپوک مدل ۱۰ بار به‌روزرسانی می‌شود تا کل داده‌ها رو ببیند. بنابراین، تعداد اپوک‌ها نشان می‌دهد که مدل چند بار کل داده‌ها را مرور کرده است.

- پارامترها: تعداد estimators برابر با ۱۰۰، نرخ یادگیری ۰/۰۵، حداکثر عمق ۴
- تنظیمات: استفاده از L_2 (regularization⁴) به منظور کاهش بیش‌برازش
- نحوه تنظیم: GridSearchCV برای نرخ یادگیری و تعداد estimators.

شبکه عصبی عمیق بهبودیافته (Enhanced Deep Neural Network (EDNN)

- معماری: پنج لایه مخفی با ۱۲۸، ۶۴، ۳۲، ۱۶، و ۸ نورون، تعداد epoch ۲۰۰
- استفاده از سازوکار ReduceLRonPlateau برای تنظیم نرخ یادگیری لایه‌های مخفی و خطی برای خروجی
 - نرخ Dropout برابر با ۰/۲ برای جلوگیری از بیش‌برازش
 - تنظیمات: استفاده از Batch Normalization⁵ به منظور پایداری یادگیری، استفاده از بهینه‌ساز Adam⁶ (نرخ یادگیری ۰/۰۰۰۱)، توقف زودهنگام Early stopping با صبر ۵۰ دوره
 - تنظیم هاپارامترها: با GridSearchCV برای نرخ یادگیری و تعداد نورون‌ها

رگرسیون بردار پشتیبان (Support Vector Machine (SVM)

معماری: کرنل خطی (linear) با پارامتر $C=1.0$

4- تکنیکی در یادگیری ماشین برای جلوگیری از بیش‌برازش است که با اضافه کردن یک جریمه به تابع خطا (Loss Function)، مدل را ساده‌تر نگه می‌دارد. مثلاً در رگرسیون، L_1 (Lasso) یا L_2 (Ridge) وزن‌های مدل را محدود می‌کند تا خیلی پیچیده نشود.

5- به اختصار BatchNorm یک تکنیک در یادگیری ماشین است که برای بهبود سرعت و پایداری آموزش شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. به‌طور خلاصه: در هر لایه شبکه عصبی، خروجی‌ها را در هر دسته (Batch) نرمال‌سازی می‌کند، یعنی میانگین آن‌ها را نزدیک صفر و واریانس را نزدیک یک می‌کند. سپس، با دو پارامتر (مقیاس و جابجایی) که یاد گرفته می‌شوند، خروجی را تنظیم می‌کند. این کار باعث می‌شود که گرادینت‌ها پایدارتر شوند، آموزش سریع‌تر انجام گیرد و مدل کمتر به مقادیر اولیه حساس باشد. معمولاً در شبکه‌های عمیق مثل CNN‌ها قبل یا بعد از لایه‌های فعال‌ساز مثل ReLU استفاده می‌شود. استفاده از بچ نورمالیزاسیون کاهش مشکلاتی مثل ناپدید شدن گرادینت، کاهش بیش‌برازش و امکان استفاده از نرخ یادگیری بالاتر را به دنبال دارد.

6- یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر گرادینت که ترکیبی از مونتوم و تطبیق نرخ یادگیری است. این الگوریتم، به‌جای یک نرخ یادگیری ثابت، برای هر پارامتر نرخ یادگیری را به‌صورت تطبیقی تنظیم می‌کند. سریع و کارآمد است و برای شبکه‌های عصبی عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یادگیری، تعداد سرها و feed-forward dimension (بدون استفاده از GridSearchCV یا جست‌وجوی تصادفی).

شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network (ANN)

- معماری: سه لایه مخفی با ۶۴، ۳۲ و ۱۶ نورون
- نرخ یادگیری ۰/۰۰۱، فعال‌ساز ReLU برای لایه‌های مخفی، بدون فعال‌ساز برای لایه خروجی
 - نرخ Dropout برابر با ۰/۲ به منظور کاهش بیش‌برازش
 - آموزش با ۱۰۰ epoch و batch size برابر ۸
 - بهینه‌سازی برای نرخ یادگیری و تعداد لایه‌ها، با استفاده از GridSearchCV

بردار پشتیبان رگرسیون (Support Vector Regression (SVR)

- معماری: کرنل RBF (Radial Basis Function)
- پارامترها $C=1.0$ ، $\epsilon=0.1$
 - تنظیمات: مقیاس‌بندی داده‌ها قبل از آموزش
 - نحوه تنظیم GridSearchCV: برای C و epsilon

لایت جی بی ام (LightGBM)

- پارامترها: تعداد estimators برابر با ۲۰۰، نرخ یادگیری ۰/۱، حداکثر عمق ۵
- تنظیمات: استفاده از تکنیک early stopping با ۵۰ دور صبر
- نحوه تنظیم: جست‌وجوی تصادفی (Random Search²) برای تعداد estimators³ و عمق.

ایکس جی بوست (Extrem Gradient Boosting (XGBoost)

- جست‌جوی شبکه‌ای با اعتبارسنجی متقابل GridSearch Cross Validation: تمام ترکیب‌های ممکن از پارامترهای الگوریتم (مثلاً عمق درخت، تعداد درخت، نرخ یادگیری و غیره) را تولید کرده و آن‌ها را تست می‌کند و در ادامه بهترین آن‌ها را بر اساس دقت (مثلاً R^2) برای متغیر هدف (مثلاً عملکرد دانه) پیدا می‌کند.
- با انتخاب تصادفی اما هدفمند، امکان بهینه‌سازی سریع‌تر را در مسائل با فضای پارامتر گسترده فراهم می‌سازد.
- مدل‌ها یا الگوریتم‌هایی که در یادگیری ماشین برای پیش‌بینی یا برآورد کردن استفاده می‌شوند. مثلاً در یک جنگل تصادفی، هر درخت تصمیم یک برآوردگر است، در Scikit-learn، برآوردگرها اشیایی هستند که داده را می‌گیرند و با متدهایی مثل fit و predict کار می‌کنند.

- تنظیمات: مقیاس‌بندی داده‌ها (StandardScaler) قبل از آموزش. مدل با داده‌های استاندارد شده آموزش دید.
- نحوه تنظیم: تنظیم دستی برای کرنل و مقدار C، بدون استفاده از GridSearchCV یا جست‌وجوی تصادفی.

ارزیابی و تعیین اعتبار

عملکرد مدل‌ها با R^2 (ضریب تعیین)، RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)، MAE (میانگین قدرمطلق خطا) و Willmott's d (شاخص توافق ویلموت) سنجیده شد. به‌منظور تحلیل خطاها، از آزمون شاپیرو-ویلک^۱ برای بررسی نرمال بودن باقی‌مانده‌ها استفاده شد.

نرم‌افزارهای مورد استفاده

تحلیل‌ها با استفاده از پایتون نسخه ۳/۹ در محیط Spyder (Scientific PYthon Development EnviRonment) 6.0.4 انجام شد و از کتابخانه‌هایی مانند TensorFlow برای ساخت و آموزش مدل‌ها، scikit-learn برای پیش‌پردازش داده‌ها و تقسیم‌بندی آن‌ها، و Matplotlib و Pandas برای تولید نمودارها بهره گرفته شد. استانداردسازی داده‌ها با استفاده از StandardScaler از کتابخانه scikit-learn انجام شد تا ویژگی‌ها میانگین صفر و انحراف معیار یک داشته باشند، که این موضوع برای آموزش مؤثر شبکه‌های عصبی ضروری است. تفسیر خروجی‌های الگوریتم‌ها و رسم نمودارهای وابستگی جزئی و نمودارهای تصمیم با استفاده از کتابخانه SHAP (Shapley Additive exPlanations) صورت گرفت.

نتایج و بحث

به‌منظور توسعه یک مدل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی عملکرد دانه در گیاه ذرت، از روش رگرسیون گام‌به‌گام حذفی پس‌رونده با سطح اهمیت حذف^۲ ۰/۰۵ استفاده شد. ابتدا مجموعه داده‌ای با ۷۳ ویژگی شامل متغیرهای فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی، و شیمیایی خاک و گیاه جمع‌آوری شد. برای کاهش هم‌خطی‌چندگانه و بهبود تعمیم‌پذیری مدل، مدل‌های مختلف ارزیابی و مقایسه شدند تا این که مدل نهایی با ۱۳ ویژگی انتخاب شد (جدول ۲). این مدل ضریب تعیین تعدیل‌شده^۳ برابر ۶۴/۲۰ درصد و ضریب تعیین پیش‌بینی^۴ برابر ۵۱/۰۶ درصد را به دست آورد، که نشان‌دهنده دقت قابل قبول و تعمیم‌پذیری مناسب مدل است. معادله رگرسیونی و

ضرایب ویژگی‌ها در معادله^۱ نشان داده شده است. ضرایب ویژگی‌ها به همراه اشتباه استاندارد ضرایب، پی ویلیو و مقدار عامل تورم واریانس هر ویژگی و ضریب تبیین مدل به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. از آنجا که قبل از تحلیل، داده‌ها استاندارد شدند بنابراین، ضرایب رگرسیونی قابل مقایسه با یکدیگر بوده و میزان اهمیت هر متغیر در پیش‌بینی عملکرد دانه را نشان می‌دهند.

ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های تشخیص داده‌شده توسط مدل رگرسیونی

ضرایب همبستگی بین ۱۳ ویژگی برتر تشخیص داده‌شده توسط مدل گام‌به‌گام پس‌رونده، به همراه دندروگرام حاصل از خوشه‌بندی سلسله مراتبی متغیرها و نمودار پراکندگی و توزیع‌های تخمین چگالی هسته‌ای^۵ آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل، الگوها، گروه‌بندی‌ها و وابستگی‌های بین متغیرها را به‌خوبی نشان می‌دهد.

کلاسترینگ سلسله‌مراتبی (دندروگرام)

ترتیب کلاسترینگ (از چپ به راست در دندروگرام) شباهت در الگوهای همبستگی را منعکس می‌کند، به‌طوری که ویژگی‌های نزدیک به هم در یک خوشه گروه‌بندی شده‌اند. دندروگرام حاصل، ویژگی‌ها را در دو خوشه، مطابق دانش اکوفیزیولوژی گروه‌بندی کرد:

- **خوشه ۱:** شامل SPAD_Mean، SPAD_2 و Nplant_SpecificRootLength است. این متغیرها که به خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه (مثل محتوای کلروفیل و ویژگی‌های ریشه) مربوط هستند، ارتباط قوی‌ای با یکدیگر دارند.

• خوشه ۲: شامل Leaf Area، Dry Matter Yield

Index_SPAD_Mean و Seed Yield است. این خوشه متغیرهای مرتبط با عملکرد ماده خشک، محتوای کلروفیل برگ‌ها و شاخص سطح برگ را گروه‌بندی می‌کند و وابستگی متقابل آن‌ها را مورد تأکید قرار می‌دهد.

- 1- Shapiro-Wilk
- 2- Alpha to remove
- 3- R-squared adjusted
- 4- R-squared predicted

5- Kernel density estimation (KDE)

(۱)

$$\begin{aligned} \text{Seed yield} = & 0.0000 + 0.2451 \text{ Canopy Temp}_3 - 0.488 \% \text{ P plant} + 0.395 \% \text{ N soil} \\ & + 0.3387 \text{ PlantHeight_CobNumber} + 0.298 \text{ Nplant_SpecificRootLength} \\ & + 0.479 \text{ Leaf Area Index_SPAD_Mean} - 0.911 \text{ Leaf Area Index_Dry Matter Yield} \\ & + 0.669 \text{ Root Colonization_Dry Matter Yield} + 0.642 \text{ Stem Diameter_Dry Matter Yield} \\ & + 0.742 (\text{Specific Root Length})^2 + 0.453 (\text{Canopy Temp_Mean})^2 \times \text{Leaf Area Index} - \\ & 0.643 (\text{Root Colonization})^2 \times \text{SpecificRootLength} - 0.531 (\text{Specific Root Length})^2 \times \text{Dry Matter Yield} \end{aligned}$$

جدول ۲- ضرایب ویژگی‌ها به همراه اشتباه استاندارد ضرایب، پی‌ولیو و مقدار عامل تورم واریانس^۱ هر ویژگی و ضریب تبیین مدل
Table 2- Feature coefficients with standard errors, p-values, and variance inflation factors for each feature and the model's coefficient of determination

عامل تورم واریانس	مقدار پی	مقدار تی	خطای استاندارد ضریب	ضریب	جمله
VIF	P-value	T-value	SE Coef	Coef	Term
	1.000	0.00	0.0657	0.0000	ثابت Constant
1.31	0.002	3.24	0.0757	0.2451	دمای تاج‌پوشش در مرحله کاکل‌دهی Canopy Temp ₃
5.77	0.003	-3.07	0.159	-0.488	درصد فسفر اندام‌های گیاهی % P plant
6.40	0.021	2.36	0.167	0.395	درصد نیتروژن کل خاک %N soil
1.56	0.000	4.11	0.0824	0.3387	اثر متقابل ارتفاع بوته و تعداد بلال PlantHeight_CobNumber
3.97	0.026	2.27	0.132	0.298	اثر متقابل درصد نیتروژن اندام‌های گیاهی و طول ویژه ریشه Nplant_SpecificRootLength
3.86	0.000	3.69	0.130	0.479	اثر متقابل شاخص سطح برگ و میانگین عدد اسپد Leaf Area Index_SPAD_Mean
27.88	0.011	-2.61	0.349	-0.911	اثر متقابل شاخص سطح برگ و عملکرد ماده خشک Leaf Area Index_Dry Matter Yield
15.86	0.013	2.54	0.263	0.669	اثر متقابل درصد کلونیزاسیون ریشه و عملکرد ماده خشک Root Colonization_Dry Matter Yield
14.53	0.013	2.55	0.252	0.642	اثر متقابل قطر ساقه و عملکرد ماده خشک Stem Diameter_Dry Matter Yield
23.40	0.023	2.32	0.320	0.742	مجذور طول ویژه ریشه (Specific Root Length) ²
8.50	0.021	2.35	0.193	0.453	اثر متقابل مجذور میانگین دمای تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ (Canopy Temp_Mean) ² × Leaf AreaIndex
14.09	0.011	-2.59	0.248	-0.643	اثر متقابل مجذور درصد کلونیزاسیون ریشه و طول ویژه ریشه (Root Colonization) ² × SpecificRootLength
14.35	0.037	-2.12	0.250	-0.531	اثر متقابل مجذور درصد کلونیزاسیون ریشه و عملکرد ماده خشک (Specific Root Length) ² × Dry Matter Yield

جدول ۳- ضریب تبیین تعدیل شده و پیش‌بینی مدل رگرسیونی گام‌به‌گام در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت

Table 3- Adjusted and predicted coefficients of determination for the stepwise regression model in predicting corn grain yield

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.643993	64.20%	58.53%	51.06%

را به زیرگروه‌های معنی‌دار تقسیم کرده‌اند.

- **توزیع‌های چندوجهی:** ویژگی‌هایی مثل Canopy Temp_Mean و Temp و Leaf چندین قله دارند که نشان‌دهنده وجود زیرگروه‌های متمایز (شامل تیمارها و شرایط آزمایشی مختلف) در داده‌ها است.
- **توزیع‌های آریب:** ویژگی‌هایی مثل Seed Yield و Dry Matter Yield توزیع‌های آریب دارند، که نشان‌دهنده غیرخطی بودن روابط این داده‌ها است و حاکی از آن است که برای مدل‌سازی نیاز به مدل‌های قوی‌تر (مانند مدل‌های یادگیری ماشین) می‌باشد.
- **نمودارهای پراکندگی در نیمه پایینی ماتریس (روابط زوجی)**
- **روندهای خطی قوی:** نمودار پراکندگی بین SPAD_Mean و SPAD_2 یک رابطه خطی قوی را نشان می‌دهد که با همبستگی بالای این دو ویژگی سازگار است.
- **الگوهای پراکنده:** نمودار پراکندگی بین Canopy Temp_Mean و Seed Yield پراکندگی بیشتری دارد که نشان‌دهنده یک رابطه ضعیف‌تر یا غیرخطی هست (با وجود همبستگی منفی).

نتیجه‌گیری و توصیه‌ها

- **تأثیرات مثبت:** Leaf Area و Dry Matter Yield Index_SPAD_Mean همبستگی‌های مثبتی با عملکرد دانه دارند که نشان می‌دهد زیست‌توده بالاتر و سطح برگ / محتوای کلروفیل بیشتر، به افزایش تولید دانه کمک می‌کند.
- **تأثیرات منفی:** Canopy Temp_Mean همبستگی منفی با عملکرد دانه دارد، که حاکی از آن است دماهای بالای سایه‌انداز (احتمالاً به دلیل تنش گرمایی) ممکن است عملکرد را کاهش دهد.
- **روابط ضعیف:** متغیرهایی مثل P plant End Season و RootColonization_PplantEndSeason همبستگی‌های ضعیف‌تری با عملکرد دانه دارند که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم و محدود روی عملکرد می‌باشد.
- به‌طور کلی، نمودار همبستگی زوجی با کلاسترینگ، روابط

تحلیل ضرایب همبستگی (نیمه بالای ماتریس)

ضرایب همبستگی و مقادیر p-value روابط معنی‌دار را نشان می‌دهند. بر این اساس، همبستگی‌ها در سه گروه به شرح زیر قابل تفسیر هستند:

- **همبستگی‌های مثبت قوی:** بین محتوای کلروفیل در مرحله خروج برگ پرچم (SPAD_2) و قطر بلال و درصد فسفر گیاه در انتهای فصل رشد، همبستگی‌های قوی وجود داشت (به ترتیب $r=0.80$ و $r=0.82$). SPAD_Dry و Leaf Area Index_SPAD_Mean: $r = 0.37$ ، $p < 0.001$. این همبستگی مثبت متوسط، تولید زیست‌توده را با سطح برگ و محتوای کلروفیل مرتبط می‌کند.
- **همبستگی‌های منفی قوی:** Canopy Temp_Mean و $p < 0.001$ ، $r = -0.82$ Root Colonization: حاکی از آن است که دماهای بالاتر سایه‌انداز گیاهی به شدت با کاهش کلونی‌زاسیون ریشه مرتبط است، که احتمالاً به دلیل تنش گرمایی بر کارکرد کلی گیاه از جمله کاهش میزان فتوسنتز و تولید آسمیلات‌ها و به دنبال آن کاهش تراوشات ریشه ای مؤثر بر فعالیت و جمعیت‌های ریزجانداران ساکن ریزوسفر تأثیر می‌گذارد. در منابع متعدد به نقش قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار در بهبود روابط آب-خاک-گیاه و به دنبال آن میزان تبخیر و تعرق اشاره شده است (Bao et al., 2022, Bhupenchandra et al., 2024; Brar et al., 2024).
- **همبستگی‌های متوسط:** وجود همبستگی بین SPAD_2 و Nplant_SpecificRootLength ($r = 0.60$ ، $p < 0.001$) که نشان‌دهنده رابطه منطقی بین طول مخصوص ریشه (ریخت‌شناسی ریشه) و محتوای کلروفیل می‌باشد. افزایش طول مخصوص ریشه و نیز محتوای کلروفیل برگ به عنوان نتیجه کاربرد ریزوباکتری‌های تحریک‌کننده رشد گیاه، از سوی محققان متعدد مورد تأکید قرار گرفته است (Bhupenchandra et al., 2024).

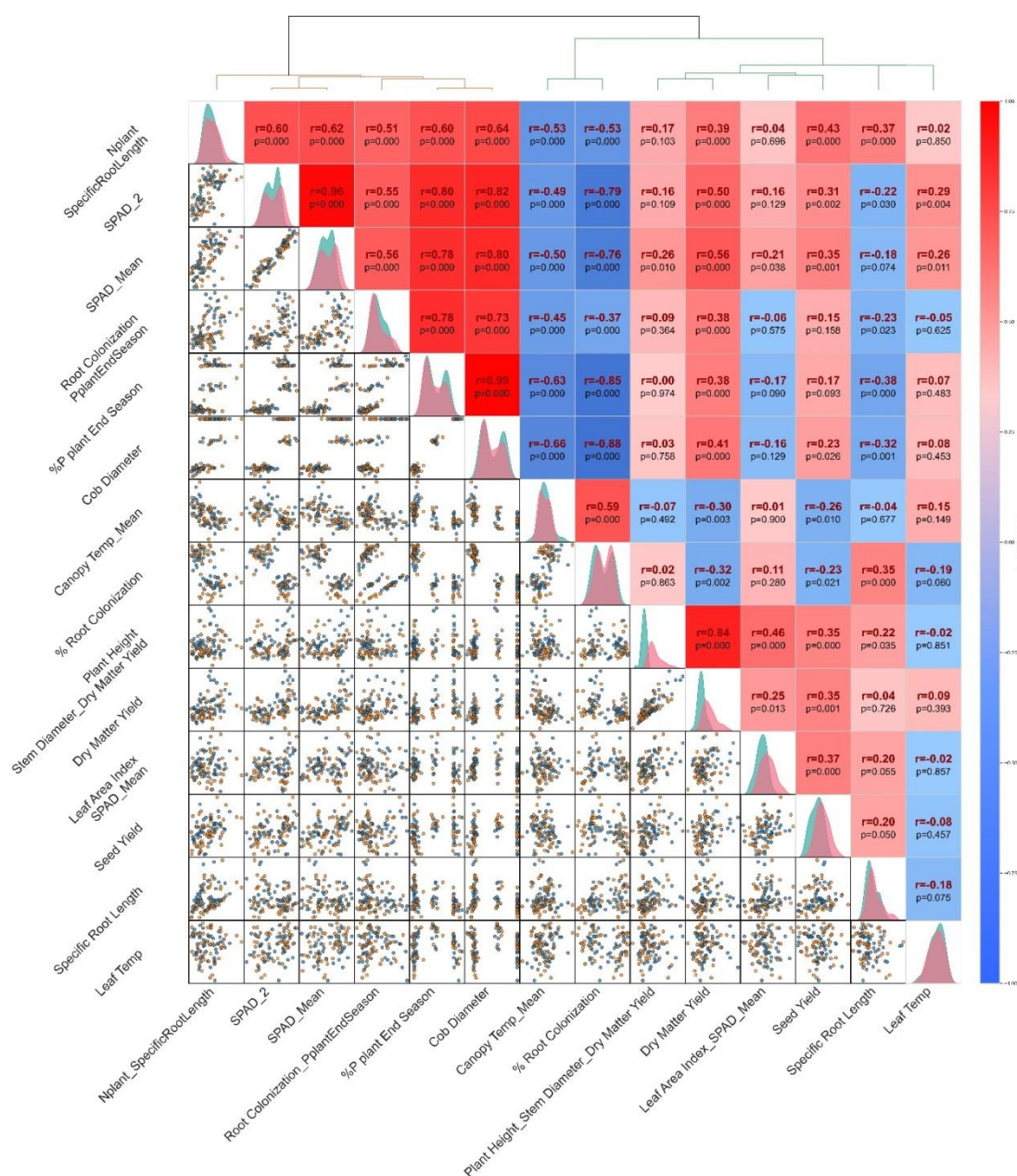
نمودارهای KDE در قطر (توزیع چگالی احتمال)

نمودارهای KDE با دو خوشه رنگی نشان داده شده‌اند که کلاسترینگ تجمعی با $n_clusters=2$ را منعکس می‌کنند و داده‌ها

پیچیده‌ای بین ۱۳ ویژگی را آشکار می‌کند:

- **انتخاب ویژگی:** متغیرهایی با همبستگی بالا (مثل Dry Matter Yield, SPAD_Mean) گزینه‌های مناسبی برای مدل‌سازی پیش‌بینی عملکرد دانه هستند.
- **بینش‌های خوشه‌ای:** دو خوشه اصلی، خصوصیات فیزیولوژیکی (خوشه ۱) را از معیارهای مرتبط با عملکرد

- (خوشه ۲) جدا می‌کند، که این موضوع می‌تواند به‌نوبه خود زمینه لازم برای تحلیل‌ها یا مداخلات هدفمند (مدیریت اگر واکولوژیک از جمله نوع و میزان نهاده) را فراهم آورد.
- **ملاحظات مدل‌سازی:** توزیع‌های اُریب و الگوهای چندوجهی نشان می‌دهند که برای توضیح دقیق این روابط، نیاز به تبدیل داده‌ها یا مدل‌های غیرخطی هست.



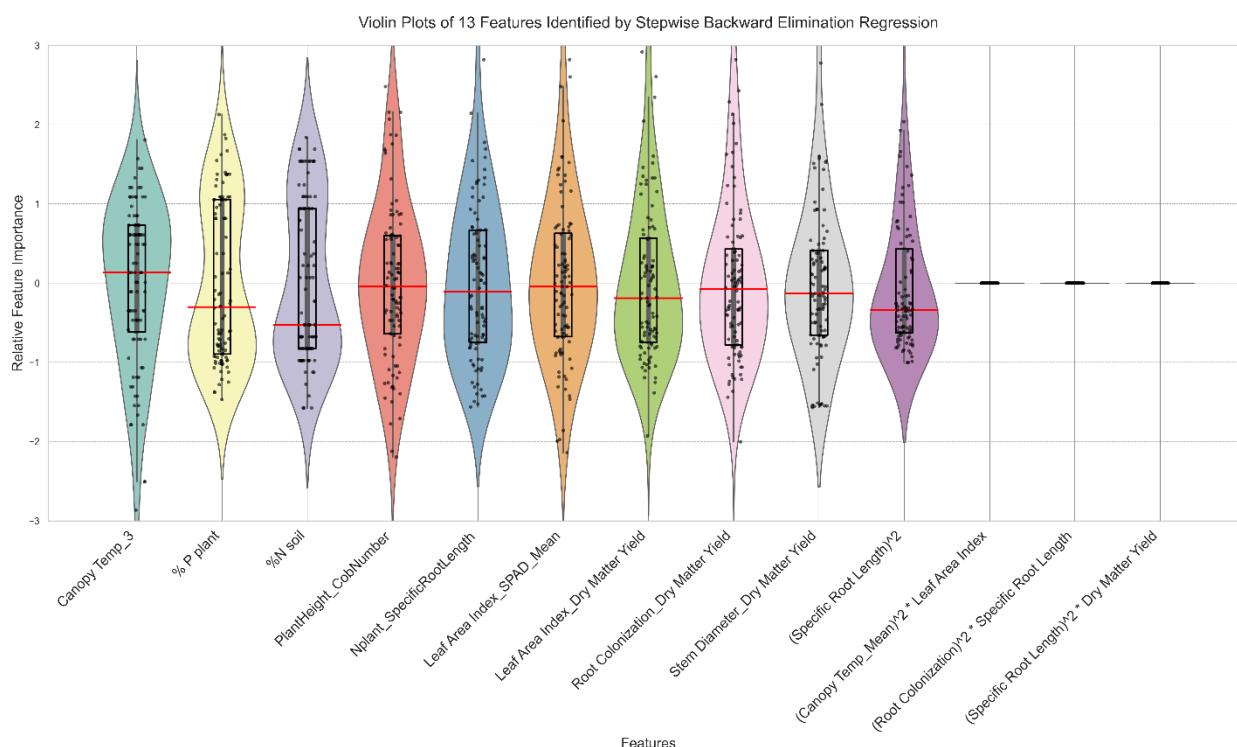
شکل ۱- ماتریس ضرایب همبستگی، نمودار توزیع چگالی و دندروگرام بین ۱۳ ویژگی مؤثر بر عملکرد دانه ذرت (شرح کامل متغیرها در جدول ۱ آورده شده است)

Figure 1- Matrix of correlation coefficients, kernel density estimation plots, and dendrogram among thirteen features influencing corn grain yield (Full descriptions of variables shown in table 1)

نمودار شیب ویولونی اهمیت نسبی ۱۳ متغیر تشخیص داده شده توسط مدل رگرسیونی

شکل ۲، نمودار ویولن پلات توزیع و اهمیت نسبی ۱۳ ویژگی کلیدی شناسایی شده توسط مدل رگرسیونی گام به گام پس رونده، را برای پیش بینی عملکرد دانه ذرت نشان می دهد. این ویژگی ها شامل متغیرهای فیزیولوژیکی و ریخت شناختی هستند که پراکندگی داده ها و میانگین اهمیت آن ها نشان داده شده است. محور عمودی نشان دهنده اهمیت نسبی ویژگی ها است و محور افقی نام ویژگی ها

را نشان می دهد. ویژگی هایی مانند "Canopy Temp_3"، "Root Colonization_Dry" و "PlantHeight_CobNumber" Matter Yield دارای پراکندگی گسترده تری هستند که بیانگر تنوع بیشتر تأثیر آن ها در مدل های مختلف است. همچنین میانه داده های هر ویژگی با خط قرمز مشخص شده که نشان می دهد برخی ویژگی ها مانند "%N soil" و "Root Colonization_Dry" Matter Yield دارای پراکنش بیشتر داده های با مقادیر منفی هستند.



شکل ۲- نمودار شیب ویولونی اهمیت نسبی ۱۳ متغیر تشخیص داده شده توسط مدل رگرسیونی گام به گام (شرح کامل متغیرها در جدول ۱ آورده شده است)

Figure 2- SHAP violin plot shows relative importance of 13 features identified via Stepwise Elimination Regression (Full descriptions of variables shown in table 1)

انتخاب شده، این موارد با مقادیر صفر پُر شده اند، که منجر به شکل گیری ویولن های تک بعدی شده است.

ارزیابی دقت و توان الگوریتم های یادگیری ماشین در پیش بینی عملکرد دانه ذرت

در حوزه علوم داده و یادگیری ماشین، مفاهیم ارزیابی مدل، اعتبارسنجی مدل، دقت مدل و توان مدل از جمله اصطلاحات کلیدی هستند که علی رغم ارتباط مفهومی، دارای تمایزات ساختاری

برای سه ویژگی ترکیبی (انتهای سمت راست نمودار)، شامل $(\text{Canopy Temp_Mean})^2 \times \text{Leaf Area Index}$ ، $(\text{Root Colonization})^2 \times \text{Specific Root Length}$ و $(\text{Specific Root Length})^2 \times \text{Dry Matter Yield}$ ، مشاهده می شود که ویولن پلات ها به صورت خطوط افقی صاف رسم شده اند. این پدیده ناشی از پراکندگی بسیار کم یا عدم وجود داده های معنی دار در این ویژگی ها پس از استانداردسازی است. در فرآیند رگرسیون گام به گام حذفی، این فیچرها ممکن است به دلیل همبستگی ضعیف با متغیر هدف (عملکرد دانه ذرت) یا داده های ناقص حذف شده باشند. بالاین حال، برای حفظ یکپارچگی تحلیل و نمایش کامل ۱۳ فیچر

بیشتر از ۵۰٪ به‌عنوان الگوریتم‌های برتر در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت شناخته شدند. مور و همکاران (Moore et al., 2013) دامنه زیر را برای تفسیر ضریب تبیین (شاخصی از نکویی برازش^۵) پیشنهاد کرده‌اند: $R^2 < 0.25$: بسیار ضعیف؛ $0.25 \leq R^2 < 0.50$: ضعیف؛ $0.50 \leq R^2 < 0.75$: متوسط؛ $R^2 \geq 0.75$: قابل توجه. براساس راهنمای کوهن و جانسون، ضرایب تبیین مساوی یا بزرگ‌تر از ۰/۲۶ در محدوده قابل توجه^۶ قرار می‌گیرند. اگرچه ضریب تبیین به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان شاخصی از برازش مدل در رگرسیون خطی و چندگانه به‌کار می‌رود، اما تفسیر آن در زمینه یادگیری ماشین به‌ویژه با الگوریتم‌های غیرخطی باید با احتیاط صورت گیرد. دلیل این امر آن است که R^2 لزوماً ظرفیت پیش‌بینی یا توان تعمیم مدل‌های پیچیده را به‌طور کامل نشان نمی‌دهد و در برخی موارد ممکن است خوش‌بینانه یا گمراه‌کننده باشد، به‌ویژه در شرایطی با ابعاد بالا یا بیش‌برازش. بنابراین توصیه می‌شود که علاوه بر R^2 ، از شاخص‌هایی مانند RMSE، MAE یا اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی جامع‌تر عملکرد مدل استفاده گردد (Kuhn & Johnson, 2013).

نمودار نمایی^۷

شکل ۳: نمودار نمایی برای مقایسه هشت مدل یادگیری ماشین را براساس معیارهای R^2 ، Willmott's d، MAE و RMSE نشان می‌دهد. محور افقی میانگین رتبه^۸ هر مدل را نشان می‌دهد. رتبه کمتر یعنی عملکرد بهتر (زیرا معیارهای مثل R^2 و Willmott's d که هرچه بالاتر باشند بهتر هستند، رتبه پایین‌تر می‌گیرند، و معیارهایی مثل MAE و RMSE که هرچه پایین‌تر باشند بهتر هستند، نیز در رتبه پایین‌تر قرار می‌گیرند). در محور عمودی اسم مدل‌ها نشان داده شده است، از بهترین (بالا) به ضعیف‌ترین (پایین). خطوط افقی آبی فاصله بحرانی^۹ را نشان می‌دهند. اگر خط افقی مربوط به دو مدل هم‌پوشانی نداشته باشد، تفاوت عملکرد آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار است (با $\alpha=0.05$).

و کارکردی مشخص می‌باشند. ارزیابی مدل^۱، فرآیند جامع سنجش عملکرد مدل با به‌کارگیری معیارهای کمی مختلف (نظیر R^2 ، MAE، RMSE) بر روی مجموعه داده‌های آزمایشی است و هدف‌های آن تعیین قابلیت تعمیم‌پذیری مدل در شرایط عملیاتی و سنجش اثربخشی مدل در حل مسئله هدف می‌باشد. ارزیابی، با تمامی مفاهیم دیگر مرتبط است، چرا که چارچوبی جامع برای سنجش کیفیت مدل ارائه می‌دهد و دربرگیرنده سنجه‌هایی مانند دقت مدل می‌باشد. ارزیابی، رویکردی کل‌نگر دارد و به یک جنبه خاص محدود نمی‌شود و عموماً در مرحله نهایی توسعه مدل اجرا می‌شود. اعتبارسنجی^۲، فرآیند نظام‌مند تنظیم هاپرپارامترها و ارزیابی مقدماتی مدل بر روی مجموعه داده‌های اعتبارسنجی به‌منظور جلوگیری از بروز پدیده بیش‌برازش می‌باشد. اهداف آن، بهینه‌سازی ساختار مدل پیش از ارزیابی نهایی و اطمینان از تعادل میان پیچیدگی و تعمیم‌پذیری مدل است. همچون ارزیابی مدل، از داده‌های مستقل استفاده می‌کند (ممکن است معیارهای دقت را در فرآیند خود به کار گیرد). برخلاف ارزیابی، اعتبارسنجی ماهیتاً فرآیندی تکرارشونده و اصلاحی است و تمرکز اصلی آن بر تنظیم مدل و نه قضاوت نهایی است. دقت مدل^۳، معیار کمی خاصی است که میزان انطباق پیش‌بینی‌های مدل با مقادیر واقعی را اندازه‌گیری می‌کند. در مسائل رگرسیون عموماً از R^2 ، RMSE و در مسائل طبقه‌بندی از Accuracy استفاده می‌شود. هدف، سنجش کارایی پیش‌بینی مدل و ارائه معیاری عینی برای مقایسه مدل‌های مختلف است. زیرمجموعه‌ای از فرآیند ارزیابی مدل محسوب می‌شود و ممکن است در فرآیند اعتبارسنجی نیز مورد استفاده قرار گیرد. دقت، نگاهی تک‌بعدی به عملکرد مدل دارد و فاقد جنبه‌های فرآیندی دیگر مفاهیم است. توان مدل^۴، عبارت است از ظرفیت ذاتی مدل در یادگیری الگوهای پیچیده و انطباق با داده‌ها که تابعی از پارامترهای ساختاری نظیر تعداد لایه‌ها، نورون‌ها و عمق شبکه می‌باشد. اهداف آن شامل تعیین پتانسیل مدل در حل مسائل پیچیده و ایجاد تعادل میان انعطاف‌پذیری و خطر بیش‌برازش است. با معماری مدل در ارتباط است و بر معیارهای عملکردی مانند دقت تأثیر مستقیم دارد. به‌طور کلی، توان مدل ماهیتاً توصیف‌کننده ویژگی‌های ذاتی مدل است و برخلاف سایر مفاهیم، بیشتر متمرکز بر پتانسیل مدل است تا عملکرد آن.

ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا، قدر مطالب خطا و شاخص توافق هشت مدل مورد بررسی در **جدول ۴** نشان داده شده‌اند. سه الگوریتم آنفیس، ترنسفورمر و ای ان ان، با ضریب تبیین

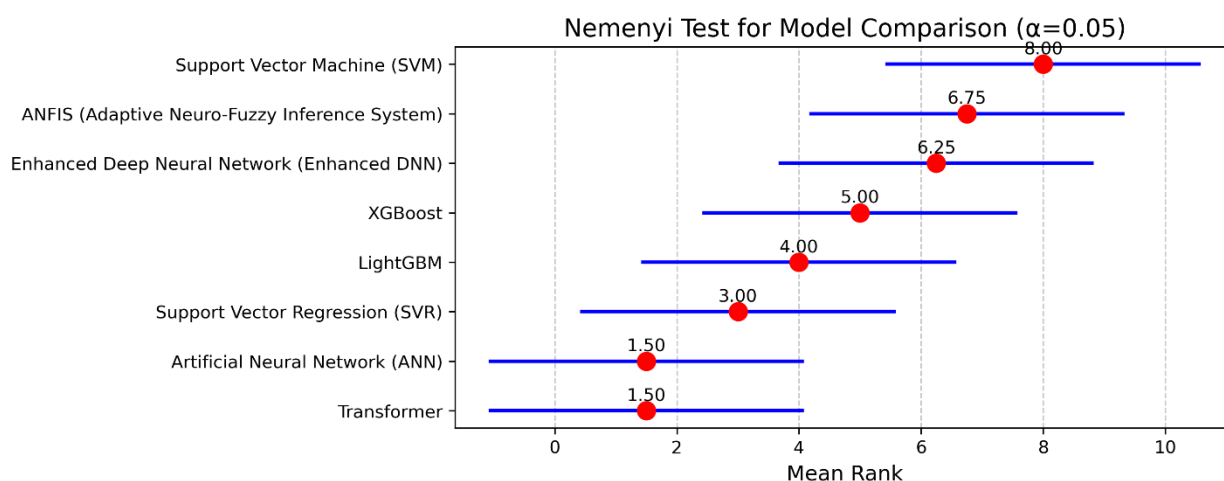
5- Goodness-of-fit
6- Substantial
7- Nemenyi diagram
8- Mean rank
9- Critical distance

1- Model evaluation
2- Model validation
3- Model accuracy
4- Model capacity

جدول ۴- ضریب تبیین، جذرمیانگین مربعات خطا، قدر مطلق خطا و شاخص توافق هشت مدل یادگیری ماشین در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت

Table 4- Coefficient of determination, root mean square error, mean absolute error, and Willmott's d index for eight machine learning models to predict corn grain yield

الگوریتم Algorithm	ضریب تبیین R ²	جذر میانگین مربعات خطا RMSE	میانگین مطلق خطا MAE	دی ویلموت Willmott's d
انفیس ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)	0.555	2.804	2.368	0.826
ترنسفورمر Transformer	0.545	2.834	2.331	0.837
شبکه عصبی مصنوعی Artificial Neural Network (ANN)	0.518	2.917	2.254	0.848
رگرسیون بردار پشتیبان Support Vector Regression (SVR)	0.452	3.111	2.381	0.758
لاست جی بی ام LightGBM	0.385	3.296	2.617	0.727
ایکس جی بوست XGBoost	0.339	3.417	2.780	0.689
ماشین بردار پشتیبان Support Vector Machine (SVM)	0.325	2.96	2.37	0.796
شبکه عصبی عمیق ارتقاء یافته Enhanced Deep Neural Network (Enhanced DNN)	0.321	3.462	3.313	0.674



شکل ۳- نمودار نمینی مقایسه هشت الگوریتم یادگیری ماشین در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت

Figure 3- Nemeni plot comparing eight machine learning algorithms in predicting corn grain yield

تفسیر نمودار نمینی

نشان می‌دهد عملکرد آن خیلی به Transformer نزدیک بوده و تفاوت آماری معنی‌داری با آن ندارد (چون خطوط آن‌ها هم‌پوشانی دارند).

- مدل SVR (با میانگین رتبه ۳) رتبه سوم را به خود اختصاص داد، اگرچه که از ANN و Transformer کمی ضعیف‌تر است، با این حال خوب عمل کرده است.
- LightGBM (4.00) کاهش قابل توجه نشان داد و عملکرد آن از SVR کمتر شد.

۱- رتبه‌بندی کلی: مدل ANN با میانگین رتبه ۱/۵۰ و شاخص دی برابر ۰/۸۴۸ بهترین عملکرد را نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده توافق بالای پیش‌بینی‌ها با داده‌های واقعی است.

- مدل Transformer با ضریب تبیین ۰/۵۴۵ و میانگین رتبه ۱/۵۰ نیز عملکرد بسیار خوبی دارد.
- مدل ANN هم‌رتبه با Transformer است که

می‌کنند. مدل‌هایی که به نقطه مرجع نزدیک‌تر هستند، عملکرد بهتری دارند (نقطه مرجع در نمودار تیلور، نقطه‌ای با انحراف معیار بالا و ضریب همبستگی نزدیک به یک است که به‌عنوان معیار ایده‌آل عملکرد مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود). نمودار تیلور نشان می‌دهد که مدل Transformer با $RMSE=2.834$ و $R^2=0.545$ بهترین عملکرد را در بین هشت مدل دارد. مدل‌های ANN ($RMSE=2.917$, $R^2=0.518$) و ANFIS ($RMSE=2.884$, $R^2=0.529$)، در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در مقابل، مدل‌های XGBoost و LightGBM ($RMSE=3.296$, $R^2=0.385$) و EnhancedDNN ($RMSE=3.417$, $R^2=0.339$) و SVM ($RMSE=3.442$, $R^2=0.321$) و $R^2=0.329$ ضعیف‌ترین عملکرد را نشان می‌دهند.

در ادامه، تحلیل مفصلی از نمودار تیلور ارائه می‌شود:

۱- **انحراف معیار:** انحراف معیار مدل‌ها در محدوده تقریبی ۲/۵۷ تا ۳/۵۸ قرار دارد. مدل‌ای که با انحراف معیار ۲/۵۷۳ کمترین تغییرپذیری را در پیش‌بینی‌های خود نشان می‌دهد، درحالی‌که مدل‌های آنفیس (۲/۶۰۰) و ترنسفورمر (۲/۶۲۷) نیز انحراف معیار پایینی دارند. در مقابل، مدل انهنسد دی ان ان (۳/۵۸۲) و ایکس جی بوست (۳/۳۱۷) بالاترین انحراف معیار را دارند، که نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر خطاها در پیش‌بینی‌ها می‌باشد.

۲- **ضریب همبستگی:** در نمودار تیلور، ضریب همبستگی واقعی بین پیش‌بینی‌های مدل و داده‌های واقعی (مرجع)، روی قوس (قطاع دایره) نمایش داده می‌شود. اعداد روی محور افقی و عمودی (فاصله شعاعی از مبدأ در کمان‌های هم‌مرکز) نشان‌دهنده انحراف معیار (نسبت انحراف معیار مدل به انحراف معیار مرجع) هستند. در این نمودار خاص، برخلاف شیوه مرسوم، محورهای استانداردسازی (نرمال‌سازی) نشده‌اند و مقادیر انحراف معیار به‌صورت واقعی (Raw) رسم شده‌اند. گواه این موضوع آن است که نقطه مرجع (Reference) که نشان‌دهنده داده‌های واقعی است، روی محور افقی در فاصله ۴/۳ از مبدأ قرار دارد که همان انحراف معیار واقعی مشاهدات است. نقطه مرجع، بهترین حالت ممکن را نشان می‌دهد: ضریب همبستگی ۱ و انحراف معیار ۴/۳. هرچه مدلی به این نقطه نزدیک‌تر باشد، عملکرد بهتری دارد. خطوط نقطه‌چینی که از نقطه مرجع شروع و به‌صورت قوس‌هایی به سمت محور عمودی کشیده شده‌اند، کمان‌های RMSD ثابت هستند. RMSD

- (5.00) XGBoost عملکردی متوسط را از خود نشان داد.
- (6.25) EnhancedDNN نسبت به مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی ساده (مثل ANN) ضعیف‌تر عمل کرد.
- (6.75) ANFIS نزدیک به Enhanced DNN است.
- (8.00) SVM با بالاترین میانگین رتبه، ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داد که با ضریب تبیین ۰/۳۲۵ و شاخص دی ۰/۷۹۶ هم‌خوانی دارد.

۲- فاصله بحرانی

فاصله بحرانی: فاصله بحرانی برابر با ۵/۱۱ نشان می‌دهد که مدل‌هایی که تفاوت میانگین رتبه آن‌ها بیشتر از این مقدار است (مثل ANN و SVM)، تفاوت آماری معنی‌داری با یکدیگر دارند. مدل‌هایی که خط افقی آن‌ها بیشتر از این فاصله از هم جدا شده باشد (مثل Transformer و SVM)، با یکدیگر تفاوت آماری معنی‌دار دارند. ANN و Transformer با یکدیگر هم‌پوشانی دارند، ولی SVM با هیچ‌کدام از مدل‌های بالا هم‌پوشانی ندارد، یعنی ضعیف‌تر بودن آن معنی‌دار است.

۳- الگوهای مشاهده‌شده

الگوهای مشاهده‌شده: مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی (ANN, Transformer, Enhanced DNN) به‌طور کلی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های درختی (XGBoost, LightGBM) و مدل‌های فازی (ANFIS) دارند. این ممکن است به‌دلیل توانایی آن‌ها در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی در داده‌های ذرت باشد. مدل‌های درختی مثل XGBoost و LightGBM در میانه جدول هستند که نشان می‌دهد در این دیتاست عملکرد متوسطی دارند. اس وی آر، جزء هیچ یک از الگوریتم‌های درختی و شبکه عصبی محسوب نمی‌شود، بلکه یک مدل مبتنی بر Support Vector Machine هست که با کرنل‌ها (مثل RBF) عمل می‌کند.

نمودار تیلور^۱

نمودار تیلور (شکل ۴)، هشت مدل یادگیری ماشین مورد بررسی را براساس انحراف معیار، ضریب همبستگی، جذرمیانگین مربعات خطا، ضریب تبیین و شاخص توافق ویلموت مقایسه می‌کند. این نمودار تعادل بین انحراف معیار و ضریب همبستگی را نشان می‌دهد، درحالی‌که معیارهای $RMSE$ و R^2 دقت پیش‌بینی‌ها را ارزیابی

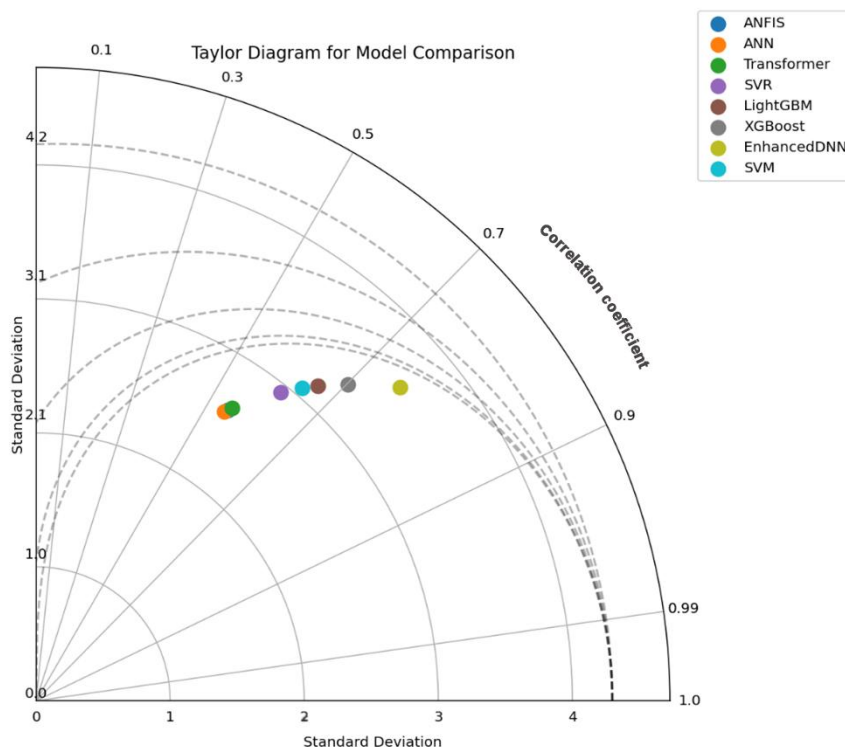
2- Correlation Coefficient

3- Reference

1- Taylor Diagram

فاصله هر مدل از نقطه مرجع در امتداد این کمان‌ها، خطای کلی آن مدل را مشخص می‌کند.

در این نمودار معادل RMSE (جذر میانگین مربعات خطا) است، با این تفاوت ظریف که در بافت نمودار تیلور، معمولاً به مؤلفه تصادفی خطا (پس از حذف سوگیری) اشاره دارد.



شکل ۴- نمودار تیلور مقایسه هشت الگوریتم یادگیری ماشین در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت

Figure 4- Taylor diagram comparing eight machine learning algorithms in predicting corn grain yield

مدل‌های با عملکرد بهتر (نزدیک‌تر به نقطه مرجع و

RMSE پایین‌تر):

مدل‌های ANN (انحراف معیار ۲/۵۷۳، RMSE برابر ۲/۹۱۷)، ANFIS (انحراف معیار ۲/۶۰۰، RMSE برابر ۲/۸۸۴) و Transformer (انحراف معیار ۲/۶۲۷، RMSE برابر ۲/۸۳۴) دارای مقادیر RMSE نسبتاً پایینی هستند و در نمودار تیلور به نقطه مرجع نزدیک‌ترند. این مدل‌ها همچنین ضرایب تبیین بالاتری دارند (ANFIS: 0.529، Transformer: 0.545) که تأییدکننده دقت بهتر پیش‌بینی‌های آن‌ها است. نزدیکی این سه مدل در نمودار تیلور (به‌ویژه قرارگیری ANFIS در زیر دو مدل دیگر به دلیل انحراف معیار نزدیک‌تر) نشان‌دهنده عملکرد مشابه و نسبتاً خوب آن‌ها است.

مدل‌های با انحراف معیار و RMSE بالاتر (عملکرد

ضعیف‌تر):

مدل‌های LightGBM (انحراف معیار ۳/۱۵۳، RMSE برابر

ضریب همبستگی بالاتر (مثلاً ۰/۷۵۸ برای Enhanced DNN)

به‌معنای تطابق بهتر مدل با داده‌های مرجع است. ضرایب

همبستگی مدل‌ها به شرح زیر هستند:

ANFIS: 0.550, ANN: 0.544, Transformer: 0.555, SVR: 0.621, LightGBM: 0.667, XGBoost: 0.701, EnhancedDNN: 0.758, SVM: 0.648

مدل انهنسد دی ان ان با ضریب همبستگی ۰/۷۵۸ بالاترین

مقدار را دارد که نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تر با داده‌های واقعی است. در مقابل، مدل‌های ای ان ان (۰/۵۴۴) و ترنسفورمر (۰/۵۵۵) به دلیل ضریب همبستگی پایین‌تر، همبستگی ضعیف‌تری با داده‌های مرجع دارند و از این نظر عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهند.

تحلیل عملکرد مدل‌ها براساس نمودار تیلور: همبستگی

بالا به‌تنهایی برای قضاوت در مورد عملکرد یک مدل کافی نیست، بلکه باید همراه با انحراف معیار و RMSE/RMSD (فاصله از نقطه مرجع) تفسیر شود. بر این اساس، مدل‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند:

برتر تشخیص داده‌شده توسط چهار مدل برتر (که ضریب تبیین بالای ۰/۵۰ داشتند) در شکل ۶ نشان داده شده است.

مدل آنفیس در پنج ویژگی با ۱۳ ویژگی تشخیص داده‌شده توسط مدل گام‌به‌گام مشترک بود (دمای تاج‌پوشش ۳ و ۴، نیتروژن گیاه در طول مخصوص ریشه، طول مخصوص ریشه در عملکرد ماده خشک، شاخص سطح برگ در عدد اسپد میانگین).

مدل ترنسفورمر در پنج ویژگی با ۱۳ ویژگی تشخیص داده‌شده توسط مدل گام‌به‌گام مشترک بود (دمای تاج‌پوشش ۳ و ۴، ارتفاع گیاه در تعداد بلال، مجذور کلونیزاسیون ریشه در طول مخصوص ریشه، دمای تاج‌پوشش میانگین).

شش ویژگی مشترک مدل ای ان با مدل گام‌به‌گام عبارت بودند از: ارتفاع گیاه در تعداد بلال، دمای تاج‌پوشش ۴ و ۲، محتوای نیتروژن گیاه در طول مخصوص ریشه، مجذور طول مخصوص ریشه در عملکرد ماده خشک، شاخص سطح برگ در عدد اسپد میانگین.

مدل اس وی آر بیشترین تعداد ویژگی مشترک با مدل گام‌به‌گام را دارا بود (نه ویژگی) که عبارتند از: دمای تاج‌پوشش ۴، ۳ و ۲، ارتفاع گیاه در تعداد بلال، شاخص سطح برگ در عدد اسپد میانگین، شاخص سطح برگ در عملکرد ماده خشک، مجذور دمای تاج‌پوشش میانگین در شاخص سطح برگ، درصد کلونیزاسیون ریشه در عملکرد ماده خشک، درصد نیتروژن گیاه در طول مخصوص ریشه.

در جدول ۵، ویژگی‌های مشترک بین چهار الگوریتم ماشین برتر آورده شده است.

از بین ۱۳ ویژگی تشخیص داده‌شده توسط مدل رگرسیونی گام‌به‌گام پس‌رونده، ۵، ۲، ۶ و ۵ ویژگی به‌ترتیب در مدل‌های آنفیس، ترنسفورمر، ای ان و اس وی آر نیز تشخیص داده شدند. الگوریتم اس وی آر با سادگی و به‌کارگیری کرنل RBF، عملکرد خوبی ($R^2 = 0.452$) از خود نشان داد. ویژگی دمای تاج‌پوشش در مرحله پُر شدن دانه، به‌عنوان ویژگی مؤثر و با اهمیت بالا در پیش‌بینی عملکرد دانه، توسط چهار الگوریتم برتر تشخیص داده شد. سه برهم‌کنش شامل محتوای نیتروژن گیاه و طول ویژه ریشه، شاخص سطح برگ و عدد اسپد، ارتفاع بوته و تعداد بلال و اثر ساده دمای تاج‌پوشش در مرحله کاکل‌دهی در سه الگوریتم برتر حضور داشتند که با مبانی اکوفیزیولوژیکی رشد و نمو گیاهان زراعی هم‌خوانی دارد (Taiz et al., 2018).

XGBoost (انحراف معیار ۳/۳۱۷، RMSE برابر ۲/۶۱۷)، SVM (انحراف معیار ۳/۰۶۳، RMSE برابر ۲/۳۸۱) و Enhanced DNN (انحراف معیار ۳/۵۸۲، RMSE برابر ۳/۱۳۶) انحراف معیار و RMSE بالاتری دارند که نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر خطاها و دقت پایین‌تر پیش‌بینی‌ها است. این مدل‌ها R^2 پایین‌تری نیز دارند (LightGBM: 0.385، Enhanced DNN: SVM: 0.329، XGBoost: 0.339) که عملکرد ضعیف‌تر آن‌ها را تأیید می‌کند.

نکته قابل توجه در مورد مدل Enhanced DNN این است که این مدل با وجود داشتن RMSE گزارش‌شده ۳/۱۳۶، در نمودار تیلور به خط نقطه‌چین RMSD صفر (که از نقطه مرجع به مرکز مختصات کشیده شده) از همه مدل‌ها نزدیک‌تر است. این نزدیکی نشان می‌دهد که براساس معیار اصلی نمودار تیلور (فاصله از نقطه مرجع)، Enhanced DNN عملکرد بهتری نسبت به آنچه اعداد RMSE نشان می‌دهند، دارد. این مدل با ضریب همبستگی ۰/۷۵۸ بالاترین تطابق الگو با داده‌های مرجع را نشان می‌دهد و انحراف معیار آن (۳/۵۸۲) نسبت به نقطه مرجع (۴/۳) تفاوت کمتری دارد. عدم تطابق بین RMSE گزارش‌شده و موقعیت نقطه در نمودار تیلور ممکن است ناشی از تفاوت RMSE کل (شامل سوگیری) با RMSD مرکز‌زدایی‌شده در نمودار تیلور باشد. براساس خود نمودار، نزدیکی به نقطه مرجع معیار نهایی عملکرد است و Enhanced DNN در این معیار جایگاه برجسته‌ای دارد.

تحلیل و بحث نتایج الگوریتم‌های یادگیری ماشین

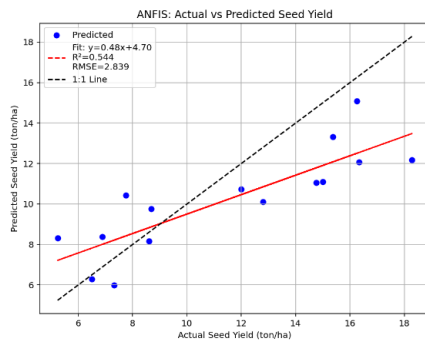
۱- نمودار پراکنش نقاط پیش‌بینی‌شده در برابر نقاط

مشاهده‌شده: نمودار پراکنش نمونه‌های پیش‌بینی‌شده در مقابل نمونه‌های مشاهده‌شده برای هشت مدل مورد ارزیابی در شکل ۵ نشان داده شده است.

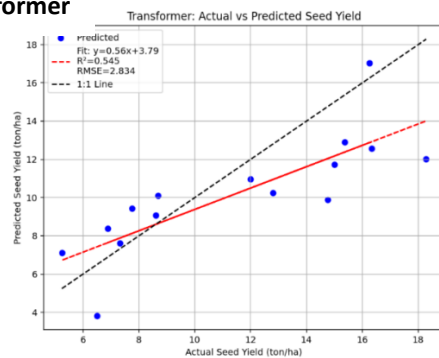
فاشوتو و همکاران (Fashoto et al., 2021) اظهار داشتند که مدل‌های یادگیری ماشین در برآورد عملکرد محصول ذرت نسبت به روش‌های سنتی (رگرسیون خطی چندگانه و حذف معکوس) برتری دارند. گزارش شده است که مدل جنگل تصادفی در تخمین فعالیت‌های آنزیمی خارج‌سلولی خاک در زمین‌های شور ساحلی بازسازی‌شده کشاورزی عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون‌های خطی چندگانه داشته است (Xie et al., 2021).

۱- نمودارهای شیب ویولونی اهمیت نسبی ۲۰ ویژگی

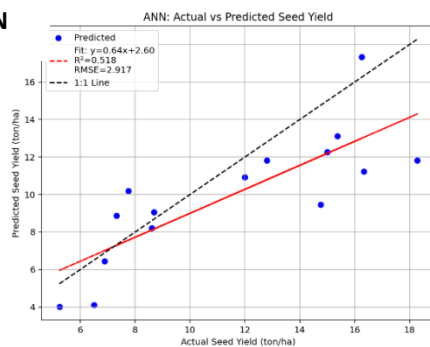
A) ANFIS



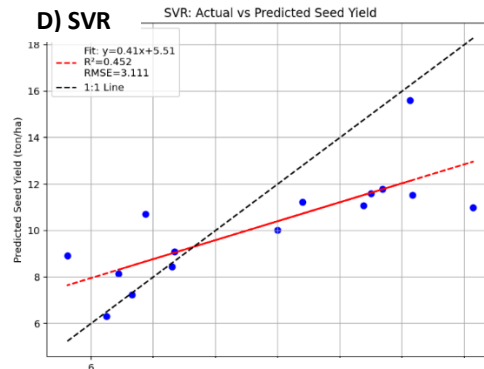
B) Transformer



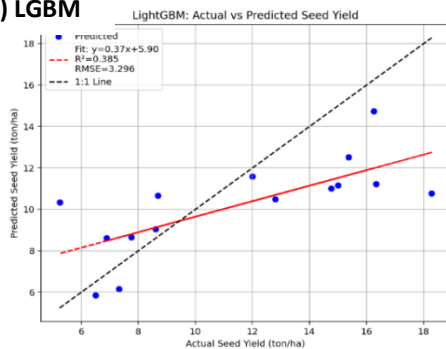
C) ANN



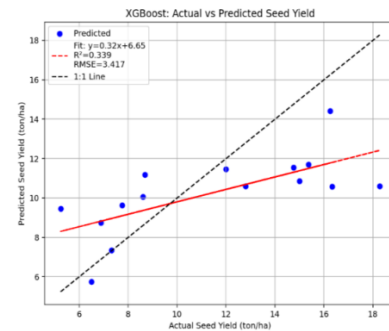
D) SVR



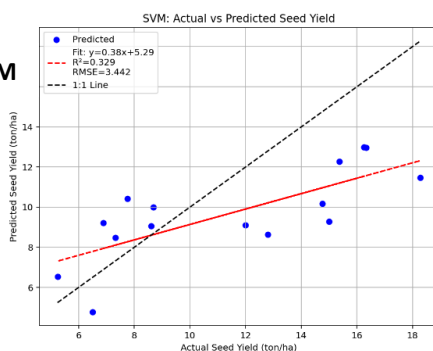
E) LGBM



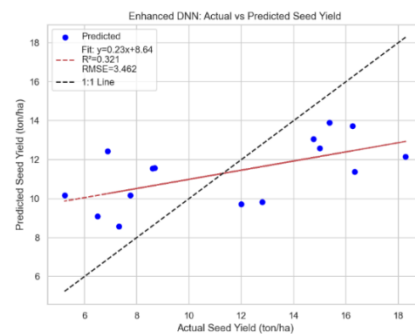
F) XGBoost



G) SVM



H) EDNN

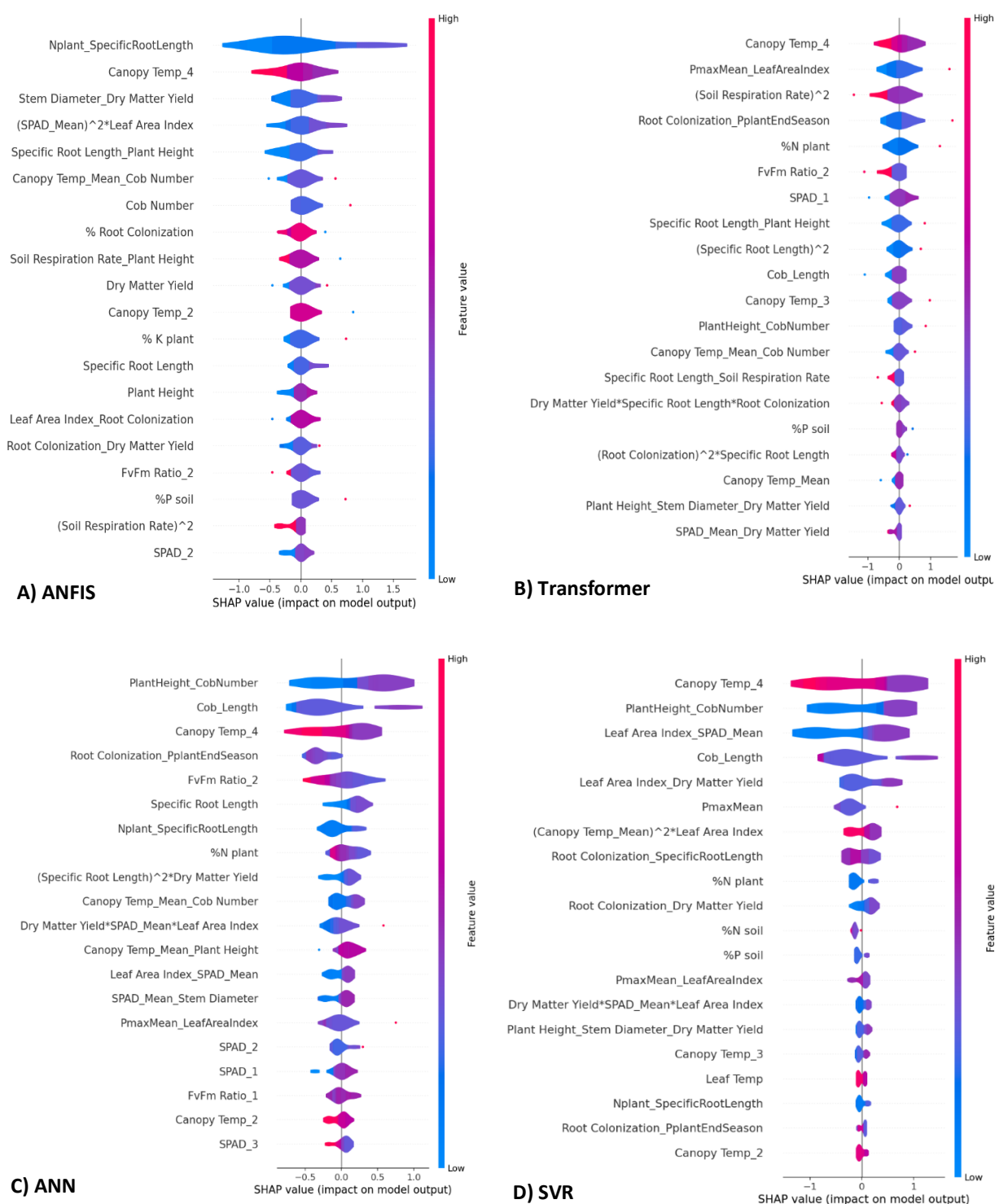


شکل ۵- نمودار پراکنش و خط رگرسیونی مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد دانه ذرت در برابر مقادیر مشاهده‌شده

Figure 5- Scatter plot and regression line of predicted versus observed corn grain yield values

A: آنفیس، B: ترنسفورمر، C: ای‌ان‌ان، D: اس وی آر، E: لایت جی بی ام، F: ایکس جی بوست، G: اس وی ام، H: انهنس دی ان ان

A: ANFIS, B: Transformer, C: ANN, D: SVR, E: LightGBM, F: XGBoost, G: SVM, H: DNN



شکل ۶- نمودارهای شیب ویولونی اهمیت نسبی ۲۰ ویژگی برتر تشخیص داده‌شده توسط چهار الگوریتم برتر (شرح کامل متغیرها در جدول ۱ آورده شده است)

Figure 6- SHAP violin plots of the relative importance of the top 20 features identified by the four best algorithms (Full descriptions of variables shown in table 1)

A: آنفیس، B: ترنسفورمر، C: ای ان ان، D: اس وی آر
A: ANFIS, B: Transformer, C: ANN, D: SVR

جدول ۵- ویژگی‌های مشترک در چهار الگوریتم ماشین برتر با مدل رگرسیون گام‌به‌گام (به تفکیک هر الگوریتم)
Table 5- Common features among the four top machine learning algorithms and the stepwise regression model (by algorithm)

	رگرسیون بردار پشتیبان SVR	شبکه عصبی مصنوعی ANN	ترنسفورمر Transformer	انفیس ANFIS
1	دمای تاج‌پوشش در مرحله دانه بندی Canopy_Temp4	اثر متقابل ارتفاع بوته و تعداد بلال PlantHeight_CobNumber	دمای تاج‌پوشش در مرحله دانه بندی Canopy_Temp4	دمای تاج‌پوشش در مرحله دانه بندی Canopy_Temp4
2	اثر متقابل ارتفاع بوته و تعداد بلال PlantHeight_CobNumber	دمای تاج‌پوشش در مرحله دانه بندی Canopy_Temp4	دمای تاج‌پوشش در مرحله کاکل‌دهی Canopy_Temp3	اثر متقابل درصد نیتروژن اندام‌های گیاهی و طول ویژه ریشه Nplant_SpecificRootLength
3	اثر متقابل شاخص سطح برگ و میانگین عدد اسپد Leaf Area Index_SPAD_Mean	اثر متقابل درصد نیتروژن اندام‌های گیاهی و طول ویژه ریشه Nplant_SpecificRootLength	اثر متقابل ارتفاع بوته و تعداد بلال PlantHeight_CobNumber	اثر متقابل شاخص سطح برگ و عملکرد ماده خشک (Specific Root Length) ² *Dry Matter Yield
4	عملکرد ماده خشک Leaf Area Index_Dry Matter Yield	ریشه و عملکرد ماده خشک (Specific Root Length) ² *Dry Matter Yield	ریشه و طول ویژه ریشه (Root Colonization) ² *SpecificRootLength	میانگین عدد اسپد Leaf Area Index_SPAD_Mean
5	(Canopy Temp_Mean) ² *Leaf Area	اثر متقابل شاخص سطح برگ و میانگین عدد اسپد Leaf Area Index_SPAD_Mean	اثر متقابل کلونیزاسیون ریشه و محتوای فسفر در انتهای فصل رشد Colonization_PplantEndSeason	دمای تاج‌پوشش در مرحله برگ پرچم Canopy_Temp2
6	Root Colonization_Dry Matter Yield	Canopy_Temp2		
7	Canopy_Temp3			
8	Nplant_SpecificRootLength			
9	Canopy_Temp2			

بنابراین، می‌توان این ویژگی‌ها را مهم‌ترین متغیرهای شکل‌دهنده عملکرد دانه ذرت دانست. عمده ویژگی‌های تشخیص داده‌شده نشان‌دهنده اهمیت تعامل بین کلونیزاسیون ریشه و سیستم فتوسنتزی بود که با مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد. تشخیص دو برهم‌کنش مجذور درصد کلونیزاسیون ریشه و طول ویژه ریشه، و درصد کلونیزاسیون ریشه و عملکرد ماده خشک توسط الگوریتم‌های ترنسفورمر و اس وی آر، می‌تواند نشان‌دهنده توانایی این دو الگوریتم در کشف اثرات پنهان کاربرد کودهای بیولوژیک بر عملکرد دانه ذرت باشد. در مطالعه‌ای مشخص شد که TempMax به‌عنوان پنجمین ویژگی مهم در پیش‌بینی عملکرد گندم زمستانه با استفاده از مقدار SHAP شناسایی شده است (Srivastava et al., 2022). گزارش شده است که تحلیل SHAP نشان داد که مقادیر بالای ویژگی‌های تعداد روزهای رشد و میانگین سطح برگ گیاه تأثیر منفی بر پیش‌بینی عناصر غذایی داشته‌اند، درحالی‌که مقادیر بالای تعداد برگ‌ها و ارتفاع گیاه اثر مثبتی بر پیش‌بینی عناصر غذایی داشته‌اند (Abekoon et al., 2025).

۱- نمودارهای شیب دسیژن پلات برای نمونه‌های تست توسط چهار مدل برتر در شکل ۷ نشان داده شده

است. محور عمودی، ترتیب ویژگی‌ها به ترتیب تأثیرگذاری روی تصمیم مدل را نشان می‌دهد (یعنی برای هر نمونه، مدل چه‌طور برای خروجی نهایی تصمیم گرفته است). محور افقی، خروجی مدل (پیش‌بینی عملکرد دانه) را نشان می‌دهد. خطوط رنگی (هر خط نشان‌دهنده یک نمونه است) نشان‌دهنده تغییر مقدار خروجی مدل برای نمونه‌های مختلف بر اثر ورود تدریجی هر ویژگی است. به عبارت دیگر، خط از بالا (ویژگی اول) شروع می‌شود و در هر مرحله، ویژگی بعدی باعث بالا رفتن یا پایین رفتن مقدار خروجی مدل می‌شود. در پایان (پایین‌ترین نقطه)، خروجی نهایی مدل برای آن نمونه مشخص شده است. رنگ خطوط، آبی نشان‌دهنده خروجی پایین‌تر، و قرمز نشان‌دهنده خروجی بالاتر است. تحلیل ویژگی‌ها از بالا به پایین صورت می‌گیرد و تحلیل خروجی، از چپ به راست تا برسد به خط پایه که پیش‌بینی نهایی است. به‌طور کلی، تحلیل تصمیم مدل، براساس ترتیب ویژگی‌ها (از بالا به پایین) و اثر نهایی هر ویژگی روی پیش‌بینی (از چپ به راست) انجام می‌شود.

باعث افزایش خروجی (رنگ قرمز)، و برای برخی سبب کاهش خروجی شده است. این بدان معنی است که بسته به مقدار آن، عملکرد این ویژگی متغیر خواهد بود. اثر متقابل ارتفاع بوته و تعداد بلال، در اکثر موارد باعث افزایش خروجی شده که نشان‌دهنده اثر مثبت و مستقیم آن بر رشد گیاه است. درصد نیتروژن خاک و درصد فسفر گیاه، اثر متعادل دارند، زیرا نمودار خطوط در این سطوح زیاد جابه‌جا نشدند (خط‌ها صاف‌تر شدند). اثرات متقابل عملکرد ماده خشک و طول مخصوص ریشه و درصد کلونیزاسیون ریشه، به‌میزان قابل توجهی خروجی را تحت تأثیر قرار دادند و سبب افزایش آن شده‌اند. همین مطلب در مورد اثر متقابل مجذور طول مخصوص ریشه و عملکرد ماده خشک نیز صادق است. دمای تاج‌پوشش یک (در مرحله خروج برگ پرچم)، آخرین ویژگی است و اثر خنثی دارد، زیرا خط‌ها در این قسمت تغییر چندانی ندارند. در مجموع می‌توان گفت که مدل ترنسفورمر مقدار عملکرد دانه ذرت را با ویژگی‌های ریشه، سیستم فتوسنتزی و عملکرد ماده خشک انجام می‌دهد.

از شرح مفصل نتایج نمودارهای تصمیم مدل‌های ای ان ان و اس وی آر صرف نظر شده و تنها به سازوکار نهایی آن‌ها در پیش‌بینی اشاره می‌شود (به سبب محدودیت برای تعداد صفحات مقاله). الگوریتم ای ان ان (شکل ۷ C) به‌وضوح نشان می‌دهد که با ترکیب ویژگی‌هایی شامل دمای تاج‌پوشش و خصوصیات فیزیولوژیکی برگ (نسبت فلورسانس کلروفیل متغیر به بیشینه دو؛ در مرحله کاکل‌دهی) و نیز ویژگی‌های ساختاری شامل قطر بلال می‌تواند پیش‌بینی نهایی را بالا یا پایین ببرد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ای ان ان، عملکرد دانه ذرت را با ویژگی‌های مرتبط با تنش (فیزیولوژیک) پیش‌بینی می‌کند.

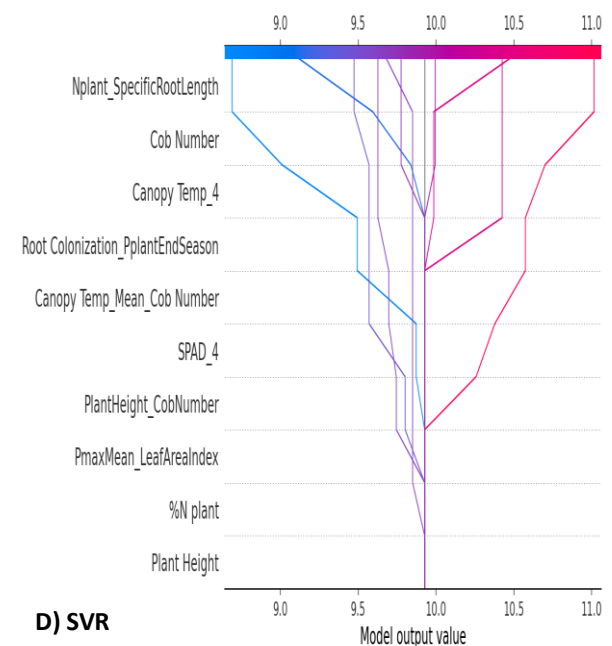
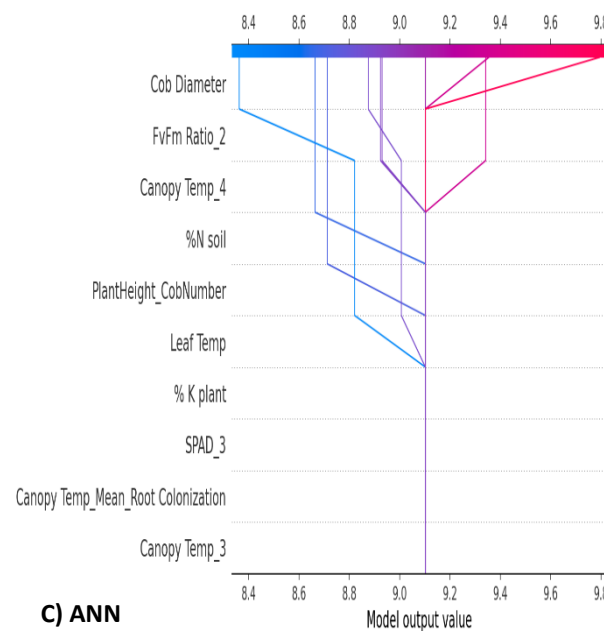
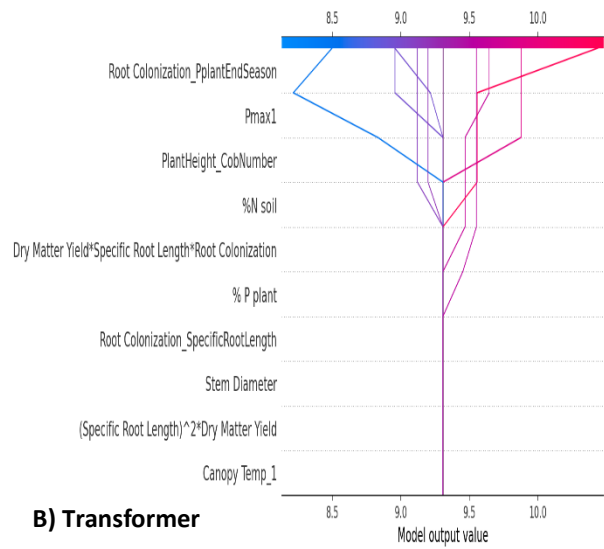
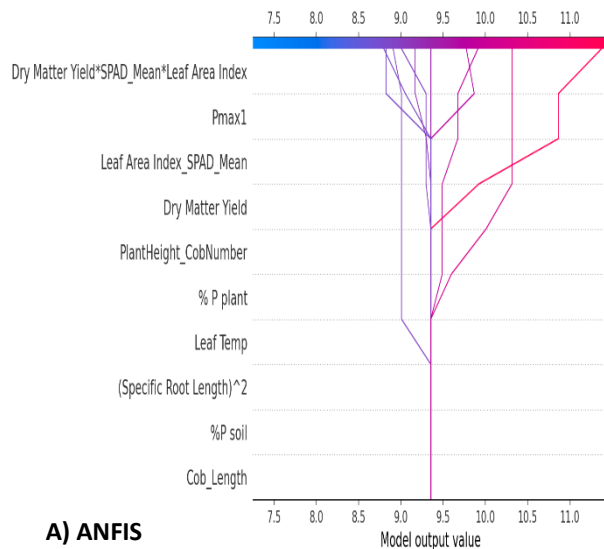
نمودار مسیر الگوریتم اس وی آر (شکل ۷ D) نشان می‌دهد که تعداد بلال، دمای تاج‌پوشش چهار (در مرحله پر شدن دانه) و اثر متقابل کلونیزاسیون ریشه و محتوای فسفر گیاه در انتهای فصل رشد سبب افزایش پیش‌بینی شدند. این الگوریتم نیز همانند ترنسفورمر بر تأثیر برهم‌کنش میزان کلونیزاسیون ریشه و محتوای فسفر گیاه در انتهای فصل رشد، بر عملکرد دانه تأکید نمود. همچنین هر دو الگوریتم، طول ویژه ریشه (همانند درصد

در مدل آنفیس (شکل ۷ A)، اثر متقابل عملکرد ماده خشک و میانگین قرائت اسپد و شاخص سطح برگ، مهم‌ترین اثر تعاملی بوده و باعث افزایش شدید عملکرد دانه شده است (خط رنگی از سمت چپ (حدود ۹) به بالای محور (حدود ۱۱) می‌رسد). دومین ویژگی، فتوسنتز ماکسیمم یک، است که تأثیر مثبت ملایم روی مقدار خروجی دارد، اما نسبت به اولی، اثرش کمتر بوده و نمودار آن در حوالی خروجی ۹/۵ متمرکز شده است. ویژگی سوم، اثر متقابل شاخص سطح برگ و قرائت اسپد میانگین است، که اثر آن مثبت و متوسط است. ویژگی چهارم، عملکرد ماده خشک است که همانند ویژگی سوم، اثر مثبت ملایمی دارد. ویژگی پنجم، اثر متقابل ارتفاع بوته و تعداد بلال است که اثر مثبت بر عملکرد دانه داشته و سبب افزایش آن شده است. ویژگی‌های ششم (درصد فسفر گیاه) و هفتم (دمای برگ) تأثیر متوسط (متعادل) بر عملکرد دانه دارند. ویژگی هشتم، مجذور طول مخصوص ریشه است که اثر آن تقریباً خنثی بود. ویژگی نهم (درصد فسفر خاک) و دهم (طول بلال) در انتهای لیست یعنی با کمترین اهمیت نسبی یا اثر ضعیف بر عملکرد دانه واقع شده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت که در مدل آنفیس، ترکیب شاخص سطح برگ، قرائت اسپد و عملکرد ماده خشک، مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده عملکرد دانه تشخیص داده شده است. ویژگی‌های منفرد مثل فتوسنتز ماکزیمم یک و عملکرد ماده خشک، اثر متقابل شاخص سطح برگ و قرائت اسپد و همچنین اثر متقابل ارتفاع بوته و تعداد بلال، اثر افزایشی بر عملکرد دانه دارند. با در نظر گرفتن مسیر این ویژگی‌ها، می‌توان گفت که مدل آنفیس براساس ویژگی‌های فیزیولوژیکی (سرعت فتوسنتز ماکزیمم و قرائت اسپد) و مورفولوژیک (شاخص سطح برگ و ارتفاع بوته) پیش‌بینی می‌کند.

در مدل ترنسفورمر (شکل ۷ B)، اثر متقابل درصد کلونیزاسیون ریشه و محتوای فسفر گیاه در انتهای فصل رشد، اولین و مهم‌ترین ویژگی است، و برای بیشتر نمونه‌ها، اثر منفی دارد (خطوط آبی به چپ حرکت کرده‌اند). کاهش خروجی، اگرچه برای برخی نمونه‌ها، اثر خنثی یا مثبت هم دیده می‌شود (رنگ به بنفش یا قرمز نزدیک شده). نرخ فتوسنتز ماکزیمم یک، اثر دوگانه دارد، به این صورت که برای برخی نمونه‌ها

(Khosro et al., 2024) را به عنوان ویژگی مهم و تأثیرگذار بر پیش بینی عملکرد دانه تشخیص دادند.

کلونیزاسیون ریشه) که نتیجه مستقیم کاربرد کودهای زیستی است (Bao et al., 2022; Brar et al., 2024;



شکل ۷- نمودارهای شیب دسیژن پلات برای نمونه‌های تست توسط چهار الگوریتم برتر (شرح کامل متغیرها در جدول ۱ آورده شده است)

Figure 7- SHAP Decision Plots for test samples by the four best algorithms (Full descriptions of variables shown in table 1)

A: آنفیس، B: ترنسفورمر، C: ای ان ان، D: اس وی آر
A: ANFIS, B: Transformer, C: ANN, D: SVR

در شرایط خاص مثلاً در مراحل پُر شدن دانه که مصادف با روزهای گرم تابستان است، از نظر فیزیولوژیکی قابل توجه باشد. با این حال، این رابطه ممکن است ناشی از وابستگی غیرمستقیم متغیر با صفات دیگر باشد و باید با احتیاط تفسیر شود.

گزارش شده است که الگوریتم CNN-RNN برای پیش‌بینی عملکرد محصول سه ویژگی برجسته دارد که آن را به روشی بالقوه مفید برای مطالعات دیگر پیش‌بینی عملکرد محصول تبدیل می‌کند. ۱- الگوریتم CNN-RNN برای ضبط وابستگی‌های زمانی عوامل محیطی و بهبود ژنتیکی بذرها در طول زمان بدون نیاز به اطلاعات ژنوتیپ طراحی شده بود. ۲- مدل توانایی تعمیم پیش‌بینی عملکرد به محیط‌های آزمایش نشده را بدون کاهش قابل توجه دقت پیش‌بینی نشان داد. ۳- همراه با روش بک‌پروپگیشن، مدل توانست نشان دهد که شرایط آب‌وهوایی، دقت پیش‌بینی آب‌وهوا، شرایط خاک و روش‌های مدیریت تا چه حد قادر به توضیح تغییرات در عملکرد محصولات هستند (Khaki et al., 2020).

۱- نمودار فورس پالات برای مدل لایت جی بی ام

به عنوان نمونه، با هدف نمایش ساختار این نوع نمودارها آورده شده است (این مدل عملکرد نسبتاً ضعیفی با $R^2=0.385$ دارد) (شکل ۹). این نمودار برای یک نمونه منفرد نشان می‌دهد که مدل از چه مقداری (مقدار پایه^۴) شروع کرده و هر ویژگی چه طور روی خروجی نهایی اثر گذاشته و باعث افزایش یا کاهش خروجی شده است (شکل ۹). محور افقی نشان‌دهنده مقدار پیش‌بینی نهایی مدل است (در اینجا حدوداً ۱۴/۸ در انتهای نمودار). مقدار پایه حدود ۵/۳ است. رنگ آبی برای ویژگی‌هایی است که باعث افزایش مقدار پیش‌بینی شده‌اند و هرچه پیکان آبی کشیده‌تر باشد، سهم آن ویژگی در افزایش خروجی بیشتر است. رنگ قرمز برای ویژگی‌هایی است که باعث کاهش مقدار پیش‌بینی شده‌اند. در شکل ۹ سمت چپ نمودار (قرمزها) اثر منفی دارند، و خیلی کوچک هستند. برهم‌کنش شاخص سطح برگ و عملکرد ماده خشک، بزرگ‌ترین اثر مثبت را روی خروجی مدل دارد (Leaf Area Index_Dry Matter Yield = 280.047)، به عبارت دیگر، مقدار بالای این ویژگی باعث افزایش چشمگیر عملکرد دانه (خروجی مدل) شده است. میانگین نرخ فتوسنتز بیشینه اثر افزایشی قوی دارد (PmaxMean = 4.5) که نشان‌دهنده اهمیت آن برای مدل می‌باشد. طول بلال زیاد باعث تقویت خروجی مدل شده است

۳- نمودارهای وابستگی جزئی^۱ چهار ویژگی منتخب از ۱۰

ویژگی برتر تشخیص داده‌شده توسط مدل اس وی آر در شکل ۸ نشان داده شده است (ده ویژگی برتر در جدول ۵ خلاصه شده‌اند). این نمودارها کمک می‌کنند به فهم اینکه یک ویژگی خاص چگونه به تنهایی (به صورت میانگین گرفته‌شده روی تمام نمونه‌ها) بر خروجی یک مدل یادگیری ماشین تأثیر می‌گذارد. محور افقی مقدار نرمال شده^۲ ویژگی مورد نظر را نشان می‌دهد و محور عمودی وابستگی جزئی که نشان‌دهنده اثر مستقیم این ویژگی بر خروجی مدل است، را بدون اثر سایر متغیرها نشان می‌دهد. خطوط عمودی کوتاه^۳ توزیع داده‌های واقعی در آن ویژگی را نشان می‌دهند.

همان گونه که در شکل ۸ا مشاهده می‌شود، با افزایش ویژگی برهم‌کنشی درصد نیتروژن گیاه و طول ویژه ریشه، مقدار عملکرد دانه نیز به طور صعودی و غیرخطی افزایش می‌یابد که این موضوع نشان‌دهنده اهمیت تغذیه نیتروژنی گیاه و تأثیر متقابل آن بر توسعه سیستم ریشه می‌باشد. نمودار ۸B نشان می‌دهد که برهم‌کنش درصد کلونیزاسیون ریشه و محتوای فسفر گیاه در انتهای فصل رشد، مقدار عملکرد دانه را به صورت تصاعدی و غیرخطی افزایش می‌دهد که این موضوع تأییدی بر نقش مثبت همزیستی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در بهبود کلی رشد و نمو و عملکرد دانه ذرت می‌باشد (Bao et al., 2022; Brar et al., 2024; Khoso et al., 2024).

همان طور که در نمودار مشخص است، میزان اثر در مقادیر بالاتر محسوس‌تر است. نمودار ۸C رابطه صعودی و غیرخطی برهم‌کنش میانگین نرخ فتوسنتز بیشینه و شاخص سطح برگ و عملکرد دانه را نشان می‌دهد. شیب خط در ابتدا کم و به تدریج تندتر می‌شود؛ به ویژه از مقدار نرمال شده حدود ۰/۵ به بعد شتاب افزایش عملکرد دانه زیاد می‌شود. بیشتر مشاهدات واقعی در نواحی بین ۱- تا ۱ قرار دارند، این به این معنی است که اکثر گیاهان در مجموعه داده دارای این ویژگی در محدوده نسبتاً متوسط هستند. تأثیر این ویژگی بر عملکرد دانه در مقادیر بالاتر، شدیدتر می‌شود. به عبارت دیگر، حتی افزایش‌های کوچک در این ویژگی می‌تواند در دامنه بالا تأثیر زیادی بر عملکرد دانه داشته باشد، که این موضوع از نظر فیزیولوژیکی کاملاً منطقی به نظر می‌رسد (Taiz et al., 2018). نمودار ۸D، رابطه برهم‌کنش میانگین دمای تاج‌پوشش و تعداد بلال بر عملکرد دانه ذرت را نشان می‌دهد که رابطه‌ای است صعودی و غیرخطی. تأثیر مستقیم افزایش دمای تاج‌پوشش بر عملکرد دانه ممکن است

1- Partial Dependence

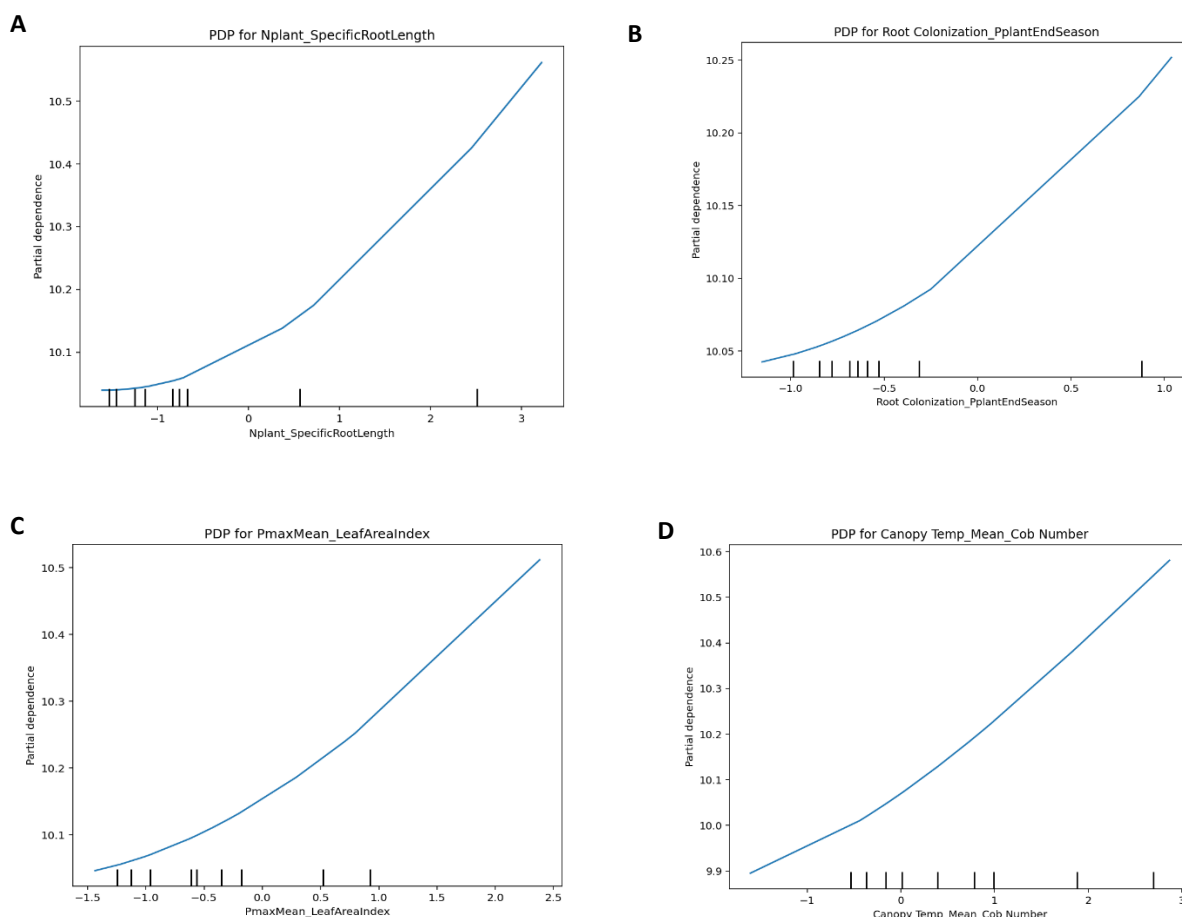
2- Z-score

3- Tick marks

4- Base value

متغیر آموخته باشد، مثل همبستگی غیرخطی) (Canopy Temp_4 = 40.8). به طور کلی، مدل از مقدار پایه ۵/۳ تن در هکتار عملکرد دانه شروع کرده و با تأثیر مثبت متغیرهای کلیدی (مثل عملکرد ماده خشک، شاخص سطح برگ، طول بلال و شدت فتوسنتز بیشینه)، خروجی را به مقدار نهایی حدود ۱۴/۸ تن در هکتار عملکرد دانه رسانده است و ویژگی‌های با اثر منفی، اندک و کم‌اثر بوده‌اند.

(Cob Length = 12.8). عدد بالای مربوط به برهم‌کنش ارتفاع گیاه و تعداد بلال اثر افزایشی بر عملکرد دانه داشت (PlantHeight_CobNumber = 11603.3). برهم‌کنش شاخص سطح برگ $\times$ میانگین SPAD نیز اثر مثبتی بر خروجی مدل گذاشته است (Leaf Area Index_SPAD_Mean = 108.45). دمای بالای پوشش گیاهی در مرحله پُر شدن دانه اثر مثبت دارد (این کمی نامعمول است و ممکن است مدل رفتار خاصی را از این



شکل ۸- نمودارهای وابستگی جزئی (A) اثر متقابل درصد نیتروژن گیاه و طول مخصوص ریشه، (B) اثر متقابل درصد کلونی‌زاسیون ریشه و درصد فسفر گیاه در انتهای فصل رشد، (C) اثر متقابل میانگین دمای تاج‌پوشش و تعداد بلال ذرت حاصل الگوریتم اس وی آر

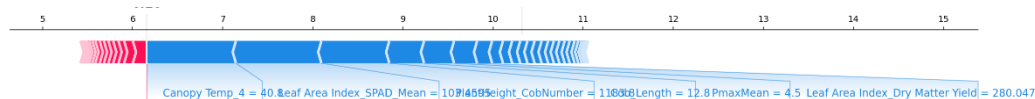
Figure 8- Partial dependence plots: A) Interaction of plant nitrogen percentage and specific root length, B) Interaction of root colonization percentage and plant phosphorus content at the end of the growing season, C) Interaction of mean maximum photosynthesis rate and leaf area index, D) Interaction of mean canopy temperature and cob number from the SVR algorithm

برای تفسیر خروجی‌های مدل پیشنهادی CNN استفاده شده که بیش‌های کلیدی در توضیح نتایج پیش‌بینی عملکرد (اهمیت

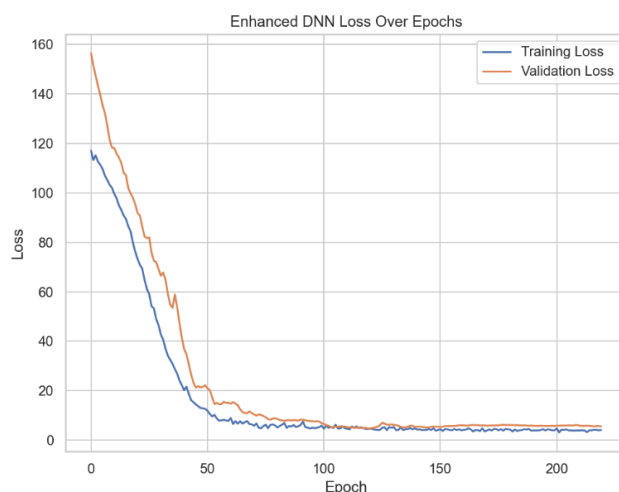
سیرواستاوا و همکاران (Srivastava et al., 2022) پیشنهاد کردند که فراتر از پیش‌بینی، از نمودارهای SHAP و فورس پلات

به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌هایی که بر خروجی مدل در تکنیک توصیه محصول در کشاورزی هوشمند تأثیر دارند، شناسایی شده‌اند (Abekoon et al., 2025).

متغیرها برحسب زمان ارائه داد. آن‌ها DUL، سرعت باد در هفته دهم، و مقدار تابش در هفته هفتم را به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌ها در پیش‌بینی عملکرد گندم زمستانه یافتند. گزارش شده است که رطوبت، فسفر (P)، پتاسیم (K)، دما، بارندگی، نیتروژن (N)، و pH



شکل ۹- نمودار فورس پلات تولی شده توسط مدل لایت جی بی ام (شرح کامل متغیرها در جدول ۱ آورده شده است)
Figure 9- Force plot generated by the LightGBM model (Full descriptions of variables shown in table 1)



شکل ۱۰- نمودار زیان در هر اپوک مدل شبکه عصبی عمیق ارتقاء یافته
Figure 10- Loss per epoch plot for the enhanced deep neural network model

هم‌گرایی زیان آموزش و اعتبارسنجی می‌باشد که تأکیدی بر یادگیری مؤثر توسط الگوریتم است.

نتیجه‌گیری

یافته‌ها: آنفیس و ترنسفورمر به‌ترتیب با ضریب تبیین برابر با ۰/۵۴۴ و ۰/۵۴۵ و جذر میانگین مربعات خطا ۲/۸۳۹ و ۲/۸۳۴ به‌دلیل به‌کارگیری سازوکار ترکیبی TensorFlow (در آنفیس) و Attention (در ترنسفورمر) و همچنین استفاده از بهینه‌ساز Adam در هر دو الگوریتم، تعاملات پیچیده را به‌خوبی مدل‌سازی کردند و به‌عنوان برترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت شناخته شدند. در رتبه بعدی، الگوریتم‌های آن‌ان قرار گرفت که با معماری سه لایه، فعال‌ساز ReLU و استفاده از بهینه‌ساز GriedSearch با تعیین اعتبار متقابل، روابط غیرخطی را

نمودار زیان در هر اپوک

اپوک^۱ یک دوره کامل از پردازش تمام داده‌های آموزشی توسط مدل در فرآیند یادگیری ماشین است. نمودار زیان در هر اپوک^۲ نشان‌دهنده میزان خطای مدل در طول فرآیند یادگیری در هر دوره یا اپوک است. با افزایش تعداد اپوک‌ها، معمولاً مقدار زیان کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل است، مگر اینکه مدل بیش از حد به داده‌های آموزشی وابسته شود (اصطلاحاً اُورفیتینگ یا بیش‌برازش رخ دهد). این نمودار برای ارزیابی و تنظیم فرآیند یادگیری ماشین استفاده می‌شود. نمودار زیان در هر اپوک مدل شبکه عصبی عمیق ارتقاء یافته در شکل ۱۰ نشان داده شده است. انطباق بسیار نزدیک دو نمودار به‌ویژه از اپوک ۱۰۰ به بعد حاکی از

1- Epoch
2- Loss per Epoch

محدودیت‌ها: محدودیت‌هایی مثل اندازه نسبتاً کوچک مجموعه داده‌ها و تمرکز روی یک منطقه خاص وجود دارد که در تحقیقات آینده می‌تواند برطرف شود، با این حال، در تفسیر نتایج برای آزمایش‌هایی با داده‌های کمتر، جانب احتیاط باید رعایت شود. نتایج این مطالعه می‌تواند زمینه‌های لازم برای مدیریت زراعی مؤثر در جهت افزایش کارایی نهاده‌ها و سازگاری با شرایط تنش و تغییرات اقلیمی در تولید ذرت دانه‌ای را فراهم آورد.

توصیه‌ها: استفاده از RF برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم کشاورزی و ادغام داده‌های ماهواره‌ای برای پوشش مکانی بهتر، می‌تواند دقت و کارایی مدل‌ها را افزایش دهد.

به‌خوبی مدل‌سازی کرد و عملکردی بسیار نزدیک به آنفیس و ترنسفورمر از خود نشان داد ($R^2 = 0.518$). ویژگی‌های دمای تاج‌پوشش در مرحله پُر شدن دانه، محتوای نیتروژن گیاه و طول ویژه ریشه، شاخص سطح برگ و عدد اسپد، ارتفاع بوته و تعداد بلال و اثر ساده دمای تاج‌پوشش در مرحله کاکل‌دهی به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای شکل‌دهنده عملکرد دانه ذرت، توسط چهار الگوریتم برتر تشخیص داده شد. عمده ویژگی‌های تشخیص داده‌شده نشان‌دهنده اهمیت تعامل بین کولونیزاسیون ریشه و سیستم فتوسنتزی بود که با مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد. این الگوریتم‌ها نشان دادند که با یادگیری الگوهای پنهان در داده‌ها، می‌توانند روابط اکوفیزیولوژیکی دخیل در شکل‌گیری عملکرد دانه ذرت را مشخص کرده و پیش‌بینی دقیق‌تر آن را ممکن سازند.

References

1. Abekoon, T., Sajindra, H., Rathnayake, N., Ekanayake, I., Jayakody, A. (2025). A novel application with explainable machine learning (SHAP and LIME) to predict soil N, P, and K nutrient content in cabbage cultivation. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100879. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100879>
2. Bao, X., Zou, J., Zhang, B., Wu, L., Yang, T., & Huang, Q. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi and microbes interaction in rice mycorrhizosphere. *Agronomy*, 12(6), 1277. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061277>
3. Bhupenchandra, I., Chongtham, S. K., Devi, A. G., & Dutta, P. (2024). Unlocking the potential of arbuscular mycorrhizal fungi: exploring role in plant growth promotion, nutrient uptake mechanisms, biotic stress alleviation, and sustaining agricultural production systems. *Journal of Plant Growth Regulation*. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11467-9>
4. Bracho-Mujica, G., Rötter, R. P., Haakana, M., Palosuo, T., Fronzek, S., Asseng, S., Yi, C., Gaiser, T., Kassie, B., Paff, K., Eyshi Rezaei, E., Rodriguez, A., Ruiz-Ramos, M., Srivastava, A. K., Stratonovich, P., Tao, F., & Semenov, M. A. (2024). Effects of changes in climatic means, variability, and agro-technologies on future wheat and maize yields at 10 sites across the globe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 346, 109887. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109887>
5. Brar, B., Bala, K., Saharan, B. S., Kumar Sadh, P., & Duhan, J. S. (2024). Bio-boosting agriculture: Harnessing the potential of fungi-bacteria-plant synergies for crop improvement. *Discover Plants*, 1, 21. <https://doi.org/10.1007/s44372-024-00023-0>
6. Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd Ed. New York: Routledge.
7. Fashoto, S., Mbunge, E., Opeyemi, O. G., & Van Den Burg, J., (2021). Implementation of machine learning for predicting maize crop yields using multiple linear regression and backward elimination. *Malaysian Journal of Computing*, 6, 679–697.
8. Godfray, H. C. J., Poore, J., & Ritchie, H. (2024). Opportunities to produce food from substantially less land. *BMC Biology*, 22,138. <https://doi.org/10.1186/s12915-024-01936-8>
9. Khaki, S., Wang, A., & Archontoulis, A. V. (2020). A CNN-RNN Framework for Crop Yield Prediction. *Front. Plant Sci. Sec. Computational Genomics*, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01750>
10. Khoso, M. A., Wagan, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., Poudel, T. R., Manghwar, H., & Liu, F. (2024). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective. *Plant Stress*, 11, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100341>.
11. Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied Predictive Modeling*. Springer Science & Business Media, 600 p. ISBN: 978-1-4614-6848-6. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
12. Mitra, D., Panneerselvam, P., Senapati, A., Chidambaranathan, P., Nayak, A. K., & Mohapatra, P. K. D. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi response on soil phosphorus utilization and enzymes activities in aerobic rice under phosphorus-deficient conditions. *Life (Basel)*. 30,3(5), 1118. <https://doi.org/10.3390/life13051118>
13. Moore, D. S., Notz, W. I., & Flinger, M. A. (2013). *The Basic Practice of Statistics* (6th ed.). New York, NY: W. H. Freeman and Company. 138 p.
14. Nayak, H. S., Silva, J. V., Parihar, C. M., Krupnik, T. J., Sena, D. R., Kakraliya, S. K., Jat, H. S., Sidhu, H. S., Sharma, P. C., Jat, M. L., Sapkota, T. B. (2022). Interpretable machine learning methods to explain on-farm yield variability of high productivity wheat in Northwest India. *Field Crops Research*, 287, 108640. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108640>

15. Pentos, K., Mbah, J. T., Pieczarka, K., Niedbała, G., & Wojciechowski, T. (2022). Evaluation of multiple linear regression and machine learning approaches to predict soil compaction and shear stress based on electrical parameters. *Applied Sciences*, 12(17), 8791. <https://doi.org/10.3390/app12178791>
16. Salvador, G. L. O., Araj, F. F., Pereira, A. P. A., Bonofacio, A., & Araujo, A. S. F. (2022). Rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus presented distinct and specific effects on soybean growth when inoculated with organic compost. *Rhizosphere*, 22, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100513>
17. Srivastava, A. K., Safaei, N., Khaki, S., Lopez, G., Zeng, W., Ewert, F., Gaiser, T., & Rahimi, J. (2022). Winter wheat yield prediction using convolutional neural networks from environmental and phenological data. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06249-w>
18. Taiz, L., Moller, I. M., Murphy, A., & Peer, W.A. (2018). *Fundamentals of Plant Physiology*. New York, USA: Oxford University. Press. ISBN 978160535790
19. Wang, Y., Zhang, Q., Yu, F., Zhang, N., Zhang, X., Li, Y., Wang, M., & Zhang, J. (2024). Progress in research on deep learning-based crop yield prediction. *Agronomy*, 14(10), 2264. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102264>
20. Xie, X., Wu, T., Zhu, M., Jiang, G., Xu, Y., Wang, X., & Pu, L. (2021). Comparison of random forest and multiple linear regression models for estimation of soil extracellular enzyme activities in agricultural reclaimed coastal saline land. *Ecological Indicators*, 120, 106925. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106925>



Research Article

Vol. 24, No. 2, Summer 2026, p. 233-247

Evaluation of Yield and Agronomic Traits of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Cultivars and Advanced Lines under Salinity Stress in the Sistan RegionA. Ghasemi^{1*}, M. R. Naroui Rad¹, M. Mohamadghasemi¹, H. Siasar²

1- Horticultural Crops Research Department, Sistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zabol, Iran

2- Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

(*- Corresponding author's Email: a.ghasemi@areeo.ac.ir)

Received: 13 July 2025

Revised: 07 September 2025

Accepted: 14 September 2025

Available Online: 30 September 2025

How to cite this article:Ghasemi, A., Naroui Rad, M. R., Mohamadghasemi, M., & Siasar, H. (2026). Evaluation of yield and agronomic traits of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) cultivars and advanced lines under salinity stress in the Sistan region. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 233-247. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94396.1413>**Introduction**

Biotic and abiotic stresses are among the most significant factors reducing productivity in arid and semi-arid regions, where water is the primary limiting factor for plant growth. Sorghum possesses several advantageous physiological characteristics including drought and salinity tolerance, higher water-use efficiency compared to other forage crops, relatively high yield, desirable forage quality, and suitability for storage as both dry fodder and silage which make it particularly valuable in these environments. Strategies to utilize saline water effectively include selecting salt-tolerant cultivars, applying saline water during growth stages of lower sensitivity, and blending saline and non-saline water to reduce overall salinity. Although sorghum exhibits relative tolerance to soil and irrigation-water salinity, leaf-area expansion, carbon assimilation, stem elongation, and dry-matter accumulation are significantly constrained under high salinity.

Materials and Methods

This experiment was conducted over two growing seasons (2019–2020 and 2020–2021) at the Zahak Agricultural Research Station (Sistan, Iran), using a split-plot arrangement in a randomized complete block design with three replications. Main-plot treatments were three irrigation-water salinity levels: non-saline (2–3 dS m⁻¹, control), moderate (4–6 dS m⁻¹), and severe (6–8 dS m⁻¹). Sub-plot treatments comprised six promising forage sorghum genotypes (Pegah, Mansour, Speedfeed, KFS15, KFS16, and KFS17). Based on soil test recommendations, ammonium phosphate (250 kg ha⁻¹) and urea (100 kg ha⁻¹) were applied at planting; an additional 100 kg ha⁻¹ urea was top-dressed when plants reached 35–40 cm in height. Sowing occurred on 15 March each year. Each sub-plot consisted of six 5-meter-long rows with 50 cm spacing between rows and 6 cm spacing between plants. At the panicle emergence stage, after removing the two border rows and 0.5 m from both ends of each plot, samples were harvested from an area of approximately 8 m². Recorded traits included days to flowering, plant height, tiller number, stem diameter, leaf number, leaf area, fresh and dry forage yields.

Results and Discussion

The combined analysis of variance revealed that plant height, stem diameter, tiller number, leaf number, leaf area, protein content, fresh forage yield, and dry forage yield were significantly affected ($p \leq 0.01$) by salinity, genotype, and their interaction. Under non-saline conditions (2–3 dS m⁻¹), 'Mansour' produced the highest fresh forage yield (146.94 t ha⁻¹), leaf area (261 cm²), and protein content (15.03%). The Speedfeed cultivar under normal irrigation ranked second with a protein content of 14.75%, following Mansour. The lowest protein

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.2025.94396.1413>

content was observed in lines KFS17 and KFS16, with means of 11.70% and 11.85%, respectively, under high-salinity irrigation. Protein content declined in all genotypes with increasing salinity; 'Mansour' exhibited the greatest reduction (23.7%). Under severe salinity (6–8 dS m⁻¹), 'Pegah' maintained superior plant height, stem diameter, tiller and leaf numbers, and achieved higher fresh forage yield (72.01 t ha⁻¹) and dry forage yield (21.30 t ha⁻¹) yields than the other entries. Fresh forage yields decreased significantly across all genotypes as salinity rose ($p \leq 0.01$); the lowest fresh yield (38.96 t ha⁻¹) was recorded in KFS15 under severe salinity. The highest dry forage yields under non-saline irrigation were obtained by 'Mansour' (38.71 t ha⁻¹) and KFS17 (38.40 t ha⁻¹), whereas the lowest dry forage yield (22.33 t ha⁻¹) occurred in KFS16 at 6–8 dS m⁻¹.

Conclusion

The study demonstrated significant genotypic differences in the response of forage sorghum to irrigation water salinity. Although all measured traits declined with increasing salinity, 'Mansour' performed best under non-saline conditions, whereas 'Pegah' exhibited greater tolerance under moderate and high salinity by maintaining higher biomass production and crude protein content. These findings suggest that selecting genotypes based on their salinity tolerance can optimize forage yield and quality in salt-affected environments. Given the increasing salinity of irrigation water in the Sistan region, the cultivation of 'Pegah' represents a practical and resilient strategy for sustaining forage production and supporting local livestock systems.

Keywords: Dry forage, Fresh forage, Leaf number, Protein content, Plant height

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۴۷-۲۳۳

ارزیابی عملکرد و خصوصیات زراعی ارقام و لاین‌های پیشرفته سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.)

تحت تنش شوری در منطقه سیستان

احمد قاسمی^{۱*}، محمدرضا نارویی راد^۱، محمود محمدقاسمی^۱، هادی سیاسر^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

چکیده

با توجه به توقف ورود آب به رودخانه هیرمند و افزایش شوری آب چاه‌های سطحی در منطقه سیستان، نیاز به گزینش و کشت ژنوتیپ‌های متحمل به شوری ضرورت دارد. به منظور بررسی تأثیر تنش شوری بر عملکرد و صفات ریخت‌شناسی ارقام و لاین‌های جدید سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.)، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی زهک انجام شد. در این آزمایش، شوری آب آبیاری در سه سطح (شامل شاهد و شوری متوسط و شدید به ترتیب با هدایت‌های الکتریکی ۳-۲، ۶-۴ و ۸-۶ دسی‌زیمنس بر متر) به عنوان عامل اصلی و شش ژنوتیپ سورگوم علوفه‌ای (ارقام پگاه، اسپیدفید و منصور و لاین‌های KFS15، KFS16 و KFS17) به عنوان عامل فرعی مورد بررسی قرار گرفتند. اثر برهم‌کنش شوری و ژنوتیپ بر تمام صفات مورد بررسی معنی‌دار بود. بیشترین درصد پروتئین به ترتیب در رقم منصور و اسپیدفید و آبیاری غیرشور با میانگین ۱۵/۰۳ و ۱۴/۷۵ درصد به دست آمد. بیشترین عملکرد علوفه تر و خشک (به ترتیب ۱۴۶/۹۴۳ و ۳۸/۷۱۴ تن در هکتار) در شرایط آبیاری غیرشور و رقم منصور حاصل شد. در سطح شوری شدید رقم پگاه با عملکرد علوفه تر و خشک به ترتیب ۷۲/۰۱۰ و ۲۱/۲۹۷ تن در هکتار نسبت به بقیه ارقام و لاین‌ها برتری داشت. با توجه به نتایج، در شرایط آبیاری غیرشور، رقم منصور و در شرایط آبیاری با آب شور رقم پگاه به عنوان ارقام علوفه‌ای مناسب برای منطقه سیستان قابل توصیه هستند.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع بوته، تعداد برگ، علوفه تر، علوفه خشک، محتوای پروتئین

مقدمه

رتبه پنجم را در جهان دارا می‌باشد (Khodbandeh, 2019). سورگوم با توجه به سیستم فتوسنتزی، نحوه فعالیت روزنه‌ها و سیستم ریشه‌ای خاصی که دارد، قادر است آب را بهتر از سایر گیاهان زراعی جذب نماید و تلفات آب را کاهش دهد (Pourazizi & Fallah, 2010). سطح زیرکشت این گیاه در دنیا در حدود ۴۱ میلیون هکتار بوده (Nurouzi et al., 2022) و حدود ۹۰ درصد آن به سورگوم دانه‌ای اختصاص دارد. بنابراین این گیاه در دنیا به عنوان یک غله مطرح است، ولی با توجه به کمبود علوفه در ایران، نوع علوفه‌ای آن اولویت دارد و سطح زیرکشت آن در ایران ۱۴ هزار هکتار است (Ahmadi et al., 2020). خصوصیات فیزیولوژیکی سورگوم از جمله مقاومت به خشکی، شوری، کارایی مصرف آب بالاتر از سایر گیاهان علوفه‌ای، عملکرد نسبتاً زیاد، کیفیت مطلوب و قابلیت نگهداری آن به صورت علوفه خشک و سیلوشده باعث شده است که این گیاه در مناطق خشک و نیمه خشک از اهمیت خاصی برخوردار باشد (Zerbini & Thomas, 2020).

تنش‌های زنده و غیرزنده از عوامل مهم کاهش تولید در نواحی خشک و نیمه خشک به شمار می‌آیند، به طوری که در این مناطق، آب مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد گیاهان می‌باشد (Seif et al., 2019). سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) گیاهی یک‌ساله، چهار کرپنه و از تیره غلات است که از نظر سطح زیرکشت و میزان تولید پس از گندم، (*Triticum aestivum* L.) برنج، (*Oryza sativa* L.) ذرت (*Zea mays* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.)

۱- بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل، ایران

۲- گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: a.ghasemi@areeo.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94396.1413>

2003). سورگوم گیاهی است که نقش اساسی در تأمین علوفه دام دارد و به علت سازگاری با شرایط نامساعد محیطی می‌تواند در برخی از مناطق کشور که با شوری و خشکی مواجه می‌باشد، تولید خوبی داشته باشد. این گیاه چشم‌انداز مناسبی برای تحت پوشش بردن اراضی شور با استفاده از ارقام متحمل نشان می‌دهد (Yarnia, 2007). با کاربرد منطقی آب شور (۸-۴ دسی‌زیمنس بر متر) به عنوان یک منبع آب آبیاری، ضمن افزایش تولیدات کشاورزی، می‌توان از رقابت موجود برای آب غیرشور کم کرد. بنابراین علی‌رغم اهمیت استفاده از منابع آب شور در کشاورزی، با توجه به آثار و تبعات منفی آب شور بر گیاه و خاک، اتخاذ شیوه‌های مدیریتی صحیح مصرف این منابع به منظور جلوگیری از کاهش معنی‌دار محصول به لحاظ کیفی و کمی ضروری می‌باشد (Piri, 2017). برخی راهکارهای استفاده از آب شور را انتخاب رقم‌های گیاهی متحمل به شوری، استفاده از آب شور در مراحل از رشد که گیاه حساسیت کمتری به شوری از خود نشان می‌دهد، و اختلاط آب شور و غیرشور برای داشتن آب با درصد شوری کمتر اعلام کردند (Bharat & Minhas, 2005). سورگوم نسبت به شوری خاک و آب آبیاری (چهار دسی‌زیمنس بر متر)، به‌ویژه در موقع جوانه‌زنی نسبتاً متحمل است، اما گسترش سطح برگ و جذب کربن، ارتفاع ساقه و تولید ماده خشک آن محدود می‌شود (Velikova et al., 2000). در ارزیابی نهایی لاین‌های امیدبخش سورگوم علوفه‌ای گزارش شد که لاین‌های KDFGS26 و KDFGS4 بالاترین عملکرد علوفه خشک (۲۶/۱۵ و ۲۶/۱۱ تن در هکتار) را داشتند (Khazaei et al., 2018). در خاک‌های شور، سدیم مانع از جذب عناصر ضروری پتاسیم، کلسیم و منیزیم شده و باعث بروز کمبود عناصر ضروری مورد نیاز متابولیسم گیاه می‌شود (Mansour et al., 2005). سورگوم علوفه‌ای در جهان به دو صورت لاین‌های خالص و ارقام هیبرید مورد کشت و کار قرار می‌گیرد. خصوصیات ریخت‌شناختی این گیاه سبب شده است که به‌عنوان شاخص گیاهان زراعی مقاوم به خشکی معرفی می‌شود و از لحاظ درجه‌بندی به تحمل شوری نیز به‌عنوان یک گیاه نیمه متحمل شناخته شده است (Sharifan & Kazemihasanvand, 2015). نتایج پژوهشی نشان داد که تنش شوری باعث کاهش شاخص‌های رویشی در گیاه سورگوم شد (Lacerda et al., 2003). در مطالعه‌ای بیان شد که می‌توان ۲۵ درصد مصرف آب گیاه سورگوم را کاهش داد و با ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و شوری پنج دسی‌زیمنس بر متر آبیاری انجام داد بدون آنکه تأثیر معنی‌داری در میزان علوفه تولید شده داشته باشد (Piri, 2017). در بررسی تأثیر آبیاری سورگوم با آب شور گزارش شد که ارقام IPA-2502 و IPA-1011 دارای بالاترین عملکرد دانه در شوری $EC=6$ دسی‌زیمنس بر متر بودند و ارقام IPA-2564، IPA-2600 و Qualimax حساس‌ترین ارقام به شوری بودند و با ۵۰ درصد کاهش عملکرد مواجه شدند (Miguel et al., 2019). محققان دیگر تأثیر

شوری بر سورگوم را در مرحله جوانه‌زنی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سورگوم رقم KFS2 با بالاترین مقدار جوانه‌زنی در شرایط شور به‌عنوان رقم سورگوم متحمل به شوری معرفی گردید (Tabatabaei & Anagholi, 2012). در بررسی استفاده تلفیقی از آب شور و غیرشور در کشت سورگوم و آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) گزارش شد که تیمار کاربرد یک سوم آب شور در هر دو کشت پس از شاهد کمترین میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع را نسبت به سایر تیمارها داشت (Ghaedi et al., 2015).

در بررسی عملکرد و اجزای عملکرد سورگوم علوفه‌ای در سطوح مختلف آبیاری و سطوح مختلف شوری بیان شد که بین شاهد و تیمارهای شوری اختلاف معنی‌دار مشاهده گردید (Sharifan & Kazemihasanvand, 2015). پژوهشگران در بررسی ارقام و لاین‌های سورگوم علوفه‌ای گزارش دادند که لاین‌های KFS9، KFS4، KFS10 و KFS11 دارای عملکردهای مناسب در شرایط شور و شاخص تحمل به شوری مناسب بودند (Tabatabaei et al., 2010). در مطالعه‌ای بیان شد که تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار ویژگی‌های ارتفاع بوته و سطح برگ گردید. بیشترین وزن خشک علوفه در تمام سطوح شوری متعلق به رقم پگاه بود (Alinia & Kazemini, 2017). در بررسی ارقام سورگوم بومی عربستان (Baish, Jazan, 17.388086, 42, 524070) در شرایط آبیاری با آب شور دریا عنوان شد که ارقام دارای بذره‌های مخلوط رنگ سفید و قرمز به شوری آب تحمل خوبی داشتند و از نظر رشد ریشه و ساقه وضعیت خوبی داشتند، ولی ارقام با رنگ بذر سفید حساس به شوری بودند (Omar, 2014). با توجه به سازگاری سورگوم به شرایط نامساعد محیطی از جمله فقر خاک و تنش‌های خشکی و شوری که از خصوصیات مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله منطقه سیستم می‌باشد، این گیاه می‌تواند از مهم‌ترین محصولات این منطقه برای تغذیه دام به‌خصوص گاو اصیل سیستمی باشد. از آنجاکه نیاز مبرمی برای تهیه ارقام مناسب و سازگار به مناطق جغرافیایی مختلف و اهداف خاص در کشور وجود دارد، برآورد اثر متقابل ژنوتیپ در محیط ضروری است. ارقام با سازگاری وسیع در بیشتر محیط‌ها عملکرد پایدار دارند (Lin & Binns, 1991). با قطع شدن آب ورودی رودخانه هیرمند و شور شدن آب چاه‌های سطحی در منطقه سیستم، لازم است کشاورزان از ارقام سورگوم علوفه‌ای متحمل به شوری کشت کنند.

بنابراین هدف از این پژوهش، مقایسه عملکرد و برخی صفات زراعی ارقام و لاین‌های جدید و پرمحصول سورگوم علوفه‌ای در شرایط آبیاری با آب شور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه طی سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی زهک به صورت کرت‌های یک‌بار خرد شده برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۴۸۳ متر، عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی آن ۶۱ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی است. میانگین بارندگی سالانه ۵۵ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۲۱/۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه ۵۰۰۰ میلی‌متر است. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح شوری آب آبیاری به عنوان عامل اصلی (آب شور با هدایت الکتریکی ۴-۶ و ۸-۶ دسی‌زیمنس بر متر، آب غیرشور با هدایت الکتریکی ۳-۲ دسی‌زیمنس بر متر (شاهد) و شش رقم و لاین امیدبخش سورگوم علوفه‌ای شامل KFS17، KFS15، KFS16، پگاه، منصور و اسپیدفید به عنوان عامل فرعی مورد ارزیابی قرار گرفتند. تهیه آب با ECهای مختلف توسط چاه‌های سطحی داخل ایستگاه و چاه‌های سطحی کشاورزان هم‌جوار ایستگاه که آب چاه آن‌ها شور می‌باشد، صورت گرفت. تنش شوری براساس تیمارهای مربوطه در مخازن جداگانه تهیه و به صورت کنترل شده وارد کرت‌ها شد که تا انتهای فصل رشد ادامه داشت. ابتدا یک سوم استخر با آب غیرشور آب پر شد و پس از آن آب شور تانکر کم کم به استخر اضافه شده و خوب به هم زده می‌شد و به وسیله ECسنج پرتابل اندازه‌گیری می‌گردید. وقتی به EC مد نظر می‌رسید توسط لوله‌های

پلی‌اتیلن به کرت‌ها انتقال داده می‌شد. آب‌گیری از لوله اصلی توسط لوله با قطر ۷۵ میلی‌متری انجام شد و سپس به لوله‌های ۶۳ میلی‌متری منشعب گردید. هر لوله ۶۳ میلی‌متری آب مورد نیاز کرت‌ها را تأمین می‌کرد. ابتدای هر لوله ۶۳ میلی‌متری یک عدد کنتور حجمی و یک شیر فلکه جهت کنترل و اندازه‌گیری حجم آب آبیاری نصب شد. دور آبیاری برای تیمار غیرشور هر ۱۰ روز یک بار و برای تیمار شوری با هدایت الکتریکی ۴-۶ دسی‌زیمنس بر متر هر هشت روز و برای تیمار شوری ۸-۶ دسی‌زیمنس بر متر هر شش روز آبیاری صورت گرفت. آبیاری به صورت کرتی انجام شد. دو آبیاری اول جهت استقرار بوته‌ها با آبیاری غیرشور به فاصله پنج روز یک بار انجام شد و پس از آن آبیاری با تیمارهای شوری مورد نظر اعمال گردید. تا مرحله سه تا پنج برگی که بوته‌ها استقرار آب شور به دلیل داشتن نمک زیاد، می‌تواند به گیاه آسیب برساند، نمک‌ها می‌توانند جذب آب توسط ریشه را دشوار کنند. برای کاهش اثرات مخرب شوری دور آبیاری باید کوتاه‌تر باشد تا غلظت نمک در ناحیه ریشه کاهش یابد. دور آبیاری غیرشور در منطقه هر ۱۰ روز یک بار می‌باشد. برای کاهش اثرات شوری با افزایش غلظت شوری، دور آبیاری دو روز کاهش داده شد. قبل از کاشت، نمونه‌برداری از خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد و برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). عملیات آماده‌سازی بستر بذر شامل شخم، دیسک و تسطیح بود.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1- Physicochemical properties of soil at the experimental site

سال Year	بافت Texture	pH	هدایت الکتریکی EC (d.S.m ⁻¹)	ظرفیت مزرعه‌ای Field capacity (%)	نقطه پژمردگی دائم Wilting point (%)	آهن Fe	مس Cu	روی Zn	پتاسیم K	فسفر P	کربن آلی Organic carbon (%)
۱۳۹۹ 2021	لومی-شنی Sandy- loam	8.2	3.1	13.2	5.2	2.80	0.57	0.28	103	11.6	0.33
۱۴۰۰ 2022	لومی-شنی Sandy- loam	8.2	3.2	12.9	5.6	2.52	0.52	0.23	105	11.3	0.35

ردیف ۵۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف شش سانتی‌متر بود. فاصله کرت‌های اصلی از همدیگر دو متر و فاصله کرت‌های فرعی یک متر و فاصله بلوک‌ها از همدیگر دو متر در نظر گرفته شد. عمق کاشت سه سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای رقم اسپیدفید در مرحله ظهور گل‌آذین و برای ارقام آزاد گرده افشان در ارتفاع دو متر پس از حذف دو ردیف از طرفین هر کرت و ۵/۰ متر از ابتدا و انتهای کرت‌ها از سطحی در حدود هشت مترمربع برداشت و صفات ارتفاع بوته، تعداد

براساس آزمون خاک، کود فسفات آمونیوم به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و کود اوره به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در زمان کاشت و زمانی که ارتفاع بوته‌ها به ۴۰ - ۳۵ سانتی‌متر رسید، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار دیگر کود اوره توزیع شد. بعد از هر چین‌برداری، ۷۵ کیلوگرم در هکتار و در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری نیز ۷۵ کیلوگرم در هکتار کود اوره به گیاه داده شد. تاریخ کاشت در ۱۵ اسفند ماه هر سال صورت گرفت. هر کرت شامل شش خط کاشت به طول پنج متر با فاصله بین

پنجه، قطر ساقه، تعداد برگ، مساحت برگ، عملکرد علوفه تر و خشک اندازه‌گیری شد. یادداشت‌برداری‌ها برای هر کدام از صفات به‌صورت تصادفی بر روی ۱۰ بوته در هر کرت انجام گردید. جهت محاسبه مساحت برگ، طول و پهنای سه برگ انتهایی در عریض-ترین قسمت برگ در ساقه اصلی به‌وسیله خط‌کش اندازه‌گیری و بعد از ضرب کردن طول در عرض در عدد ثابت ۰/۷۵، مساحت برگ برحسب سانتی‌مترمربع و میانگین سه برگ گزارش گردید (Rashedmohassel et al., 1997). محتوای پروتئین خام از طریق اندازه‌گیری نیتروژن کل تعیین شد (Kjeldahl, 1883). بدین منظور، ابتدا مقدار نیتروژن کل موجود در ماده خشک علوفه براساس روش کجلدال اندازه‌گیری گردید و برای تعیین محتوای پروتئین خام، محتوای نیتروژن کل علوفه در عدد ۶/۲۵ ضرب شد. برای تعیین عملکرد علوفه تر کل سطح برداشت و عملکرد علوفه در واحد سطح و هکتار مشخص شد. در هر سال دو بار چین‌برداری انجام شد. جهت تعیین قطر ساقه گره دوم از پایین بوته اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عملکرد علوفه خشک، میزان دو کیلوگرم از نمونه‌های برداشت‌شده در هر کرت به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و وزن خشک اندام هوایی با توزین آن توسط ترازوی دیجیتال تا دو رقم اعشار به دست آمد. محاسبات آماری مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزار MSTATC انجام و برای آزمون مقایسه میانگین از روش دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. همچنین پس از انجام آزمون بارتلت (غیرمعنی‌دار) و اثبات یکنواختی واریانس‌ها، تجزیه مرکب برای دو سال با فرض تصادفی بودن عامل سال انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که ارتفاع بوته به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر عامل شوری، رقم و برهم‌کنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها به‌روش چند دامنه‌ای دانکن انجام شد تا بتوان ارقام و لاین‌هایی را که برتری نسبی در این شرایط نسبت به بقیه ارقام دارند را مشخص نمود. نتایج برهم‌کنش شوری و رقم نشان داد که بالاترین ارتفاع بوته در شرایط آبیاری غیرشور با شوری دو دسی‌زیمنس بر متر و رقم اسپیدفید با میانگین ۲۳۹/۳۳ سانتی‌متر و کمترین ارتفاع بوته در شوری هشت دسی‌زیمنس و لاین KFS16 با میانگین ۱۳۴/۱۶ سانتی‌متر حاصل شد (شکل ۱ a)). در شرایط شوری ۴-۶ دسی‌زیمنس بر متر رقم اسپیدفید با میانگین ۲۰۸/۳۳ سانتی‌متر بیشترین ارتفاع و لاین KFS16 با میانگین ۱۳۴/۱۶ سانتی‌متر کمترین ارتفاع بوته را به دست آورد. با افزایش شوری آب آبیاری از شرایط غیرشور به سمت

آبیاری با شوری بیشتر، ارتفاع بوته کاهش محسوسی پیدا کرد. به‌طوری که رقم اسپیدفید در شرایط شور نسبت به شرایط مطلوب ۵۱ درصد کاهش ارتفاع نشان داد. در آبیاری شور رقم پگاه با میانگین ۱۶۴/۳۳ سانتی‌متر نسبت به بقیه ارقام و لاین‌ها برتری نشان داد (شکل ۱ a)). ارتفاع بوته از جمله صفاتی است که در گیاهان علوفه-ای همواره مورد توجه بوده است. افزایش ارتفاع به‌عنوان صفتی در ارتباط با عملکرد علوفه می‌تواند محققان را در تولید گیاهان علوفه‌ای در جهت افزایش میزان علوفه تولیدی کمک کند (Soleimani, 2008). کاهش ارتفاع بوته می‌تواند نتیجه کاهش رشد سلول در اثر شوری و کاهش تخصیص آسیمیلات به‌دلیل کاهش سطح فتوسنتز کننده به‌منظور رشد باشد (Lacerda et al., 2003). از دیگر دلایل کاهش رشد گیاه می‌توان به غلظت بالاتر سدیم و کلرید در محلول خاک و جذب بیشتر آن اشاره کرد که نه‌تنها باعث اختلال در جذب سایر عناصر می‌شود، بلکه منجر به تنش اسمزی، اختلال در تعادل یونی و در نتیجه کاهش شاخص‌های رشدی گیاه از قبیل ارتفاع، وزن تر و خشک می‌شود (Bybordi, 2012). رشد طولی ساقه نتیجه فعالیت مریستم میان‌بافتی گره‌ها است و طول میان‌گره‌ها به علت افزایش تعداد سلول‌ها و عمدتاً افزایش اندازه سلول‌ها افزایش می‌یابد که در اثر شوری تعداد و طول میان‌گره کاهش و در نهایت ارتفاع گیاه نیز کاهش می‌یابد (Hay & Walker, 1998). در مطالعه سه رقم سورگوم، با افزایش میزان شوری، ارتفاع بوته به‌طور معنی-داری کاهش یافت و بیشینه ارتفاع سورگوم در آبیاری غیرشور و رقم اسپیدفید قرمز و کمینه ارتفاع بوته در سطح شوری ۱۴ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد (Alinia & Kazemini, 2017).

قطر ساقه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سطوح شوری، رقم و برهم‌کنش شوری و رقم بر قطر ساقه در سطح احتمال یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری بود (جدول ۲). در شرایط آبیاری غیرشور، بالاترین قطر ساقه در رقم منصور با میانگین ۲/۶۶ سانتی‌متر حاصل شد. طبیعی است که رقم منصور از ارقام اصلاح‌شده جدید می‌باشد که در سال‌های اخیر در برنامه اصلاحی قرار داشته و در بین سایر لاین‌ها صفات مطلوب بیشتری از جمله قطر ساقه را داشت که انتخاب گردیده است. پس از آن، رقم اسپیدفید با میانگین ۲/۳۰ سانتی‌متر در رتبه دوم قرار گرفت. رقم اسپیدفید چون از ارقام هیبرید می‌باشد در شرایط آبیاری مناسب می‌تواند عملکرد مطلوب تولید کند (Ataei et al., 2024). در شرایط آبیاری با شوری متوسط، رقم منصور با تولید قطر ساقه ۲/۱ و پس از آن رقم اسپیدفید با میانگین تولید دو سانتی‌متر از بقیه ارقام و لاین‌ها برتری نشان دادند. در آبیاری با شوری زیاد، رقم پگاه با میانگین قطر ساقه ۱/۳۵ سانتی‌متر در اولویت قرار گرفت. رقم منصور در شرایط شوری زیاد بیش از ۱۲۰

بر متر، ارقام اسپیدفید و منصور به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۱/۶۶ و ۱۱/۳۳ عدد برگ نسبت به بقیه ارقام ولاین‌ها از تعداد برگ در بوته بیشتری برخوردار بودند. میزان کاهش تعداد برگ در بوته در شرایط آبیاری غیرشور نسبت به شوری متوسط ۱۰/۰۳ درصد در رقم اسپیدفید می‌باشد. در شرایط آبیاری شور ۸-۶ دسی‌زیمنس بر متر، رقم پگاه با تعداد برگ ۱۰/۸۳ عدد نسبت به بقیه ارقام ولاین‌ها بیشترین تعداد برگ در بوته را تولید کرد. بعد از رقم پگاه در این شرایط، رقم اسپیدفید با میانگین تعداد برگ در بوته ۱۰/۳۳ عدد نسبت به رقم پگاه در رتبه بعدی قرار گرفت. میزان کاهش تعداد برگ در بوته در آبیاری غیرشور نسبت به آبیاری شور در ارقام اسپیدفید و پگاه به‌ترتیب ۲۳/۹۱ و ۳/۰۴ درصد بود. پیداست که رقم سورگوم پگاه در شرایط شور تحمل بیشتری از خود نشان می‌دهد و تعداد برگ در بوته که جزء اندام‌های فتوسنتزی می‌باشد را کمتر از دست می‌دهد (شکل ۱ d)). روند تغییرات تعداد و سطح برگ سورگوم، حاکی از وجود تفاوت معنی‌دار بین غلظت‌های مختلف نمک بود و بیشترین تعداد و سطح برگ در شاهد (آبیاری غیرشور) و کمترین آن در تیمار تنش شدید شوری مشاهده گردید (Shamsadinsaeedi & Farahbakhsh, 2009). به‌علاوه از آنجا که شوری موجب اختلال در جذب عناصر غذایی و برهم زدن تعادل یونی در گیاه می‌شود (Mirmohamadimeybodi & Ghareyazi, 2002)، می‌توان کاهش رشد و توسعه برگ‌ها و ساقه را به کمبود عناصر غذایی و اختلالات تغذیه‌ای ناشی از شوری نسبت داد. یکی دیگر از اثرات مهم افزایش شوری، تسریع در پیری برگ می‌باشد و عامل اصلی که باعث پیری برگ می‌شود، کاهش محتوای کلروفیل تحت تنش شوری است (Shamsadinsaeedi & Farahbakhsh, 2009).

مساحت برگ

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سطوح شوری و رقم بر مساحت سطح برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط آبیاری غیرشور بیشترین مساحت سطح برگ به رقم منصور با میانگین ۲۶۱/۳۳ سانتی‌مترمربع تعلق گرفت. بعد از رقم منصور، رقم اسپیدفید با میانگین سطح برگ ۲۵۲/۶۶ سانتی‌متر در رتبه بعدی قرار گرفت. در شرایط شوری متوسط، رقم اسپیدفید با میانگین سطح برگ ۲۴۹/۸۳ سانتی‌مترمربع بیشترین سطح فتوسنتزکننده را به خود اختصاص داد. در آبیاری با شوری زیاد، رقم پگاه با میانگین ۲۲۷/۱۶ سانتی‌مترمربع در جایگاه نخست قرار گرفت. رقم اسپیدفید با میانگین سطح برگ ۲۱۸/۱۶ سانتی‌مترمربع در رتبه بعدی قرار گرفت. کمترین میزان مساحت سطح برگ در لاین KFS16 با میانگین ۱۸۷/۸۲ سانتی‌مترمربع تولید شد (شکل ۱ e)).

درصد نسبت به شرایط آبیاری غیرشور کاهش عملکرد نشان داد (شکل ۱ b)). افزایش شوری آب آبیاری باعث کاهش عملکرد علوفه تر و خشک و کلیه صفات ریخت‌شناختی سورگوم از جمله قطر ساقه گردید (Nurouzi et al., 2022). ارتفاع و قطر ساقه بیانگر رشد رویشی هستند. هرچقدر شرایط محیطی مناسب‌تر باشد، رشد گیاه تا حد امکان افزایش می‌یابد. یکی از اثرات مهم تنش شوری بر گیاهان، کاهش رشد رویشی به‌ویژه کاهش ارتفاع و قطر ساقه گیاه است (Morales et al., 1993). تنش شوری باعث کاهش پتانسیل آب در فضای بین سلولی می‌گردد، دسترسی سلول‌های گیاهی به‌ویژه سلول‌های مرستمی نوک ساقه به آب کم می‌گردد و در نتیجه تقسیم سلولی و بزرگ شدن سلول کاهش می‌یابد و باعث کاهش ارتفاع و قطر ساقه گیاه می‌گردد (Miyatoo et al., 1996).

تعداد پنجه در بوته

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سطوح شوری، رقم و برهم‌کنش شوری در رقم بر تعداد پنجه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). از نظر تعداد پنجه در بوته در شرایط آبیاری غیرشور، رقم منصور بیشترین تعداد پنجه با میانگین ۶/۵ عدد را به خود اختصاص داد. در این شرایط پس از رقم منصور، رقم اسپیدفید با میانگین ۵/۶۶ عدد در رتبه دوم قرار گرفت (شکل ۱ c)). در شوری متوسط ۴-۶ دسی‌زیمنس بر متر، رقم اسپیدفید با میانگین تولید پنج پنجه نسبت به سایر ارقام ولاین‌ها در رتبه بالاتری قرار گرفت. رقم منصور با تولید ۴/۵ عدد پنجه پس از اسپیدفید در رتبه بعدی قرار گرفت. در شرایط شوری زیاد ۸-۶ دسی‌زیمنس بر متر، بالاترین تعداد پنجه به رقم پگاه با میانگین تولید ۳/۳ عدد تعلق گرفت. در این شرایط، رقم منصور و اسپیدفید بعد از پگاه در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. میزان اختلاف تعداد پنجه در رقم منصور در شرایط آبیاری غیرشور نسبت به شوری زیاد آب آبیاری ۴/۱۷ عدد پنجه می‌باشد. کمترین کاهش تعداد پنجه ۲۰/۱۲ درصد در رقم پگاه ملاحظه گردید که تغییرات زیادی نسبت به آبیاری غیرشور نداشت (شکل ۱ c)).

تعداد برگ در بوته

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سطوح شوری، رقم و برهم‌کنش شوری و رقم بر تعداد برگ در بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج برهم‌کنش شوری و رقم نشان داد که بیشترین تعداد برگ در بوته در آبیاری غیرشور و رقم اسپیدفید با میانگین ۱۲/۸۳ عدد بود. بعد از این تیمار، بیشترین تعداد برگ در بوته در رقم منصور و آبیاری غیرشور با میانگین ۱۲/۲۳ عدد وجود داشت (شکل ۱ d)). در شوری متوسط ۴-۶ دسی‌زیمنس

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب صفات زراعی ارقام و لاین‌های امیدبخش سورگوم علوفه‌ای تحت سه سطح تنش شوری

Table 2- Combined analysis of variance of agronomic traits of promising forage sorghum cultivars and lines under three salinity levels										
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	درصد پروتئین Protein percentage	قطر ساقه Stem diameter	تعداد پنجه در بوته Number of tillers per plant	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	ارتفاع بوته Plant height	مساحت برگ Leaf area	عملکرد علوفه تر Fresh forage yield	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield	
سال Year	1	0.018 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.750 ^{ns}	0.454 ^{ns}	73.343 ^{ns}	41.56 ^{ns}	29067118.89 ^{ns}	3924301.56 ^{ns}	
خطا Error	4	0.059	0.029	0.278	0.880	50.870	97.75	12791205.64	3140291.56	
شوری Salinity	2	55.743 ^{**}	6.814 ^{**}	49.750 ^{**}	33.083 ^{**}	29968.23 ^{**}	10061.731 ^{**}	49952166156.19 ^{**}	3073475208.06 ^{**}	
سال × شوری Year × salinity	2	0.008 ^{ns}	0.123 ^{ns}	0.694 ^{ns}	0.843 ^{ns}	0.898 ^{ns}	25.17 ^{ns}	11583958.17 ^{ns}	10693126.28 ^{**}	
خطا Error	8	0.030	0.031	0.417	0.657	29.676	15.537	4078109.99	568877.95	
رقم Variety	5	2.615 ^{**}	1.392 ^{**}	13.461 ^{**}	12.306 ^{**}	5911.187 ^{**}	4402.29 ^{**}	7924113403.27 ^{**}	78792660.54 ^{**}	
سال × رقم Year × variety	5	0.011 ^{ns}	0.084 ^{ns}	0.217 ^{ns}	0.676 ^{ns}	2.165 ^{ns}	10.387 ^{ns}	4426035.32	8403780.05 ^{**}	
شوری × رقم Salinity × variety	10	0.343 ^{**}	0.320 ^{**}	0.761 ^{**}	1.306 ^{**}	676.50 ^{**}	311.676 ^{**}	902122878.47 ^{**}	18404331.46 ^{**}	
سال × رقم × شوری Year × variety × salinity	10	0.012	0.046 ^{ns}	0.128 ^{ns}	0.265 ^{ns}	13.087 ^{ns}	3.431 ^{ns}	2515585.79 ^{ns}	7206598.84 ^{**}	
خطا Error	60	0.028	0.029	0.359	0.487	21.863	8.244	3171376.05	1103527.60	
ضریب تغییرات C.V (%)	-	3.3	10.7	17.3	6.6	2.6	1.3	1.4	4.2	

ns و **: به ترتیب معنی‌داری در سطح پنج درصد، یک درصد و غیرمعنی‌دار.
*، ** and ns: significant at 5%, 1% and non-significant, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات زراعی ارقام و لاین‌های سورگوم علوفه‌ای در شرایط شوری

Table 3- Mean comparison of agronomic traits of forage sorghum cultivars and lines under saline conditions

تیمار		تعداد	تعداد برگ در	ارتفاع بوته	محتوای	مساحت	علوفه تر	علوفه	
Treatment	سال اول	قطر ساقه	پنجه در	بوته	پروتئین	برگ	Fresh frage	Dry	
	First year	Stem diameter (cm)	بوته	Number of	Plant	Leaf area	yield	frage	
	Second year	(cm)	Tillers per plant	leaves per plant	height (cm)	(cm ²)	(t ha ⁻¹)	yield (t ha ⁻¹)	
سال	سال اول	1.61a*	3.38a	10.46a	181.33a	13.23a	224.981a	91.941a	24.634b
Year	سال دوم	1.58a	3.55a	10.59a	179.68a	13.21a	226.22a	92.979a	25.015a
شوری	2-3 dS m ⁻¹	2.04a	4.55a	11.50a	208.22a	14.43a	239.22a	121.747	32.014a
	4-6 dS m ⁻¹	1.58b	3.63b	10.50b	182.66b	13.29b	230.63b	105.099b	28.057b
	6-8 dS m ⁻¹	1.17c	2.22c	9.58c	150.63c	11.95c	206.94c	50.535c	14.403c
رقم	KFS15	1.37d	2.55c	9.77d	164.33d	12.73e	208.83d	67.084c	18.739d
	Mansour	1.98a	4.44a	11.11b	190.61b	13.71a	237.66a	107.539a	28.910ab
	Speedfeed	1.83b	4.33a	11.61a	201.88a	13.32c	240.22a	108.765a	29.246a
	Pegah	1.59c	3.66b	1.88b	188.05bc	13.58b	234.33b	107.862a	28.433b
	KFS17	1.56c	3.44b	1.33c	184.94c	12.95d	229.16c	99.041b	27.118c
	KFS16	1.23e	2.38c	9.44d	153.22e	13.03d	203.38e	64.471d	16.504e

* حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد (آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد).

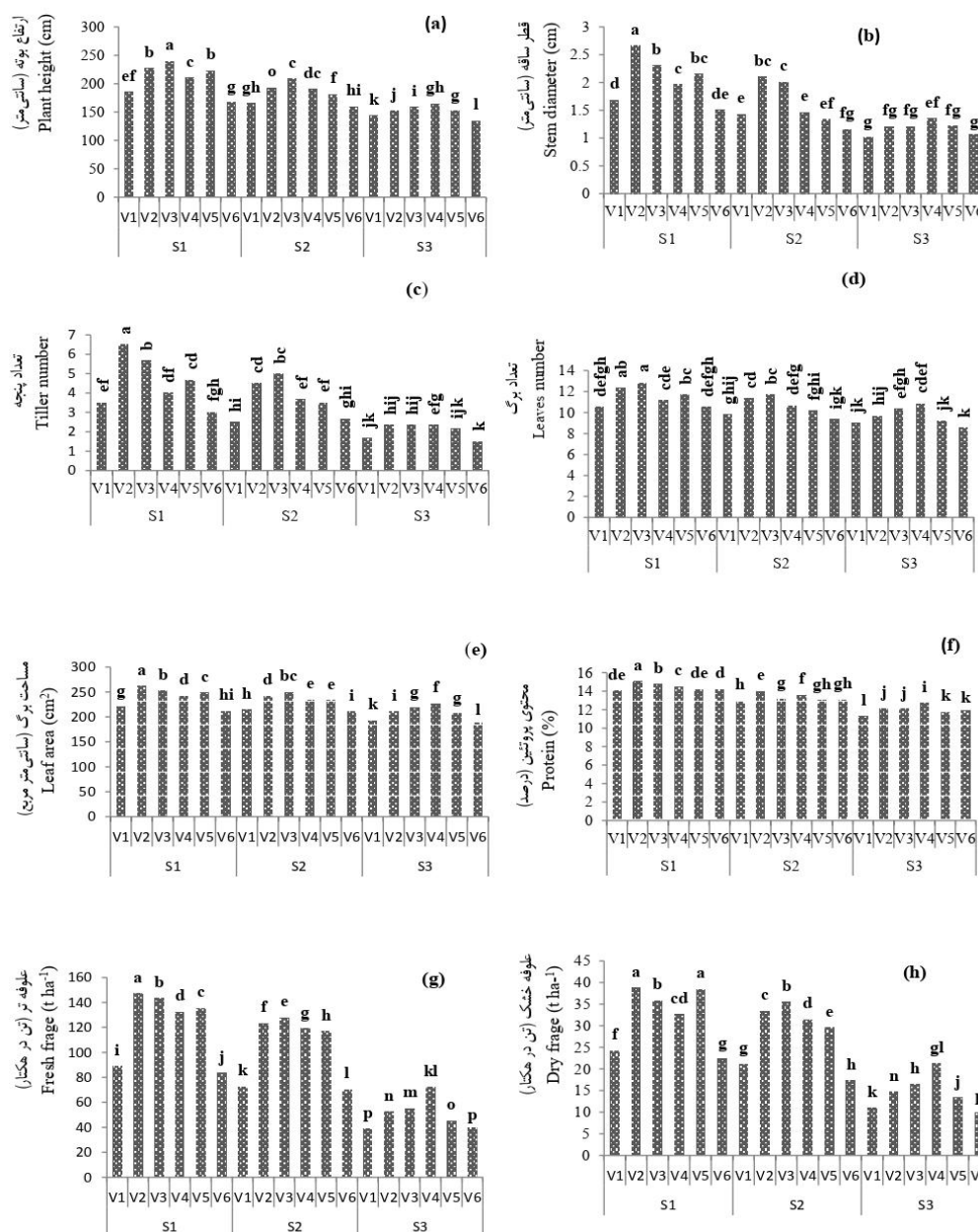
* Similar letters in each column indicate the absence of significant differences (Duncans multiple rang test 5%).

۱۱/۸۵ درصد در آبیاری با شوری زیاد به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش شوری، درصد پروتئین همه ارقام سورگوم علوفه‌ای کاهش و در سورگوم رقم منصور با افزایش شوری مقدار پروتئین ۲۳/۷۰ درصد کاهش یافت (شکل ۱ f). در بین ارقام بررسی‌شده، رقم پگاه بیشترین درصد پروتئین را تحت شرایط آبیاری با شوری بالا داشت و میانگین آن ۱۲/۷۰ درصد ثبت شد. میزان کاهش درصد پروتئین در رقم پگاه در شرایط شور نسبت به شرایط غیرشور ۱۳/۸۵ درصد بود. این نتایج حاکی از آن است که رقم پگاه از مقاومت نسبی بالاتری در برابر تنش شوری برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای کشت در اراضی با شوری بالا معرفی شود. در مطالعه‌ای دیگر، غلظت شوری آب آبیاری با هفت دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش پروتئین در گیاه سورگوم گردید (Hedayati-Firoozabadi et al., 2020). کاهش جذب عناصر معدنی در اثر شوری توسط گیاهان می‌تواند تأثیر مستقیمی بر میزان پروتئین علوفه داشته باشد. این موضوع به‌دلیل نقش عناصر غذایی در سنتز پروتئین‌های گیاهی رخ می‌دهد، به‌ویژه عناصری مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم که در تنظیم فرایندهای متابولیکی و بیوشیمیایی گیاه نقش دارند (Blaise et al., 2005). کاهش محتوای پروتئین در علوفه تحت تنش شوری را می‌توان به کاهش سنتز پروتئین و یا افزایش فرآیند پروتئولیز نسبت داد. این وضعیت همچنین ممکن است ناشی از کاهش دسترسی به اسیدهای آمینه و تغییر ساختاری (دنا‌توراسیون) آنزیم‌های دخیل در سنتز پروتئین‌ها و اسیدهای آمینه باشد (Masters et al., 2010).

کاهش سطح برگ، اولین واکنش گیاهان به تنش شوری می‌باشد و می‌تواند به علت کاهش پتانسیل آب و تورژسانس برگ همراه با پیری برگ‌ها و نکروزه شدن آن‌ها در تنش شوری باشد. کاهش میزان فتوسنتز و محدود شدن گسترش سطح برگ با افزایش شوری در گیاه سورگوم گزارش شده است (Netondo et al., 2004). در مطالعه‌ای گزارش شد که شوری آب آبیاری اثر معنی‌داری بر مساحت برگ، شاخص سطح برگ و وزن خشک برگ داشته است. تیمار آبیاری غیرشور با بیشترین سطح برگ، بالاترین وزن خشک برگ را به خود اختصاص داد. با اعمال شوری، از میزان سطح برگ و وزن خشک برگ در سطوح مختلف شوری کاسته شد (Nurouzi et al., 2022). در خصوص کاهش مساحت سطح برگ می‌توان گفت که تنش شوری به علت به هم زدن تعادل هورمونی و کاهش سطح فتوسنتز کننده گیاه باعث کاهش وزن خشک و مساحت سطح برگ می‌گردد (Rana, 1988).

محتوای پروتئین خام علوفه

اثرات شوری آب آبیاری، رقم و اثرات متقابل شوری و رقم بر درصد پروتئین در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرات متقابل شوری و رقم نشان داد که بیشترین درصد پروتئین در رقم منصور و آبیاری غیرشور با میانگین ۱۵/۰۳ درصد به دست آمد (شکل ۱ f). رقم اسپیدفید در آبیاری غیرشور با ۱۴/۷۵ درصد پروتئین بعد از رقم منصور قرار گرفت. کمترین درصد پروتئین در لاین‌های KFS17 و KFS16 به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۱/۷۰ و



شکل ۱- برهم کنش اثر شوری و رقم بر ارتفاع بوته (a)، قطر ساقه (b)، تعداد پنجه (c)، تعداد برگ (d)، مساحت سطح برگ (e)، درصد پروتئین (f)، عملکرد علوفه تر (g) و عملکرد علوفه خشک (h)؛ V1: KFS15، V2: منصور، V3: اسپیدفید، V4: پگاه، V5: KFS17 و V6: KFS16؛ S1: غلظت شوری آب آبیاری ۲-۳ دسی‌زیمنس بر متر، S2: غلظت شوری آب آبیاری ۴-۶ دسی‌زیمنس بر متر و S3: غلظت شوری آب آبیاری ۶-۸ دسی‌زیمنس بر متر

Figure 1- Interaction effects of salinity and cultivar on: plant height (a), stem diameter (b), tiller number (t), leaf number (p), leaf area (g), protein percentage (d), fresh forage yield (h), and dry forage yield (y). Cultivars: V1: KFS15, V2: Mansour, V3: Speedfeed, V4: Pegah, V5: KFS17, V6: KFS16. Salinity levels: S1: 2-3 dS m⁻¹, S2: 4-6 dS m⁻¹, S3: 6-8 dS m⁻¹ irrigation water salinity

عملکرد علوفه تر (مجموع دو چین)

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سطوح شوری، رقم و برهم‌کنش شوری و رقم بر عملکرد علوفه تر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج برهم‌کنش شوری و رقم نشان داد که در هر شش رقم و لاین سورگوم با افزایش میزان شوری، عملکرد علوفه تر به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیشینه عملکرد علوفه تر سورگوم در رقم منصور با میانگین ۱۴۶/۹۴۳ تن در هکتار و در آبیاری غیرشور ۲-۳ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد و کمینه عملکرد علوفه تر ۳۸/۹۵۸ تن در هکتار در لاین KFS15 و در سطح شوری ۶-۸ دسی‌زیمنس بر متر حاصل شد (شکل ۱ g). در شوری متوسط، رقم اسپیدفید با میانگین ۱۲۷/۷۵۲ تن در هکتار و پس از آن رقم منصور با میانگین ۱۲۳/۲۶۱ تن در هکتار در رتبه بعدی قرار گرفت. در بیشترین سطح شوری اعمال‌شده، رقم پگاه از برتری برخوردار بود و در مقایسه با پنج رقم و لاین دیگر با میانگین ۷۲/۰۱۰ تن در هکتار بیشترین میزان تولید علوفه تر را به خود اختصاص داد. میزان کاهش عملکرد رقم منصور در آبیاری بسیار شور نسبت به آبیاری غیرشور ۹۴/۵۳ تن در هکتار می‌باشد، ولی در سورگوم رقم پگاه این کاهش ۶۰/۳۸۲ تن در هکتار می‌باشد که نشان می‌دهد در شرایط شوری، رقم پگاه از تحمل بالایی برخوردار است. میزان تولید علوفه در شرایط شور در لاین‌های KFS15 و KFS16 به‌ترتیب با میانگین‌های ۳۸/۹۵۸ و ۳۹/۶۳۸ تن در هکتار در کمترین مقدار قرار داشت (شکل ۱ g). به‌طور کلی، تجمع یون سدیم در شرایط تنش شوری از طریق تخریب غشای سلولی موجب آسیب به سلول‌های گیاه می‌شود و کاهش عملکرد در گیاه را به دنبال خواهد داشت (Ashraf & Tufail, 1995). از دلایل دیگر کاهش عملکرد علوفه می‌توان به کاهش میزان رشد و کاهش سطح فتوسنتزکننده گیاه اشاره کرد که منجر به کاهش ماده خشک گیاه می‌شود. با کاهش سطح برگ، قدرت گیاه برای تولید زیست‌توده کم شده و در نهایت وزن علوفه کاهش می‌یابد (Pirasteh-Anosheh et al., 2016). محققان دیگر با مطالعه واکنش سویا به تنش شوری، عوامل مختلفی چون کاهش فتوسنتز، تخریب غشای سلولی، کاهش آب قابل دسترس گیاه و تجمع یون سدیم در برگ را از عوامل اصلی کاهش وزن بیان نمودند (Sharifi et al., 2007).

عملکرد علوفه خشک (مجموع دو چین)

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سطوح شوری، رقم و برهم‌کنش شوری و رقم بر عملکرد علوفه خشک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج برهم‌کنش شوری در رقم نشان داد که بیشترین میزان تولید عملکرد علوفه خشک در آبیاری غیرشور و رقم منصور و لاین KFS17 به‌ترتیب با

میانگین‌های ۳۸/۷۱۴ و ۳۸/۳۹۷ تن در هکتار تولید شد. در این شرایط، کمترین میزان تولید علوفه خشک در لاین KFS16 با میانگین ۲۲/۳۳۱ تن در هکتار به دست آمد. در شرایط شوری متوسط ۴-۶ دسی‌زیمنس بر متر، رقم اسپیدفید با میانگین ۳۵/۴۹۰ تن در هکتار بیشترین میزان تولید علوفه خشک را تولید کرد. پس از رقم اسپیدفید، رقم منصور با میانگین ۳۳/۳۷۷ تن در هکتار در رتبه بعدی قرار گرفت. در شرایط شوری زیاد ۸-۶ دسی‌زیمنس بر متر، همه ارقام و لاین‌ها روند کاهشی در تولید علوفه خشک داشتند و در بین آن‌ها بیشترین تولید علوفه خشک به رقم پگاه با میانگین ۲۱/۲۹۷ تن در هکتار تعلق گرفت. بعد از رقم پگاه، رقم اسپیدفید با میانگین ۱۶/۴۱۰ تن در هکتار در رده بعدی قرار گرفت. کمترین میزان تولید علوفه در شرایط شوری زیاد به لاین KFS16 با میانگین ۹/۸۳۱ تن در هکتار تعلق گرفت (شکل ۱ h). پژوهشگران دیگر گزارش کردند که با افزایش شوری، وزن خشک اندام هوایی ارقام سورگوم اسپیدفید سفید، اسپیدفید قرمز و پگاه به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد به‌ترتیب به‌میزان ۴۹/۲۳، ۶۴/۶۲ و ۳۸/۸۱ درصد کاهش نشان داد و کمترین میزان آن متعلق به رقم پگاه بود. ایشان دلیل وزن خشک بیشتر رقم پگاه را توانایی این رقم در جذب مقدار کمتر یون سدیم و در نتیجه نسبت کمتر سدیم به پتاسیم ریشه و اندام هوایی در مقایسه با دو رقم دیگر عنوان کردند (Alinia & Kazemini, 2017). در پژوهشی دیگر عنوان شد در گیاه سورگوم برهم خوردن توازن یونی در اثر تنش شوری، کاهش جذب یون‌های ضروری، انباشتگی یون‌های مضر و کم‌آبی ناشی از کاهش جذب آب با کاهش تولید پروتئین، تعرق، انتقال یون و در نهایت کاهش عملکرد ماده خشک همراه است (Krishnamurthy et al., 2007). دلیل دیگر کاهش وزن خشک کل گیاه می‌تواند ناشی از مصرف انرژی متابولیک مربوط به سازگاری در شرایط تنش، کاهش میزان فتوسنتز در واحد سطح برگ، کاهش جذب کربن، صدمه به بافت‌ها و رسیدن به حداکثر غلظت نمکی باشد که گیاه آن را تحمل می‌کند (Taiz et al., 2015).

ضرایب همبستگی

بررسی ارتباط بین صفات مورد بررسی نشان داد که اکثر صفات همبستگی معنی‌داری با هم داشتند (جدول ۴). عملکرد علوفه تر و خشک با ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد ساقه، تعداد برگ، مساحت برگ و درصد پروتئین همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. بالا بودن ضریب همبستگی عملکرد دانه با ارتفاع بوته نشان می‌دهد که گیاهان با ارتفاع بیشتر، زیست‌توده بیشتری تولید کرده و باعث افزایش عملکرد علوفه می‌شود (Sarvari & Beheshti, 2011). در مطالعه‌ای دیگر بیان شد که عملکرد سورگوم با ارتفاع بوته و مساحت برگ همبستگی مثبت نشان داد (Azerinasrabad et al., 2024). کاهش در ظرفیت

همبستگی مثبت و معنی‌داری بین درصد پروتئین و ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد پنجه، تعداد برگ و مساحت سطح برگ وجود داشت (جدول ۴).

فتوسنتزی به‌عنوان یک اصل در محدود شدن عملکرد است، بنابراین ظرفیت فتوسنتزی کمتر پوشش گیاهی منجر به کاهش عملکرد از طریق کاهش دوره رشد می‌شود (Kumudini et al., 2002).

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین خصوصیات زراعی ژنوتیپ‌های مختلف سورگوم علوفه‌ای

Table 4- Correlation coefficients between agronomic characteristics of different forage sorghum genotypes

	ارتفاع بوته Plant height	قطر ساقه Stem diameter	تعداد پنجه در بوته Number of tillers per plant	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	مساحت برگ Leaf area	محتوای پروتئین Protein content	علوفه تر Fresh forage	علوفه خشک Dry forage
ارتفاع بوته Plant height	1							
قطر ساقه Stem diameter	0.86**	1						
تعداد پنجه در بوته Number of tillers per plant	0.88**	0.83**	1					
تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	0.80**	0.77**	0.77**	1				
مساحت برگ Leaf area	0.92**	0.83**	0.89**	0.81**	1			
محتوای پروتئین Protein cont	0.85**	0.79**	0.78**	0.71**	0.78**	1		
علوفه تر Fresh forage	0.95**	0.83**	0.87**	0.77**	0.94**	0.86**	1	
علوفه خشک Dry forag	0.92**	0.83**	0.86**	0.77**	0.94**	0.83**	0.97**	1

** و *: نشان‌دهنده معنی‌دار در سطوح یک و پنج درصد احتمال می‌باشد.

** and *: indicate significance at 1 and 5 percent probability levels, respectively.

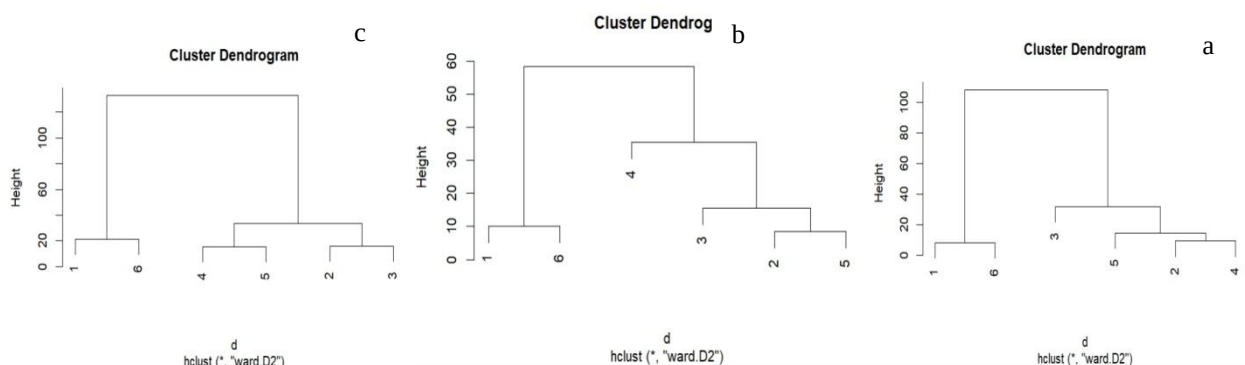
معنی‌دار کلیه صفات ریخت‌شناسی (ارتفاع بوته، تعداد برگ، تعداد پنجه، قطر ساقه، مساحت سطح برگ، درصد پروتئین، عملکرد علوفه تر و خشک) گردید. در شرایط بدون تنش، رقم منصور با میانگین عملکرد علوفه تر و خشک به‌ترتیب ۱۴۶/۹۴۳ و ۳۸/۷۱۴ تن در هکتار، به‌ترتیب از نظر عملکرد علوفه تر نسبت به ارقام اسپیدفید و پگاه ۲/۴۵ و ۱۰/۹۹ درصد و از نظر عملکرد علوفه خشک ۸/۰۲ و ۱۸/۸۱ درصد همراه با برتری در شاخص‌های رشدی شامل ارتفاع بوته، تعداد برگ، تعداد پنجه، قطر ساقه و درصد پروتئین، به‌عنوان برترین ژنوتیپ شناسایی شد. در شرایط تنش شدید شوری، رقم پگاه با حفظ صفات مطلوبی نظیر ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد پنجه و تعداد برگ و همچنین ثبت عملکرد علوفه تر و خشک به‌ترتیب ۷۲/۰۱۰ و ۲۱/۲۹۷ تن در هکتار، نسبت به رقم منصور و اسپیدفید از نظر عملکرد علوفه تر ۳۸/۴۶ و ۳۰/۹۰ درصد و از نظر عملکرد علوفه خشک نسبت به منصور و اسپیدفید به‌ترتیب ۴۵/۴۸ و ۲۹/۷۸ درصد برتری نشان داد. در سطوح متوسط شوری (تا ۴-۶ دسی‌زیمنس بر متر)، ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای از عملکرد اقتصادی قابل قبولی برخوردار بودند. با توجه به شرایط جاری منطقه سیستان شامل توقف

تعیین مشخصات و گروه‌بندی ژرم‌پلاسما به اصلاحگران امکان می‌دهد تا در نمونه‌گیری از جمعیت‌ها، از دوباره‌کاری خودداری کنند. روش‌های تجزیه خوشه‌ای، عمل طبقه‌بندی را با استفاده از فرمول‌های ریاضی میسر ساخته است. درک تنوع ژنوتیپ‌های و مشخص نمودن خصوصیات مهم زراعی آن‌ها از جمله عملکرد علوفه تر و صفات مؤثر بر آن، فرصتی ایجاد خواهد کرد که اصلاحگران سورگوم با توجه به شاخص‌های مورد نظر خود به اصلاح این محصول مهم با دقت و آگاهی بیشتر بپردازند (Hazeghjafari et al., 2014). در این مطالعه، ژنوتیپ‌ها در شرایط شوری‌های مختلف با استفاده از تجزیه خوشه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و در دو گروه قرار گرفتند (شکل ۲). همان‌طور که نتایج عملکرد علوفه تر و خشک در جدول نشان می‌دهد، چهار ژنوتیپ ۲، ۳، ۴ و ۵ نسبت به بقیه ارقام و لاین‌ها از برتری برخوردار بودند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری موجب کاهش

جریان آب رودخانه هیرمند و افزایش شوری آب چاه‌های سطحی، تأمین علوفه مورد نیاز دام‌ها به کشاورزان منطقه توصیه گردد. کشت رقم سورگوم علوفه‌ای پگاه می‌تواند به‌عنوان راهکار عملی برای



شکل ۲- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای در سطوح شوری غیرشور (الف)، متوسط (ب) و شدید (ج) ژنوتیپ‌ها ۱- KFS15، ۲- منصور ۳- اسپیدفید، ۴- پگاه، ۵- KFS17 و ۶- KFS16

Figure 2- Dendrogram resulting from cluster analysis of forage sorghum genotypes under salinity levels: normal (a), moderate (b) and severe (c). The genotypes 1. KFS15, 2. Mansour, 3. Speedfeed, 4. Pegaah, 5. KFS17, and 6. KFS16

References

- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H. R., Hatami, F., Abdshah, H., & Kazemian, A. (2020). Agricultural Statistics Yearbook, Volume 1: Crop Products. Information Technology and Communication Center, Ministry of Agriculture Jihad, 32 p. (in Persian)
- Alinia, M., & Kazemini, A. (2017). Effect of salinity stress on growth, yield, and some physiological traits of forage sorghum cultivars. *Journal of Crop and Horticultural Products Production and Processing*, 7(2), 19-31. (in Persian)
- Ashraf, M., & Tufail, M. (1995). Variation in salinity tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 174, 351-362. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1995.tb01122.x>
- Ataei, R., Torabi, M., Ghasemi, A., & Shiri, M. R. (2024). Investigation and feasibility of pearl millet hybrid ultivars development in Iran. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(1), 63-73. (in Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.358056.654999>
- Azerinasrabad, A., Mousavinik, S. M., Galavi, M., Sirousmehr, A., & Beheshti, S. A. (2024). Path analysis and correlation analysis of grain yield and its components in grain sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* L.) under drought stress conditions. *Agricultural Sciences in Dry Regions*, 6(4), 295-310. (in Persian). <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.292387.1200>
- Bharat, R. S., & Minhas, P. S. (2005). Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. *Agricultural Water Management*, 78, 136-151. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.019>
- Blaise, D., Singh, J. V., Bonde, A. N. Tekale, K. U., & Mayee, C. D. (2005). Effects of farmyard manure and fertil izers on yield, fiber quality and nutrient balance of rainfed cotton (*Gossypium hirsutum*). *Bioresource Technology*, 96(3), 345-349. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.03.008>
- Bybordi, A. (2012). Study effect of salinity on some physiologic and morphologic properties of two grape cultivars. *Life Science Journal*, 9(4), 1092-1101. (in Persian)
- Ghaedi, S., Afrasiab, P., Liaghat, A., & Khamri, A. (2015). Integrated use of saline and non-saline water in sorghum and sunflower cultivation in Sistan plain. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 2(46), 173-182. (in Persian with English abstract).
- Hay, R. K., & Walker, A. (1998). An Introduction to the Physiology of Crop Yield. Longman Group UK Limited, UK.
- Hazeghjafari, P., Ahrizad, S., Mohammadi, A., Nurmandmoayed, F., & Behrouz, P. (2014). Grouping alfalfa genotypes in terms of different traits using multivariate statistical methods. *Agricultural Plant Breeding Journal*, 6(14), 107-121. (in Persian)
- Hedayati-Firoozabadi, A., Kazemeini, S. A., Pirasteh-Anosheh, H., Ghadiri, H., & Pessarakli, M. (2020). Forage

- yield and quality as affected by salt stress in different ratios of *Sorghum bicolor*-*Bassia indica* intercropping. *Journal of Plant Nutrition*, 1-1. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1783301>
14. Kjeldahl, J. G. C. T. (1883). Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen. korpern. *Fresenius, Zeitschrift für Analytische Chemie*, 22, 366-382. <https://doi.org/10.1007/BF01338151>
 15. Khazaei, A., Torabi, M., Ghasemi, A., & Azarinasrabad, A. (2018). Final evaluation of promising dual-purpose forage-grain sorghum lines. Final Report, Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran. (in Persian)
 16. Khodbandeh, N. (2019). Forage Crop Cultivation. Agricultural Science Publishing, Iran, 310 p. (in Persian)
 17. Krishnamurthy, L., Serraj, R., Hash, C. T., Dakheel, A., & Reddy, B. (2007). Screening sorghum genotypes for salinity tolerant biomass production. *Euphytica*, 156, 15-24. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9343-9>
 18. Kumudini, S. (2002). Trials and tribulations: A review of the role of assimilate supply in soybean genetic yield improvement. *Field Crops Research*, 75(2-3), 211-222. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00027-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00027-8)
 19. Lacerda, C., Cambraia, J., Oliva, M., Ruiz, M., & Prisco, J. (2003). Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, 49, 107-120. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(02\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(02)00064-3)
 20. Lin, C., & Binns, M. R. (1991). Genetic properties of four types of stability parameter. *Theoretical and Applied Genetics*, 82, 505-509. <https://doi.org/10.1007/BF00588606>
 21. Mansour, M., Salama, K., Ali, F., & Abou Hadid, A. (2005). Cell and plant responses to NaCl in *Zea mays* L. cultivars differing in salt tolerance. *General and Applied Plant Physiology*, 31, 29-41.
 22. Masters, D., Tiong, M., Vercoe, P., & Norman, H. (2010). The nutritive value of river saltbush (*Atriplex amnicola*) when grown in different concentrations of sodium chloride irrigation solution. *Small Ruminant Research*, 91(1), 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.10.019>
 23. Miguel, J., Guimaraes, M., Welson, L., Simoes, R., OliveiraGherman, G., & de Araujo, L., (2019). Biometrics and grain yield of sorghum varieties irrigated with salt water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(4), 285-290. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n4p285-290>
 24. Mirmohamadimeybodi, S. A., & Ghareyazi, B. (2002). Physiological and Breeding Aspects of Salinity Stress in Plants. Isfahan University of Technology Press, 274 p. (in Persian)
 25. Miyatoo, S., Glenn, E. P., & Olsen, M. W. (1996). Growth, water use and salt uptake of four halophytes irrigated with highly saline water. *Journal of Arid Environments*, 32(2), 141-159. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0013>
 26. Morales, C., Cusido, R. M., Palazon, J., & Bonfill, M. (1993). Response of *Digitalis purpurea* plant to temporary salinity. *Journal of Plant Nutrition*, 16(2), 335-327.
 27. Netondo, G. W., Onyango, J. C., & Beck, E. (2004). Sorghum and Salinity: II. Gas exchange and chlorophyll fluorescece of sorghum under salt stress. *Crop Science*, 44, 806-811. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.8060>
 28. Nurouzi, M., Chavoshi, A., & Ghajarsepanlou, M. (2022). Effect of irrigation water salinity on relative yield and some morphological and physiological characteristics of sorghum. *Journal of Water Research in Agriculture*, 63(1), 55-74. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2022.352078.823>
 29. Omar, S. (2014). Physiological parameters of salt tolerance during germination and seedling growth of *Sorghum bicolor* cultivars of the same subtropical origin. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(4), 300-304. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.05.005>
 30. Pirasteh-Anosheh, H., Ranjbar, G., Pakniyat, H., & Emam, Y., (2016). Physiological Mechanisms of Salt Stress Tolerance in Plants; An Overview. p. 141-160. In: M. M. Azooz & P. Ahmad (Eds). *Plantenvironment Interaction: Responses and Approaches to Mitigate Stress*. Wiley, London. <https://doi.org/10.1002/9781119081005.ch8>
 31. Piri, H., Ansari, H., & Parsa, M. (2017). Evaluation of quantitative and qualitative yield of forage sorghum under different salinity levels of irrigation water in a subsurface drip irrigation system. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30(1), 467-482. (in Persian with English abstract).
 32. Pourazizi, M., & Fallah, S. (2010). The effect of organic and chemical fertilizers on the qualitative properties of sorghum forage. Proceedings of the National Conference on New Achievements in Agronomy, September, Karaj, Iran. (in Persian)
 33. Rana, M. (1988). Causes of varited differences in salt tolerance. Proc of the International Congores of Plant Physiolgy, p. 960-989. New Delhi, India.
 34. Rashedmohassel, M. H., Hosseini, M., Abdi, M., & Molafilabi, A. (1997). Cereal Crops Agriculture. Mashhad Jihad Daneshgahi Publications, Mashhad, Iran. 408 p. (in Persian)
 35. Sarvari, S. M., & Beheshti, S. A. (2011). Relationship between grain yield and plant characteristics in grain sorghum genotypes under drought stress conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 14(2), 183-201. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.15625540.1391.14.2.7.0>
 36. Seif, F., Azizi, F., Paknejad, F., Kashani, A., & Shahabifar, M. (2019). Evaluation of drought stress and clinoptilolite effects on yield and quality of silage corn hybrids. *Scientific Journal of Crop Physiology*, 11(42), 127-146. (In Persian)

37. Shamsadinsaeedi, M., & Farahbakhsh, H. (2009). Effect of salinity stress on yield and some agronomic and physiological traits of two corn hybrids in Kerman region. *Plant Production (Scientific Journal of Agriculture)*, 1(32), 13-24. (in Persian with English abstract)
38. Sharifan, H., & Kazemihasanvand, M. (2015). Evaluation of yield and yield components of sorghum under irrigation with Caspian Sea water. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 9(1), 163-169. (In Persian)
39. Sharifi, M., Ghorbanli, M., & Ebrahimzadeh, H. (2007). Improved growth of salinity-stressed soybean after inoculation with salt pre-treated mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Physiology*, 164, 1144-1151. (In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.06.016>
40. Soleimani, M., Kafi, M., Ziaei, M., & Shabahang, J. (2008). Effects of deficit irrigation on forage yield of two native mass of salt-tolerant Kochia under saline water irrigation. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*, 22, 148-156. (in Persian with English abstract)
41. Tabatabaei, S. A., Anaghli, A., Izadfar, M., Ghane, F., & Soltani, V. (2010). Evaluation of salt tolerance in forage sorghum inbred lines under laboratory and field conditions. Final Report, Agricultural and Natural Resources Research Center of Yazd, Iran. (in Persian)
42. Tabatabaei, S. A., & Anaghli, A. (2012). Effects of salinity on some characteristics of forage sorghum genotypes at germination stage. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(14), 979-983. (in Persian)
43. Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* Sinauer Associates, Incorporated. 20 p.
44. Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, 151, 59-66. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1)
45. Yarnia, M. (2007). Evaluation of some physiological indices of forage sorghum cultivars under salinity conditions. *Journal of Agricultural Sciences, Islamic Azad University of Tabriz*, 1(1), 1-15. (in Persian)
46. Zerbini, E., & Thomas, D. (2003). Opportunities for improvement of nutritive value in sorghum and Pearl millet residues in south Asia through genetic enhancement. *Field Crop Research*, 84, 3-15. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00137-0)



Effect of Medaxtop on Grain Yield, Seed Quality and Physiological Characteristics of Two Open-pollinated Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Cultivars

H. Alishahi¹, M. AghaAlikhani^{1*}, F. Golzardi², F. Moradi³

1- Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

3- Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(* - Corresponding author's Email: maghaalikhani@modares.ac.ir)

Received: 14 July 2025

Revised: 15 September 2025

Accepted: 27 September 2025

Available Online: 30 September 2025

How to cite this article:

Alishahi, H., AghaAlikhani, M., Golzardi, F., & Moradi, F. (2026). Effect of medaxtop on grain yield, seed quality and physiological characteristics of two open-pollinated forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 249-261. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94419.1415>

Introduction

Forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), a drought-tolerant C₄ crop, is increasingly vital for sustainable livestock feed production in arid and semi-arid regions like Iran, where climate change and water scarcity threaten agricultural productivity. Despite its resilience, the limited availability of high-quality seeds hampers its widespread adoption. Plant growth regulators (PGRs), such as Medax Top (containing mepiquat chloride and prohexadione calcium), offer a promising approach to enhance grain yield and seed quality by modulating plant growth and assimilate allocation. This study aimed to evaluate the effects of Medax Top foliar application on grain yield, seed quality, and physiological traits of two open-pollinated forage sorghum cultivars under water-limited conditions, providing insights into optimizing seed production for sustainable agriculture.

Materials and Methods

A two-year field experiment (2023-2024) was conducted at the Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran, using a factorial split-plot of treatment arrangement in complete randomized block design with three replications. Main plots comprised factorial combination of Medax Top doses (0, 0.5, 1, and 2 L ha⁻¹) and application timings (3-4 and 6-8 leaf stages), while subplots included two sorghum cultivars (Mansour and Behesht). The trial was established in a semi-arid climate (265 mm annual rainfall, 14°C mean temperature) with drip irrigation. Measured traits included leaf SPAD-value, leaf area index (LAI), grain yield, seed germination percentage, grain starch, total carbohydrates, soluble sugars, and forage yield. Data were analyzed using SAS 9.1, with means compared via LSD's test ($P \leq 0.05$) after confirming variance homogeneity across years.

Results and Discussion

Medax Top application significantly influenced physiological and agronomic traits. As the application rate of Medax Top increased, leaf SPAD -value, grain yield, grain starch content, carbohydrates, soluble sugars and seed germination percentage significantly increased. However, these positive changes were accompanied by a reduction in LAI and forage yield. Foliar application at the 3-4 leaf stage, compared to the 6-8 leaf stage,



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.2025.94419.1415>

significantly increased starch content and grain yield while decreasing forage yield. Application at the 3-4 leaf stage yielded higher grain production (2976 kg ha^{-1}) than the 6-8 leaf stage (2723 kg ha^{-1}), likely due to reduced competition between vegetative and reproductive sinks in early development duration. The 2 L ha^{-1} of Medax Top maximized grain yield and germination percentage, alongside enhancing SPAD-value and carbohydrate content, reflecting improved photosynthetic efficiency and assimilate storage. However, forage yield decreased by 34% at this dose, indicating a shift in resource allocation from vegetative to reproductive growth. The Mansour cultivar demonstrated significant superiority over the Behesht in terms of starch content, carbohydrates, soluble sugars, and forage yield, showcasing superior genetic potential. The maximum grain soluble sugar content (6.88%) was observed in the Mansour cultivar with a ModaxTop application rate of 2 L ha^{-1} in the first year, while the highest grain yield (4542 kg ha^{-1}) was achieved in the same cultivar with a dose of 1 L ha^{-1} in the second year. Lower doses ($0.5\text{-}1 \text{ L ha}^{-1}$) better supported forage production, balancing vegetative biomass retention.

Conclusion

This study demonstrated that foliar application of Medax Top effectively improved grain yield and seed quality in open-pollinated forage sorghum cultivars. A rate of 2 L ha^{-1} applied at the 3–4 leaf stage was identified as the optimum treatment for seed production, particularly in the 'Mansour' cultivar. In forage production systems, however, lower application rates are recommended to minimize reductions in biomass. Overall, a foliar application of Medax Top at 2 L ha^{-1} is recommended to maximize seed yield and quality, whereas an application rate of 1 L ha^{-1} is more suitable for combined seed and forage production. These findings highlight the potential of plant growth regulators to optimize sorghum production according to specific production objectives, seed, forage, or both, in water-limited environments, thereby enhancing agricultural resilience and food security.

Acknowledgement

The authors express gratitude to the Seed and Plant Improvement Institute, the Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO) for providing laboratory facilities and technical support in this research [Project number 03-03-0305-024-010312]. Also, thanks to the support of the Vice Chancellor for Research and Technology of Tarbiat Modares University.

Keywords: Germination percentage, Leaf area index, Plant growth regulator, Soluble sugar, Starch

تأثیر مداخلات بر عملکرد دانه، کیفیت بذر و ویژگی‌های فیزیولوژیک دو رقم سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) آزادگرده‌افشان

حسن علیشاهی^۱، مجید آقاعلیخانی^{۱*}، فرید گل‌زردی^۲، فواد مرادی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

چکیده

تأثیر تنظیم‌کننده رشد مداخلات بر عملکرد دانه، کیفیت بذر، عملکرد علوفه و شاخص‌های فیزیولوژیک دو رقم آزادگرده‌افشان سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) طی آزمایشی به‌صورت فاکتوریل اسپلیت پلات در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در کرج بررسی شد. عامل‌های آزمایش شامل دُز (صفر، نیم، یک و دو لیتر در هکتار) و زمان محلول‌پاشی مداخلات (مراحل ۳-۴ و ۸-۶ برگی) در کرت‌های اصلی و ارقام منصور و بهشت در کرت‌های فرعی بودند. با افزایش دُز مصرف مداخلات، شاخص سبزی‌نگی برگ، محتوای نشاسته، کربوهیدرات‌ها، قندهای محلول، عملکرد دانه و درصد جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد، اما این تغییرات با کاهش شاخص سطح برگ و عملکرد علوفه همراه بود. محلول‌پاشی در مرحله ۳-۴ برگی نسبت به مرحله ۸-۶ برگی، محتوای نشاسته و عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری افزایش و عملکرد علوفه را کاهش داد. دُز دو لیتر در هکتار مداخلات، در مرحله ۳-۴ برگی بالاترین عملکرد دانه را به همراه داشت. رقم منصور از نظر صفات کیفی و عملکرد علوفه برتری معنی‌داری نسبت به رقم بهشت داشت. افزایش محتوای قندهای محلول دانه رقم منصور با کاربرد دو لیتر در هکتار مداخلات در سال اول نسبت به شاهد ۲۳/۲ درصد و بیشترین عملکرد دانه (۴۵۴۲ کیلوگرم در هکتار) با دُز یک لیتر در هکتار در سال دوم (با افزایش ۶۸/۱ درصد نسبت به شاهد) به دست آمد. در مجموع، محلول‌پاشی مداخلات با دُز دو لیتر در هکتار برای تولید بذر با کمیت و کیفیت مناسب و دُز یک لیتر در هکتار برای تولید هم‌زمان دانه و علوفه قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: تنظیم‌کننده رشد گیاهی، درصد جوانه‌زنی، شاخص سطح برگ، قندهای محلول، نشاسته

مقدمه

کاهش منابع آب، تغییرات اقلیمی و گسترش خشکسالی‌ها، با کاهش عملکرد و کیفیت محصولات زراعی، امنیت غذایی را به خطر انداخته است (Tavazoh et al., 2024)؛ بنابراین، یافتن راهکارهایی برای بهینه‌سازی مصرف آب و انتخاب گیاهان زراعی متحمل به کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بسزایی برخوردار است (Baghdadi et al., 2023). سورگوم (*Sorghum bicolor* L.)

(Moench) به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تولید پایدار علوفه و دانه، نقش مهمی در تأمین خوراک دام و طیور و حتی تغذیه انسان در مناطق کم‌آب ایفا می‌کند (Pourali et al., 2023). در بین انواع سورگوم، ارقام علوفه‌ای آزادگرده‌افشان به‌دلیل سازگاری با شرایط محلی، هزینه تولید پایین‌تر و وابستگی کمتر به نهاده‌های خارجی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند (Ghalkhani et al., 2023). این ارقام در مقایسه با هیبریدها که اغلب به شرایط بهینه کشت و دسترسی به بذرهای وارداتی وابسته‌اند، می‌توانند با حداقل منابع، عملکرد قابل قبولی ارائه دهند و از این‌رو، گزینه‌ای پایدار برای کشاورزی در مناطق کم‌آب به شمار می‌روند (Mirahki et al., 2023). با این حال، یکی از موانع اصلی در توسعه کشت این ارقام در ایران، کمبود بذر با کیفیت و کافی است که تولید پایدار آن را با مشکل مواجه کرده است. تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی با تأثیر بر مسیرهای هورمونی، به‌ویژه از طریق مهار سنتز جیبرلین‌ها، می‌توانند تعادل بین رشد

۱- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: maghaalikhani@modares.ac.ir <https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94419.1415>

کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تنظیم‌کننده رشد مداخلات پاپ بر عملکرد دانه، کیفیت بذر، عملکرد علوفه و ویژگی‌های فیزیولوژیک ارقام آزادگرده‌افشان سورگوم علوفه‌ای در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک ایران طراحی و اجرا شد. امید است که شناخت دز و زمان مناسب کاربرد مداخلات پاپ برای بهبود عملکرد و کیفیت بذر در دو رقم سورگوم علوفه‌ای آزادگرده‌افشان به ارائه توصیه‌های عملی سودمند برای تولیدکنندگان بذر بینجامد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش طی دو سال زراعی ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در کرج انجام شد. منطقه مورد نظر دارای اقلیم نیمه‌خشک با متوسط بارندگی سالانه ۲۶۵ میلی‌متر و دمای میانگین سالانه ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. میانگین دمای هوا و مجموع بارندگی طی دوره آزمایش در **جدول ۱** ارائه شده است. خاک مزرعه از نوع لوم رسی با pH برابر با ۷/۲، هدایت الکتریکی ۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار ماده آلی ۰/۵ درصد بود. عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک‌زنی و تسطیح با استفاده از لولر بود تا سطحی یکنواخت برای کاشت فراهم شود. مصرف کود براساس آزمون خاک و نیازهای تغذیه‌ای سورگوم انجام شد. بدین منظور، در زمان کاشت ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار آمونیوم فسفات (حاوی ۱۸ درصد نیتروژن و ۴۶ درصد فسفر) و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره (۴۶ درصد نیتروژن) به‌عنوان کود پایه به خاک اضافه شد. همچنین ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره به‌صورت سرک در مرحله ۴-۶ برگی اعمال گردید تا نیازهای نیتروژنی گیاه در مراحل اولیه رشد تأمین شود.

رویشی و زایشی را تنظیم کرده و ویژگی‌های مطلوب زراعی را تقویت کنند (Rademacher, 2015). با کاربرد دقیق و کنترل‌شده تنظیم‌کننده‌های رشد می‌توان پتانسیل عملکرد را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Priyadarshini et al., 2023). مداخلات پاپ، ترکیبی حاوی میپیکوات کلراید و پروهگزادیون کلسیم، یکی از این تنظیم‌کننده‌ها است که در محصولات مختلف مانند گندم (*Triticum aestivum*)، جو (*Hordeum vulgare*) و پنبه (*Gossypium hirsutum*) با موفقیت به کار گرفته شده است. مطالعات نشان داده‌اند که این ماده با کاهش رشد طولی ساقه و افزایش مقاومت به ورس (خواهیدگی)، عملکرد دانه را بهبود می‌بخشد (Bozek et al., 2019; Mykhalska et al., 2019). علاوه بر این، گزارش‌هایی از تأثیر مثبت آن بر افزایش کارایی فتوسنتز و کیفیت دانه نیز وجود دارد (Kolev & Todorov, 2023). کاربرد میپیکوات کلراید در گیاه پنبه باعث افزایش تولید کربوهیدرات‌ها، بهبود بهره‌وری استفاده از کربن و تأخیر در پیری برگ‌ها شده است (Luo et al., 2023). میپیکوات کلراید از طریق کاهش تولید جیبرلین باعث کاهش ارتفاع گیاه و تمرکز بر رشد زایشی می‌شود (Murtza et al., 2022). این یافته‌ها اهمیت کاربرد هدفمند تنظیم‌کننده‌های رشد را در مدیریت زراعی و بهینه‌سازی عملکرد به‌خوبی نشان می‌دهد. با این وجود، اطلاعات موجود درباره کاربرد مداخلات پاپ در سورگوم علوفه‌ای بسیار محدود است. به‌خصوص در مورد تأثیر کاربرد دزهای مختلف مداخلات پاپ در مراحل متفاوت رشد بر عملکرد دانه و علوفه، کیفیت بذر و ویژگی‌های فیزیولوژیک ارقام آزادگرده‌افشان سورگوم علوفه‌ای در شرایط اقلیمی کشور خلأ تحقیقاتی وجود دارد و نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر احساس می‌شود.

زراعت گیاهانی مانند سورگوم و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، گامی مؤثر در راستای توسعه

جدول ۱- میانگین دمای هوا و مجموع بارندگی ماهانه طی دوره آزمایش

Table 1- Monthly mean air temperature and total precipitation during the experimental period

ماه Month	میانگین دما Average temperature °C		بارندگی Precipitation (mm)	
	۱۴۰۲ 2023	۱۴۰۳ 2024	۱۴۰۲ 2023	۱۴۰۳ 2024
۱۱ خرداد تا ۹ تیر June	25.0	22.4	13	11
۱۰ تیر تا ۹ مرداد July	26.6	24.9	0	0
۱۰ مرداد تا ۹ شهریور August	26.4	25.0	0	0
۱۰ شهریور تا ۸ مهر September	20.2	20.0	0	28
۹ مهر تا ۹ آبان October	13.8	12.7	27	23

کرت، ۵۰ عدد بذر به صورت تصادفی انتخاب و در پتری‌دیش‌های ۱۱ سانتی‌متری روی کاغذ صافی و آتمن قرار گرفتند. به هر پتری‌دیش هشت میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و در ژرمیناتور با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در روز و ۲۰ درجه سانتی‌گراد در شب و دوره نوری ۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی قرار گرفتند. تعداد بذره‌های جوانه زده روزانه تا روز چهاردهم ثبت شد. براساس دستورالعمل ISTA، خروج ریشه چه به طول حداقل دو میلی‌متر به عنوان معیار اصلی برای تشخیص جوانه زنی بذر سورگوم در نظر گرفته شد. در نهایت درصد جوانه زنی (GP) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$GP(\%) = \frac{n}{N} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، n: تعداد بذره‌های جوانه زده نرمال و N: تعداد کل بذره‌های کشت شده است. تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم افزار SAS نسخه ۹/۱ و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. به منظور تجزیه واریانس مرکب، عامل سال به عنوان اثر تصادفی و تیمارها به عنوان اثر ثابت در نظر گرفته شدند.

نتایج و بحث

شاخص سبزی‌نگی برگ (SPAD-Value)

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که شاخص سبزی‌نگی برگ به طور معنی‌داری تحت تأثیر دُز مداخلات قرار گرفت ($p \leq 0.01$). با افزایش دُز مصرفی مداخلات از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین این شاخص از ۳۸/۴۱ به ۴۲/۲۰ افزایش یافت (جدول ۳). این افزایش ۹/۸۷ درصدی احتمالاً به دلیل تأثیر مداخلات بر تحریک سنتز کلروفیل و بهبود کارایی فتوسنتز است (Luo et al., 2023). گزارش شده است که مصرف پروهگزادیون کلسیم منجر به افزایش شاخص سبزی‌نگی برگ ذرت (*Zea mays*) شده است (Junior et al., 2021). به طور مشابه، کاربرد می‌کوات کلراید باعث افزایش غلظت کلروفیل در فاز میانی و پایانی رشد پنبه شد (Luo et al., 2023). بین سال‌های آزمایش (۱۴۰۲ و ۱۴۰۳) و دو رقم سورگوم (منصور و بهشت) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳) که بیانگر ثبات پاسخ این صفت به تیمارها در شرایط مختلف محیطی و ژنتیکی است. همچنین اثر متقابل دُز و رقم معنی‌دار نبود (جدول ۲)، به این معنی که هر دو رقم واکنش مشابهی به دُزهای مختلف مداخلات نشان دادند. این یافته‌ها با نتایج میخالسکا و همکاران (Mykhalska et al., 2019) در گندم هم‌راستا است که افزایش محتوای کلروفیل را تحت تأثیر تنظیم‌کننده‌های رشد گزارش کرده‌اند. ثبات این پاسخ، مداخلات را به ابزاری قابل اعتماد برای بهبود سبزی‌نگی برگ در سورگوم علوفه‌ای تبدیل می‌کند که

چیدمان تیمارهای آزمایش به صورت فاکتوریل اسپلیت پلات برپایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. کرت‌های اصلی در بردارنده فاکتوریل چهار دُز مداخلات (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ لیتر در هکتار) و دو زمان محلول‌پاشی (مراحل ۳-۴ و ۸-۶ برگی) بود و کرت‌های فرعی دو رقم سورگوم علوفه‌ای آزادگرده افشان (منصور و بهشت) بودند. مداخلات، محصول شرکت BASF آلمان، حاوی ۳۰۰ گرم در لیتر می‌کوات کلراید و ۵۰ گرم در لیتر پروهگزادیون کلسیم است. محلول‌پاشی با استفاده از سم‌پاش کوله‌ای کالیبره شده با فشار ثابت دو بار و نازل‌های تی‌جت بعد از غروب آفتاب انجام گرفت. حجم محلول مصرفی ۳۰۰ لیتر در هکتار بود و در هر کرت به صورت یکنواخت اعمال شد. کرت‌های شاهد با آب معمولی محلول‌پاشی گردید. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف کاشت به طول شش متر با فاصله بین ردیف‌های ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر بود که تراکم نهایی ۱۶۷۰۰۰ بوته در هکتار را ایجاد می‌کرد. عملیات کاشت در هر دو سال در تاریخ ۱۱ خرداد انجام شد. آبیاری به روش قطره‌ای نواری با استفاده از نوارهای تیپ ۱۶ میلی‌متری و فاصله قطره‌چکان‌ها ۱۰ سانتی‌متر اجرا شد. نیاز آبی گیاه براساس محاسبات تبخیر و تعرق مرجع با روش پنمن-مانیت و ضریب گیاهی (Kc) سورگوم تعیین گردید.

برای اندازه‌گیری شاخص سبزی‌نگی برگ (SPAD)، از دستگاه کلروفیل‌متر استفاده شد. این اندازه‌گیری ۱۰ روز پس از هر محلول‌پاشی، برای ۱۰ بوته تصادفی از هر کرت انجام گرفت. برای تعیین شاخص سطح برگ (LAI) در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی، نمونه‌برداری تخریبی از پنج بوته تصادفی از هر کرت صورت گرفت و با دستگاه سطح‌سنج برگ اندازه‌گیری شد. با برداشت پانیکول‌ها از دو ردیف میانی هر کرت در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، عملکرد دانه تعیین شد. برای این منظور، پانیکول‌ها با دست برداشت و سپس دانه‌ها با دستگاه کوبنده جدا و توزین شدند. برای محاسبه عملکرد علوفه، ساقه‌ها و برگ‌های بوته‌های دو ردیف میانی هر کرت جهت مشخص شدن وزن تر توزین شدند. سپس ساقه‌ها و برگ‌های پنج بوته به طور تصادفی انتخاب و پس از مشخص شدن وزن تر در آن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند تا به وزن ثابت برسند و سپس مجدداً توزین شدند تا درصد ماده خشک آن‌ها محاسبه شود. در نهایت، براساس درصد ماده خشک نمونه‌ها، عملکرد علوفه خشک محاسبه شد. محتوای کل کربوهیدرات‌های دانه با روش رنگ‌سنجی فنل-اسید سولفوریک (DuBois et al., 1956)، محتوای نشاسته به روش آنترون (Hedge & Hofreiter, 1962) و محتوای قندهای محلول با روش دی‌نیتروسالسیلیک اسید (Miller, 1959) اندازه‌گیری شدند. برای اطمینان از سلامت بذور تولیدی، آزمون جوانه‌زنی بذر در آزمایشگاه انجام گردید. بدین منظور، از هر

می‌تواند در افزایش کارایی جذب نور و تولید ماده خشک نقش داشته باشد.

شاخص سطح برگ (LAI)

شاخص سطح برگ به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) تحت تأثیر دُز مداخلات تاپ قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، شاخص سطح برگ از ۵/۳۲ به ۴/۷۷ کاهش (۱۰/۴۱ درصد) یافت (جدول ۳). این کاهش احتمالاً نتیجه تغییر در الگوی تخصیص منابع از رشد رویشی به سمت اندام‌های زایشی است، گزارش کونستانینشو و همکاران (Constantinescu et al., 2021) در گندم با این بخش از یافته‌ها همسو می‌باشد. به‌طور مشابه، کاربرد

پروهگزادیون کلسیم باعث کاهش شاخص سطح برگ فلفل (*Capsicum annum*) (Ozbay & Metin, 2020) و بادام زمینی (*Arachis hypogaea*) (Studstill et al., 2020) شده است. بین دو رقم و سال‌های آزمایش تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، که نشان‌دهنده تأثیر یکنواخت مداخلات تاپ بر این صفت در شرایط مختلف است. محلول‌پاشی در مرحله ۴-۳ برگی میانگین سطح برگ بالاتری (۵/۱۲) نسبت به مرحله ۸-۶ برگی (۵/۰۱) ایجاد کرد، اما این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۳). این نتایج حاکی از آن است که مداخلات تاپ با هدایت اسیملات‌ها به سمت رشد زایشی می‌تواند در مدیریت تولید بذر در سورگوم مفید باشد، به‌ویژه در شرایطی که هدف اصلی به‌جای علوفه، تولید بذر با کیفیت است.

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی در سورگوم علوفه‌ای تحت تأثیر سال، دُز و زمان مصرف مداخلات تاپ و رقم

Table 2- Combined analysis of variance for the studied traits in forage sorghum as affected by year, dose and time of application of Medax Top, and cultivar

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	شاخص سبزی SPAD	شاخص سطح برگ Leaf area index	محتوای نشاسته دانه Grain starch content	کل کربوهیدرات‌های دانه Total grain carbohydrates	محتوای قندهای محلول Soluble sugar content	درصد جوانه‌زنی بذر Seed germination percentage	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد علوفه (ساقه و برگ) Forage yield (stem and leaf)
سال Year	1	7.65 ^{ns}	0.69 ^{ns}	15.37 ^{ns}	15.06 ^{ns}	0.01 ^{ns}	18.38 ^{ns}	24524838**	185375975*
بلوک (سال) Block (year)	4	8.76	0.40	19.44	26.37	0.56	20.21	858458	12776847
دُز مصرف Dosage (a)	3	63.39**	1.31**	135.20**	203.40**	6.96*	148.49**	21762652*	144140304**
سال × دُز Year × a	3	0.76 ^{ns}	0.01 ^{ns}	4.56 ^{ns}	5.81 ^{ns}	0.26 ^{ns}	4.49 ^{ns}	2066468**	3649292**
زمان مصرف Timing (b)	1	0.06 ^{ns}	0.31 ^{ns}	3.77**	4.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	15.04 ^{ns}	1541280*	35555873*
سال × زمان Year × b	1	0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.05 ^{ns}	1.04 ^{ns}	6767 ^{ns}	111112 ^{ns}
دُز × زمان a × b	3	0.01 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.04*	0.26 ^{ns}	554794*	4621845 ^{ns}
سال × دُز × زمان Year × a × b	3	0.03 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.01 ^{ns}	1.82 ^{ns}	25980 ^{ns}	811961 ^{ns}
بلوک (سال × دُز × زمان) Block (year × a × b)	28	4.37	0.08	21.19	22.54	0.27	6.02	68884	820485
رقم Cultivar (c)	1	14.96 ^{ns}	0.31 ^{ns}	43.69*	73.05*	3.75*	9.38 ^{ns}	9119268 ^{ns}	168275104**
سال × رقم Year × c	1	0.29 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.38 ^{ns}	649117**	17120 ^{ns}
دُز × رقم a × c	3	0.46 ^{ns}	0.01 ^{ns}	3.24*	4.60**	0.14 ^{ns}	0.15 ^{ns}	1478943 ^{ns}	13794747**
سال × دُز × رقم Year × a × c	3	0.11 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.30 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.08*	0.49 ^{ns}	396926*	83947 ^{ns}
دُز × زمان × رقم b × c	1	0.04 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.01*	0.04 ^{ns}	771 ^{ns}	1344267 ^{ns}
سال × دُز × زمان × رقم Year × a × b × c	1	0.01 ^{ns}	0.06*	0.26 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.38 ^{ns}	77 ^{ns}	1191267 ^{ns}
دُز × زمان × رقم a × b × c	3	0.03 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.15 ^{ns}	16863 ^{ns}	517411 ^{ns}
سال × دُز × زمان × رقم Year × a × b × c	3	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.27 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.49 ^{ns}	38018 ^{ns}	1031824 ^{ns}
خطا Error	32	1.74	0.05	14.04	16.29	0.26	4.38	63001	510827
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	5.3	7.5	7.6	7.6	8.6	4.2	8.8	7.1

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

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

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های صفات مورد بررسی سورگوم علوفه‌ای تحت تأثیر اثرات اصلی سال، دُز و زمان مصرف مداخلات تاپ و رقم
Table 3- Main effects of year, dose and time of application of Medax Top, and cultivar on the studied traits in forage sorghum

عامل‌های آزمایشی Experimental factors		شاخص سبزی‌نگی SPAD	شاخص سطح برگ Leaf area index	محتوای نشاسته دانه Grain starch content (%)	کل کربوهیدرات‌های دانه Total grain carbohydrates (%)	محتوای قندهای محلول Soluble sugar content (%)	درصد جوانه‌زنی بذر Seed germination percentage	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	عملکرد علوفه Forage yield (kg ha ⁻¹)
سال Year	۱۴۰۲ 2023	40.03 a*	5.15 a	65.89 a	71.83 a	5.94 a	94.46 a	2344 b	15529 a
	۱۴۰۳ 2024	40.60 a	4.98 a	66.69 a	72.62 a	5.93 a	95.33 a	3355 a	12749 b
دُز مصرف Dosage	شاهد Control	38.41 d	5.32 a	63.79 c	69.18 c	5.39 c	91.92 c	1661 c	17001 a
	نیم لیتر در هکتار 0.5 L ha ⁻¹	39.72 c	5.15 b	65.08 c	70.72 c	5.65 bc	94.08 b	2583 b	14905 b
	یک لیتر در هکتار 1.0 L ha ⁻¹	40.94 b	5.03 c	67.06 b	73.13 b	6.07 b	95.83 ab	3276 a	13479 b
	دو لیتر در هکتار 2.0 L ha ⁻¹	42.2 a	4.77 d	69.22 a	75.84 a	6.62 a	97.75 a	3877 a	11171 c
زمان مصرف Timing	۳-۴ برگ 3-4 leaf stage	40.34 a	5.01 a	66.49 a	72.43 a	5.94 a	95.29 a	2976 a	13530 b
	۶-۸ برگ 6-8 leaf stage	40.29 a	5.12 a	66.09 b	72.02 a	5.93 a	94.50 a	2723 b	14748 a
رقم Cultivar	منصور Mansour	40.71 a	5.12 a	66.96 a	73.09 a	6.13 a	95.21 a	3158 a	15463 a
	بهشت Behesht	39.92 a	5.01 a	65.61 b	71.35 b	5.73 b	94.58 a	2541 a	12815 b

* در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌های دارای حروف مشترک براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

* In each column and for each factor, the means followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$) according to the LSD test.

محتوای قندهای محلول

محتوای قندهای محلول دانه به‌طور معنی‌داری ($P \leq 0.05$) تحت تأثیر دُز مداخلات تاپ، رقم و اثر متقابل دُز $\times$ زمان محلول‌پاشی قرار گرفت (جدول ۲). به‌طوری که با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین قندهای محلول از ۵/۳۹ به ۶/۶۲ درصد افزایش یافت (جدول ۳). بیشترین محتوای قندهای محلول (۶/۶۴ درصد) با مصرف دو لیتر در هکتار مداخلات تاپ در مرحله ۶-۸ برگی ثبت شد (جدول ۴). این افزایش با نتایج جونیور و همکاران (Junior et al., 2021) در ذرت هم‌راستا است. همچنین رقم منصور با میانگین ۶/۱۳ درصد نسبت به رقم بهشت با میانگین ۵/۷۳ درصد برتری معنی‌داری از نظر محتوای قندهای محلول داشت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که زمان‌بندی کاربرد مداخلات تاپ بر متابولیسم کربوهیدرات‌ها در دانه تأثیرگذار است و از این‌رو باید در برنامه‌ریزی زمان کاربرد مدنظر قرار گیرد. برهم‌کنش سه گانه سال $\times$ دُز $\times$ رقم نیز بر مقدار قندهای

محتوای نشاسته دانه

محتوای نشاسته دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دُز و زمان مصرف مداخلات تاپ ($P \leq 0.01$) و رقم ($P \leq 0.05$) قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین محتوای

مجموع کربوهیدرات‌های دانه

مجموع کربوهیدرات‌های دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دُز مداخلات (جدول ۲). با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین کربوهیدرات‌ها از ۶۹/۱۸ به ۷۵/۸۴ درصد افزایش یافت (جدول ۳). رقم منصور با محتوای کربوهیدرات‌ها ۷۳/۰۹ درصد نسبت به رقم بهشت با میانگین ۷۱/۳۵ درصد برتری معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). اثر متقابل دُز و رقم نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، به‌طوری که پاسخ محتوای کربوهیدرات‌های دو رقم به دُزهای مختلف، متفاوت بود (جدول ۵). این موضوع احتمالاً به دلیل تفاوت‌های ژنتیکی در مسیرهای متابولیک کربن (مانند افزایش فعالیت آنزیم‌های کربوکسیلاز) است که توسط مداخلات تقویت می‌شود (Liu et al., 2025). این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت مداخلات بر ذخیره‌سازی کربوهیدرات در دانه است و بر اهمیت انتخاب ژنوتیپ مناسب در کنار کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد تأکید دارد. مجموع کربوهیدرات‌های ذخیره‌شده در دانه رقم منصور از ۷۰/۵۵ درصد در شاهد به ۷۶/۱۹ درصد در دُز دو لیتر مداخلات در هکتار رسید، درحالی‌که در رقم بهشت این افزایش از ۶۷/۸۱ درصد به ۷۵/۵۰ درصد بود (جدول ۵).

نشاسته دانه از ۶۳/۷۹ به ۶۹/۲۲ درصد افزایش یافت (جدول ۳). این افزایش در محتوای نشاسته احتمالاً نتیجه بهبود انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها تحت تأثیر مداخلات است (Luo et al., 2023). رقم منصور با میانگین ۶۶/۹۶ درصد به‌طور معنی‌داری نسبت به رقم بهشت با میانگین ۶۵/۶۱ درصد برتری داشت. برهم‌کنش دُز × رقم نیز بر این صفت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲)، به‌طوری که در دُزهای بالاتر، تفاوت بین دو رقم کاهش یافت (جدول ۵). این تعامل نشان‌دهنده آن است که رقم منصور در دُزهای پایین‌تر حساسیت بیشتری به مداخلات نشان می‌دهد و نشاسته را بیشتر ذخیره می‌کند، اما در دُزهای بالا، هر دو رقم به سطح اشباع می‌رسند، که این می‌تواند به دلیل تفاوت‌های ژنتیکی در آنزیم‌های سنتز نشاسته باشد که در رقم منصور کارآمدتر عمل می‌کنند (Shallal et al., 2020). این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب رقم مناسب و کاربرد دُز بهینه مداخلات می‌تواند کیفیت دانه را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد، که برای تولید بذر با ارزش غذایی بالا اهمیت دارد. نتایج مشابه با کاربرد مپی‌کوات کلراید در پنبه مشاهده شده است (Luo et al., 2023).

جدول ۴- برهم‌کنش دُز × زمان مصرف مداخلات بر محتوای قندهای محلول و عملکرد دانه سورگوم علوفه‌ای

Table 4- Interaction effect of dose and application time of Medax Top on the soluble sugar content and grain yield of forage sorghum

تیمار Treatment		محتوای قندهای محلول Soluble sugar content (%)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)
دُز مصرف Dosage	زمان مصرف Timing		
شاهد Control	۳-۴ برگ	5.39 e*	1650 e
	3-4 leaf		
	۶-۸ برگ		
نیم لیتر در هکتار 0.5 L ha ⁻¹	6-8 leaf	5.39 e	1672 e
	۳-۴ برگ	5.62 d	2869 c
	3-4 leaf		
یک لیتر در هکتار 1.0 L ha ⁻¹	۶-۸ برگ		
	6-8 leaf	5.67 d	2297 d
	۳-۴ برگ	6.14 b	3502 b
دو لیتر در هکتار 2.0 L ha ⁻¹	3-4 leaf		
	۶-۸ برگ		
	6-8 leaf	6.01 c	3048 c
	۳-۴ برگ	6.60 a	3881 a
	3-4 leaf		
	۶-۸ برگ		
	6-8 leaf	6.64 a	3872 a

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.* Means followed by the same letter in each column are not significantly different ($P < 0.05$) according to the LSD test.

جدول ۵- اثر متقابل دُز مصرف مداکس تاپ و رقم بر محتوای نشاسته و کربوهیدرات‌های دانه و عملکرد علوفه سورگوم
Table 5- Interaction effect of Medax Top application dose and cultivar on starch and carbohydrate content of grain and forage yield of forage sorghum

تیمار Treatment		محتوای نشاسته دانه Grain starch content (%)	کل کربوهیدرات‌های دانه Total grain carbohydrates (%)	عملکرد علوفه Forage yield (kg ha ⁻¹)
دُز مصرف Dosage	رقم Cultivar			
شاهد Control	منصور Mansour	64.91 de*	70.55 f	18958 a
	بهشت Behesht	62.68 f	67.81 h	15043 c
نیم لیتر در هکتار 0.5 L ha ⁻¹	منصور Mansour	65.60 cd	71.45 e	16626 b
	بهشت Behesht	64.55 e	70.00 g	13184 d
یک لیتر در هکتار 1.0 L ha ⁻¹	منصور Mansour	67.86 b	74.18 c	14851 c
	بهشت Behesht	66.26 c	72.08 d	12107 e
دو لیتر در هکتار 2.0 L ha ⁻¹	منصور Mansour	69.48 a	76.19 a	11417 f
	بهشت Behesht	68.96 a	75.50 b	10926 g

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P<0.05) ندارند.

* Means followed by the same letter in each column are not significantly different (P<0.05) according to the LSD test.

عملکرد دانه

عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سال (در سطح احتمال یک درصد)، دُز و زمان مصرف مداکس تاپ و اثر متقابل آن‌ها (در سطح احتمال پنج درصد) قرار گرفت (جدول ۲). در سال دوم، میانگین عملکرد دانه (۳۳۵۵ کیلوگرم در هکتار) ۴۳ درصد بیشتر از سال اول (۲۳۴۴ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول ۳). این برتری احتمالاً به‌دلیل شرایط آب‌وهوایی مساعدتر برای تولید بذر در سال دوم است. به نظر می‌رسد که دمای پایین‌تر هوا در زمان مصرف مداکس تاپ در سال دوم (جدول ۱) به عملکرد بهتر آن کمک کرده است. در مقابل، گرمای هوا در زمان مصرف مداکس تاپ در سال اول (جدول ۱)، احتمالاً تجزیه مواد فعال مداکس تاپ را تسریع کرده و توانایی آن را در مهار تولید جیبرلین کاهش داده است (Rademacher, 2015).

با افزایش دُز مداکس تاپ از صفر به دو لیتر در هکتار، عملکرد دانه از ۱۶۶۱ به ۳۸۷۷ کیلوگرم در هکتار افزایش پیدا کرد، هرچند تفاوت معنی‌داری بین دُز یک و دو لیتر در هکتار مشاهده نشد. این نتایج با یافته‌های کامران و همکاران (Kamran et al., 2018) در ذرت هم‌راستا است که نشان دادند می‌کوات کلراید با کاهش رشد رویشی، عملکرد دانه را افزایش داد. همچنین نیکولوف و دلچف (Nikolov & Delchev, 2021) گزارش کردند که تنظیم‌کننده‌های رشد در گندم دوروم، فتوسنتز و تخصیص مواد فتوسنتزی به دانه را

بهبود می‌بخشد. مطالعات نشان داده‌اند که مهار جیبرلین‌ها توسط تنظیم‌کننده‌هایی مانند پروهگزا دیون کلسیم، تمرکز گیاه را به سمت تولید اندام‌های زایشی هدایت می‌کند (Han et al., 2011). کاربرد مداکس تاپ در مرحله ۳-۴ برگی نسبت به مرحله ۸-۶ برگی، عملکرد دانه را ۹/۳ درصد بهبود بخشید که نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاربرد زود هنگام است (جدول ۳). اثر متقابل دُز و زمان مصرف نیز نشان داد که در دُزهای نیم و یک لیتر در هکتار، کاربرد مداکس تاپ در مرحله ۳-۴ برگی نتیجه بهتری به دنبال دارد. به‌طوری که کاربرد نیم و یک لیتر در هکتار تنظیم‌کننده در مرحله ۳-۴ برگی باعث افزایش به‌ترتیب ۷۴ و ۱۱۲ درصدی وزن عملکرد دانه شد، درحالی که این افزایش در مرحله ۸-۶ برگی به‌ترتیب ۳۷/۴ و ۸۲/۴ درصد بود. این بهبود احتمالاً ناشی از تأثیر زود هنگام تنظیم‌کننده‌های رشد بر مسیرهای هورمونی گیاه به‌ویژه مهار سنتز جیبرلین‌ها در مراحل اولیه رشد است که منجر به کاهش رشد طولی ساقه و هدایت بیشتر مواد فتوسنتزی به سمت اندام‌های زایشی می‌شود (Storozhyk et al., 2022). بیشترین عملکرد دانه با مصرف دو لیتر در هکتار تنظیم‌کننده در مرحله ۳-۴ برگی به دست آمد، هرچند تفاوت معنی‌داری با مرحله ۸-۶ برگی در همین دُز مصرفی نداشت (جدول ۴). این عدم تفاوت معنی‌دار در دُز بالا احتمالاً به‌دلیل اشباع اثر مهار جیبرلین است، جایی که صرف نظر از زمان دقیق کاربرد، دُز کافی برای تأثیر حداکثری بر رشد زایشی فراهم می‌شود (Storozhyk et al., 2022).

این نتیجه‌گیری با یافته‌های مورتزا و همکاران (Murtza et al., 2022) در پنبه هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که زمان‌بندی دقیق کاربرد مداخلات می‌تواند عملکرد دانه را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد.

جدول ۶- برهم‌کنش سه گانه سال × دُز × زمان مصرف مداخلات بر محتوای قندهای محلول و عملکرد دانه سورگوم علوفه‌ای
Table 6- Interaction effect of year, dose and application time of Medax Top on the soluble sugar content and grain yield of forage sorghum

سال Year	تیمار Treatment		محتوای قندهای محلول Soluble sugar content (%)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)
	دُز مصرف Dosage	رقم Cultivar		
۱۴۰۲ 2023	شاهد Control	منصور Mansour	5.47 f*	1854 fg
		بهشت Behesht	5.12 g	1059 h
	نیم لیتر در هکتار 0.5 L ha ⁻¹	منصور Mansour	5.78 e	2094 ef
		بهشت Behesht	5.45 f	1733 g
	یک لیتر در هکتار 1.0 L ha ⁻¹	منصور Mansour	6.36 d	2669 d
		بهشت Behesht	5.77 e	2223 e
	دو لیتر در هکتار 2.0 L ha ⁻¹	منصور Mansour	6.88 a	3663 c
		بهشت Behesht	6.66 b	3457 c
	شاهد Control	منصور Mansour	5.82 e	2702 d
		بهشت Behesht	5.15 g	1030 h
	نیم لیتر در هکتار 0.5 L ha ⁻¹	منصور Mansour	5.92 e	3623 c
		بهشت Behesht	5.45 f	2884 d
۱۴۰۳ 2024	یک لیتر در هکتار 1.0 L ha ⁻¹	منصور Mansour	6.28 d	4542 a
		بهشت Behesht	5.88 e	3670 c
	دو لیتر در هکتار 2.0 L ha ⁻¹	منصور Mansour	6.54 bc	4114 b
		بهشت Behesht	6.41 cd	4274 b

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P<0.05) ندارند.

* Means followed by the same letter in each column are not significantly differentns (P<0.05) according to the LSD test.

شد، به‌نحوی که با مصرف دو لیتر در هکتار مداخلات، عملکرد این رقم در سال اول و دوم به‌ترتیب ۲۲۶ و ۳۱۵ درصد نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد، درحالی‌که این افزایش در رقم منصور به‌ترتیب ۹۷/۶ و ۵۲/۳ درصد بود. در دُز دو لیتر در هکتار تفاوت معنی‌داری بین دو رقم مشاهده نشد، ولی در سایر دُزها عملکرد دانه رقم منصور به‌طور معنی‌داری بیشتر از بهشت بود. این تفاوت‌ها احتمالاً به تنوع ژنتیکی

برهم‌کنش سه گانه سال × دُز × رقم برای این صفت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین عملکرد دانه رقم منصور در سال اول و دوم به‌ترتیب با مصرف دو و یک لیتر در هکتار تنظیم‌کننده به دست آمد، درحالی‌که در رقم بهشت در هر دو سال، بالاترین دُز بیشترین عملکرد را تولید کرد. بیشترین واکنش مثبت عملکرد دانه به افزایش دُز ماده تنظیم‌کننده در رقم بهشت مشاهده

برداشت نسبت به شاهد (با ارتفاع بوته ۲/۵۲ متر و شاخص برداشت ۸/۵۴ درصد) شد. (نتایج نشان داده نشده‌اند).
نسبت به مرحله ۳-۴ برگی، کاربرد مداخلات در مرحله ۸-۶ برگی اثر منفی کمتری بر عملکرد علوفه داشت. رقم منصور با عملکرد علوفه ۱۵۴۶۳ کیلوگرم در هکتار نسبت به رقم بهشت با میانگین ۱۲۸۱۵ کیلوگرم در هکتار برتری معنی‌داری داشت (جدول ۳). اثر متقابل دُز × رقم نیز نشان داد که کاهش عملکرد علوفه با افزایش دُز در رقم منصور شدیدتر است، با این حال رقم منصور در تمام مقادیر مصرف مداخلات، عملکرد علوفه بالاتری نسبت به رقم بهشت داشت (جدول ۵). این کاهش در عملکرد علوفه احتمالاً نتیجه تغییر تخصیص منابع فتوسنتزی به سمت تولید بذر است که با یافته‌های دونگ و همکاران (Duong et al., 2024) در ذرت هم‌راستا است. به‌طور مشابه، کاربرد میو کوات کلراید در گیاه پنبه باعث کاهش رشد برگ‌ها و ساقه‌ها شد (Gao et al., 2019). گولادا و همکاران (Golada et al., 2013) نیز مشاهده کردند که کاربرد میو کوات موجب کاهش معنی‌دار عملکرد علوفه ذرت گردید. کاربرد پروهگزادیون کلسیم در ذرت نیز باعث کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک اندام‌های هوایی شده است (Duong et al., 2024). بر این اساس می‌توان ادعان داشت در شرایطی که هدف اصلی تولید هم‌زمان بذر و علوفه باشد، استفاده از دُزهای پایین‌تر مداخلات توصیه می‌شود.

درصد جوانه‌زنی بذر

درصد جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) تحت تأثیر دُز مداخلات قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش دُز از صفر به دو لیتر در هکتار، میانگین جوانه‌زنی از ۹۱/۹۲ به ۹۷/۷۵ درصد افزایش یافت (جدول ۳). این بهبود شش درصدی نشان‌دهنده تأثیر مثبت مداخلات بر متابولیسم بذر و ذخیره مواد غذایی و کیفیت فیزیولوژیک بذر است که می‌تواند قابلیت کشت بذور را افزایش دهد. بین دو رقم و سال‌های آزمایش تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد که بیانگر پایداری این اثر در شرایط مختلف است. این نتایج برای تولید بذر با کیفیت و قابل اعتماد در سورگوم علوفه‌ای اهمیت زیادی دارد. همان‌طور که از گزارش دیونگ و همکاران (Duong et al., 2024) استنباط می‌شود، این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که مداخلات می‌تواند با تغییر توازن رشد رویشی و زایشی، ابزار مؤثری برای دستیابی به اهداف مختلف زراعی (از جمله تولید بذر با کیفیت) باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که کاربرد تنظیم‌کننده رشد مداخلات می‌تواند به‌طور مؤثری عملکرد دانه، کیفیت بذر و ویژگی‌های

در حساسیت به تنظیم‌کننده‌ها و متابولیسم هورمونی مربوط است که می‌تواند در انتخاب ارقام مناسب برای شرایط خاص مورد توجه قرار گیرد. مطالعات مشابه در سایر محصولات مانند گندم (Bozek et al., 2019) نیز تفاوت‌های ژنوتیپی در پاسخ به تنظیم‌کننده‌های رشد را تأیید کرده‌اند. حداکثر عملکرد دانه (۴۵۴۲ کیلوگرم در هکتار) در رقم منصور و با دُز یک لیتر در هکتار در سال دوم به دست آمد (جدول ۶). نتایج مطالعات متعدد نشان می‌دهد که پروهگزادیون کلسیم و میو کوات کلراید (دو ترکیب مؤثر در تنظیم‌کننده رشد مداخلات) با سازوکار مهار تولید جیبرلین‌ها موجب کنترل رشد طولی ساقه، افزایش استحکام مکانیکی ساقه و در نتیجه کاهش پدیده خوابیدگی (ورس) در گندم شده‌اند، ضمن اینکه این ترکیبات از طریق بهینه‌سازی توزیع مواد فتوسنتزی و هدایت آن‌ها به سمت اندام‌های زایشی، نقش مؤثری در افزایش کمی و کیفی عملکرد دانه ایفا می‌کنند (Bozek et al., 2019; Mykhalska et al., 2019; Kolev & Todorov, 2023). پژوهش دیگری نشان داد که کاربرد پروهگزادیون کلسیم در بادام زمینی منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد شد (Studstill et al., 2020).

عملکرد علوفه (ساقه و برگ)

عملکرد علوفه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دُز، سال × دُز، رقم و دُز × رقم در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت. همچنین اثر سال و زمان مصرف بر این صفت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). حداقل ارتفاع بوته، در هر دو رقم با مصرف دو لیتر در هکتار مداخلات در سال دوم به دست آمد که کاهش ۴۶/۸ و ۵۳/۱ درصدی را به‌ترتیب برای رقم منصور و بهشت نسبت به شاهد نشان داد، درحالی‌که این کاهش در سال اول به‌ترتیب ۳۱/۸ و ۲۹/۱ درصد بود. شاخص برداشت در سال دوم ۵۶/۳ درصد بیشتر از سال اول بود. با افزایش دُز مصرف تنظیم‌کننده، شاخص برداشت به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، به‌نحوی که کاربرد ۱،۰۵ و ۲ لیتر در هکتار مداخلات باعث افزایش به‌ترتیب ۷۴/۷، ۱۲۸/۸ و ۱۹۷/۴ درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد شد. عملکرد علوفه در سال اول (۱۵۵۲۹ کیلوگرم در هکتار) به‌طور معنی‌داری بیشتر از سال دوم (۱۲۷۴۹ کیلوگرم در هکتار) بود. با افزایش دُز مداخلات از صفر به دو لیتر در هکتار، عملکرد علوفه از ۱۷۰۰۱ به ۱۱۱۷۱ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت (جدول ۳). این کاهش ۳۴ درصدی به‌وضوح نشان‌دهنده تغییر الگوی توزیع مواد فتوسنتزی از اندام‌های رویشی به زایشی است. کاهش عملکرد علوفه با افزایش دُز مصرف مداخلات، می‌تواند با کاهش ارتفاع بوته و افزایش شاخص برداشت تحت تأثیر تنظیم‌کننده رشد مرتبط باشد، به‌نحوی که کاربرد نیم، یک و دو لیتر در هکتار مداخلات باعث کاهش به‌ترتیب ۱۲، ۲۵ و ۴۰ درصدی ارتفاع بوته و افزایش به‌ترتیب ۷۵، ۱۲۹ و ۱۹۷ درصدی شاخص

همزمان بذر و علوفه، دُرهای پایین‌تر (نیم یا یک لیتر در هکتار) مناسب‌تر هستند تا از کاهش بیش از حد عملکرد علوفه جلوگیری شود. این یافته‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی مدیریت زراعی مزارع تولید بذر ارقام آزادگرده‌افشان سورگوم در شرایط نیمه‌خشک کشور کمک کنند و بینش‌های جدیدی را در مورد نقش تنظیم‌کننده‌های رشد بر افزایش پایداری تولید ارائه دهند. برای تحقیقات آینده، می‌توان تأثیر مداخلات در ترکیب با تنش‌های محیطی را مورد بررسی قرار داد. علاوه بر این، ارزیابی اثرات بلندمدت مداخلات بر خاک و محیط زیست، به‌منظور تکمیل این نتایج و توسعه توصیه‌های جامع‌تر ضروری به نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی در اجرای این پروژه تحقیقاتی با کد مصوب ۰۳-۰۳-۰۳۰۵-۰۲۴-۰۱۰۳۱۲ و همچنین از حمایت‌های معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تربیت مدرس سپاسگزاری می‌شود.

فیزیولوژیک ارقام آزادگرده‌افشان سورگوم علوفه‌ای را بهبود بخشد. با افزایش دُر مصرف مداخلات پاپ از صفر تا دو لیتر در هکتار به‌ویژه در مرحله ۳-۴ برگ، عملکرد دانه و محتوای نشاسته و کربوهیدرات‌های دانه افزایش پیدا کردند. با این حال، دُر دو لیتر در هکتار مداخلات پاپ با محدود کردن رشد رویشی و هدایت بیشتر منابع گیاهی به سمت اندام‌های زایشی منجر به کاهش عملکرد علوفه شد، که نشان‌دهنده یک رابطه معکوس بین تولید دانه و علوفه است. در مقابل، دُر یک لیتر در هکتار به‌عنوان نقطه بهینه برای تولید هم‌زمان دانه و علوفه شناسایی شد، زیرا افزایش عملکرد دانه را بدون کاهش شدید عملکرد علوفه فراهم می‌کند و تعادل مناسبی بین دو هدف زراعی برقرار می‌نماید، که این امر از منظر فیزیولوژیک به‌دلیل تأثیر متوسط بر کاهش شاخص سطح برگ و حفظ بخشی از رشد رویشی توجیه‌پذیر است. رقم منصور در مقایسه با رقم بهشت در اکثر صفات مورد بررسی عملکرد بهتری نشان داد و به‌عنوان ژنوتیپ برتر شناسایی شد، که این برتری احتمالاً ریشه در تفاوت‌های ژنتیکی در حساسیت به تنظیم‌کننده‌های رشد و کارایی متابولیسم کربوهیدرات دارد. به‌طور کلی، اگر هدف فقط تولید بذر با کیفیت باشد، کاربرد دُر دو لیتر در هکتار مداخلات پاپ در مرحله ۳-۴ برگ توصیه می‌شود تا حداکثر منابع گیاهی به رشد زایشی اختصاص یابد؛ درحالی‌که برای تولید

References

1. Baghdadi, A., Golzardi, F., & Hashemi, M. (2023). The use of alternative irrigation and cropping systems in forage production may alleviate the water scarcity in semi-arid regions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(10), 5050-5060. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12574>
2. Bozek, K. S., Winnicki, T., & Zuk-Golaszewska, K. (2019). The effects of seeding rate, mineral fertilization and a growth regulator on the economic and energy efficiency of durum wheat production. *Acta Scientiarum Polonorum Agricultura*, 18(3), 133-144.
3. Constantinescu, E., Nițu, R., & Muscalu, A. (2021). Study regarding the behavior of some varieties of wheat, in ecopedological conditions, from the south-west area of Dolj county. *Annals of the University of Craiova - Agriculture, Montanology, Cadastre Series*, 51(1), 85-96. <https://doi.org/10.52846/AAMC.2021.01.11>
4. DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
5. Duong, M. V., Chung, J. W., Ha, V. G., Moon, H., Yu, J. K., & So, Y. S. (2024). Prohexadione-calcium mitigates the overgrowth of corn seedlings. *Agronomy*, 14(2), 371. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020371>
6. Gao, H., Ma, H., Khan, A., Xia, J., Hao, X., Wang, F., & Luo, H. (2019). Moderate drip irrigation level with low mepiquat chloride application increases cotton lint yield by improving leaf photosynthetic rate and reproductive organ biomass accumulation in arid region. *Agronomy*, 9(12), 834. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120834>
7. Ghalkhani, A., Golzardi, F., Khazaei, A., Mahrokh, A., Illés, Á., Bojtor, C., Mousavi, S. M. N., & Széles, A. (2023). Irrigation management strategies to enhance forage yield, feed value, and water-use efficiency of sorghum cultivars. *Plants*, 12(11), 2154. <https://doi.org/10.3390/plants12112154>
8. Golada, S. L., Sharma, G. L., & Jain, H. K. (2013). Performance of baby corn (*Zea mays* L.) as influenced by spacing, nitrogen fertilization and plant growth regulators under sub humid condition in Rajasthan, India. *African Journal of Agricultural Research*, 8(12), 1100-1107. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1920>
9. Han, L. P., Guo, X., Yu, Y., Duan, L., Rao, M. S., & Xie, G. H. (2011). Effect of prohexadione-calcium, maleic hydrazide and glyphosine on lodging rate and sugar content of sweet sorghum. *Research on Crops*, 12(1), 230-238.
10. Hedge, J. E., & Hofreiter, B. T. (1962). Methods in Carbohydrate Chemistry. R. L. Whistler & J. N. BeMiller (Eds.). New York: Academic Press, 17, 420.

11. Junior, J. F., Souza, C. A., Pinheiro, M. G., Silva, E. R., & da Silva, A. L. P. (2021). Morpho-physiological responses of maize hybrids as a function prohexadione calcium doses applied in the vegetative phase. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 27(1), 167-178.
12. Kamran, M., Ahmad, I., Wang, H., Wu, X., Xu, J., Liu, T., Ding, R., & Han, Q. (2018). Mepiquat chloride application increases lodging resistance of maize by enhancing stem physical strength and lignin biosynthesis. *Field Crops Research*, 224, 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.011>
13. Kolev, T., & Todorov, Z. (2023). Testing of retardants on durum wheat. *Scientific Papers, Series A, Agronomy*, 66(1), 378-383.
14. Liu, M., Feng, N., Zheng, D., & Meng, F. (2025). Comparative study of the mechanisms underlying the effects of prohexadione-calcium and gibberellin on the morphogenesis and carbon metabolism of rice seedlings under NaCl stress. *Plants*, 14(8), 1240. <https://doi.org/10.3390/plants14081240>
15. Luo, H., Zhang, Z., Wu, J., Wu, Z., Wen, T., & Tang, F. (2023). Effects of mepiquat chloride and plant population density on leaf photosynthesis and carbohydrate metabolism in upland cotton. *Journal of Cotton Research*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s42397-023-00157-8>
16. Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426-428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
17. Mirahki, I., Ardakani, M. R., Golzardi, F., Paknejad, F., Mahrokh, A., & Faraji, S. (2023). Yield, water use efficiency and silage feeding value of sorghum cultivars as affected by planting date and planting method. *Gesunde Pflanzen*, 75(5), 1963-1973. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00822-z>
18. Murta, K., Ishfaq, M., Akbar, N., Hussain, S., Anjum, S. A., Bukhari, N. A., AlGarawi, A. M., & Hatamleh, A. A. (2022). Effect of mepiquat chloride on phenology, yield and quality of cotton as a function of application time using different sowing techniques. *Agronomy*, 12(5), 1200. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051200>
19. Mykhalska, L. M., Makoveychuk, T. I., & Schwartau, V. V. (2019). Application of fertilizer megafol and retardants of acylcyclohexadione class on winter wheat crops. *Plant Physiology and Genetics*, 51(6), 541-548. <https://doi.org/10.15407/frg2019.06.541>
20. Nikolov, P., & Delchev, G. (2021). Photosynthetic activity and productivity of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) affected by certain preparations and various terms of sowing. *Agricultural Science and Technology*, 13(3), 250-254. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.03.039>
21. Ozbay, N., & Metin, R. (2020). Effects of prohexadione-calcium application on vegetative and generative growth of pepper plants. p. 573-585. In: A. K. Tiwari (Eds). *Advances in Seed Production and Management*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4198-8_28
22. Pourali, S., Aghayari, F., Ardakani, M. R., Paknejad, F., & Golzardi, F. (2023). Benefits from intercropped forage sorghum-red clover under drought stress conditions. *Gesunde Pflanzen*, 75(5), 1769-1780. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00833-4>
23. Priyadarshini, M., Santhosh Kumar, G., Nagabhushanam, U., & Pavan Chandra Reddy, K. (2023). Effect of different doses and scheduling time of plant growth regulators and defoliant on growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under high density planting system. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 2252-2260. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i102888>
24. Rademacher, W. (2015). Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34, 845-872. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9541-6>
25. Shallal, I. M., Aboud, N. M., & Hamdan, M. I. (2020). Sorghum genotypic responses to some growth retardants. *International Journal of Agricultural & Statistical Sciences*, 16, 1311-1315. <https://connectjournals.com/03899.2020.16.1311>
26. Storozhyk, L., Humentyk, M., Sviridov, A., & Svyrydova, L. (2022). Optimal time of plant growth regulator application to *Sorghum* canopy according to BBCH and Kuperman crop growth scales. *Plant and Soil Science*, 13(4), 45. [https://doi.org/10.31548/agr.13\(4\).2022.46-56](https://doi.org/10.31548/agr.13(4).2022.46-56)
27. Studstill, S. P., Monfort, W. S., Tubbs, R. S., Jordan, D. L., Hare, A. T., Anco, D. J., Sarver, J. M., Ferguson, J. C., Faske, T. R., Creswell, B. L., & Tyson, W. G. (2020). Influence of prohexadione calcium rate on growth and yield of peanut (*Arachis hypogaea*). *Peanut Science*, 47(3), 163-172. <https://doi.org/10.3146/PS20-11.1>
28. Tavazoh, M., Habibi, D., Golzardi, F., Ilkaee, M. N., & Paknejad, F. (2024). Effect of drought stress on morpho-physiological characteristics, nutritive value, and water-use efficiency of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] varieties under various irrigation systems. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e286121. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.286121>



Calibration and Validation of SSM-iCrop2 Model for Simulating the Growth and Yield of Lentil (*Lens culinaris* Medik.)

Z. Amani¹, F. Mondani^{1*}, M. Ghobadi¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding author's Email: f.mondani@razi.ac.ir)

Received: 16 July 2025

Revised: 25 October 2025

Accepted: 29 October 2025

Available Online: 02 December 2025

How to cite this article:

Amani, Z., Mondani, F., & Ghobadi, M. (2026). Calibration and validation of SSM-iCrop2 model for Simulating the growth and yield of lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 263-280. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94482.1417>

Introduction

Lentil is the third most important legume in the cold-season legume family. Legumes, as the second most important food source after cereals, account for about 613000 hectares of the annual cultivated area of crops in Iran. In terms of cultivated area, lentil is in third place among legumes after chickpeas and beans, and the provinces of Hamedan, Lorestan, Kerman, Fars and Bushehr are the main centers of production of this plant. Crop growth simulation models can play an important role in allowing farmers and planners to make decisions about the feasibility of systems (crops and technologies). These useful tools greatly facilitate the optimization of crop production and management strategies. Crop growth models also provide a useful tool in researches to simulate potential growth and yield. The aim of this study was to calibrate and validate the SSM-iCrop2 model for simulation of growth and yield of lentil in order to investigate the effect of sowing date and different irrigation under Kermanshah and Azna regions using the sub models associated with phenology, dry matter production and distribution and the changes in leaf area.

Materials and Methods

This study was conducted at Agricultural and Natural Resources, Razi University and in a leading farmer's farm in the Azna region. The SSM-iCrop2 model was used. This model has been tested and proved for a wide range of crops. This model requires limited and easily available input information. In order to collect the necessary information for model calibration and evaluation, experiments were conducted using a split factorial design with three replications in 2022 and 2023. In this way, one experiment was conducted to extract the parameters required for model calibration under the Kermanshah region in 2022, and then two other experiments were conducted to extract the information required to model validation under the Kermanshah and Azna regions in 2023. Treatments included supplementary irrigation (no irrigation, one irrigation at flowering stage, and two irrigations at flowering and seed filling stages) as the main factor, sowing date (February 17, March 21, March 20 for Kermanshah, March 6, 16, and 24 for Azna), and cultivar (Bile Savar, Kimia, and Gachsaran) as secondary factors. Measured data of phenological development stages and grain yield were used to evaluate the model. Model evaluation indices included linear regression fitting between observed and simulated data and their comparison with the slope of the 1:1 line, root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (nRMSE), mean error of approximation (MBE), and Wilmot's agreement index (d).

Results and Discussion



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

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94482.1417>

The model calibration results indicated appropriate accuracy of the plant parameter values used in the model structure, which led to very accurate prediction of growth and yield characteristics. The evaluation results showed acceptable accuracy of SSM-iCrop2 in simulating the process of changes in developmental stages and grain yield of cultivars in the studied treatments. The RMSE value of the developmental stage from sowing to physiological maturity in Kermanshah for the cultivars Bileh Savar, Kimia and Gachsaran was 2.5, 2.5 and 3.4 days, respectively, and in Azna it was 12.9, 12.5 and 11.8 days, respectively. The RMSE value of grain yield in Kermanshah ranged from 1.4 to 2.15 and from 4 to 7 g m⁻² in Azna. Several studies have been conducted on the evaluation of the SSM-iCrop2 model in simulating grain yield in different crops. Among them is the research on soybean by Nehbandani et al. (2015), who reported satisfactory results regarding the model evaluation. They stated that this model can be used to determine the most suitable sowing and harvesting dates, grain yield, and other phenological stages of soybean.

Conclusion

The results indicated that the SSM-iCrop2 model accurately estimated the phenological development and grain yield of lentil cultivars. Despite variations in sowing dates and irrigation regimes, the model successfully simulated lentil growth and yield using a relatively small number of input parameters. Model evaluation demonstrated that SSM-iCrop2 can accurately simulate the developmental stages and grain yield of lentil in the Kermanshah and Azna regions. Based on these findings, the model is suitable for predicting lentil growth and yield and can be applied to studies assessing lentil performance under diverse climatic conditions and management practices.

Keywords: Grain yield, Parameterization, Phenology, Simulation

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۸۰-۲۶۳

واسنجی و تعیین اعتبار مدل SSM-iCrop 2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد عدس
(*Lens culinaris* Medik.)

زینب امانی^۱، فرزاد مندنی^{۱*}، مختار قبادی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

چکیده

پژوهش حاضر به منظور تخمین پارامترهای مدل SSM-iCrop2 و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشد و نمو عدس (*Lens culinaris* Medik.) انجام شد. به منظور جمع‌آوری داده‌های لازم برای واسنجی و ارزیابی مدل، آزمایش‌هایی به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی و شهرستان ازنا طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ اجرا گردید. تیمارها شامل رژیم آبیاری (بدون آبیاری، یک بار آبیاری در مرحله گل‌دهی و دو بار آبیاری در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه) به عنوان عامل اصلی، تاریخ کشت (۲۷ بهمن، ۹ اسفند، ۲۱ اسفند برای کرمانشاه و ۶ و ۱۶ و ۲۴ اسفند برای ازنا) و رقم (بیله سوار، کیمیا و گچساران) به عنوان فاکتور فرعی بود. نتایج واسنجی مدل حاکی از دقت مناسب مقادیر پارامترهای گیاهی به کاررفته در ساختار مدل بود که منجر به پیش‌بینی بسیار دقیق ویژگی‌های رشد و عملکرد شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان از دقت قابل قبول SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی روند تغییرات مراحل نمو و عملکرد دانه ارقام در تیمارهای مورد بررسی داشت. مقدار RMSE مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در کرمانشاه برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب ۵/۲، ۴/۳ و ۵/۲ روز و در ازنا به ترتیب ۱۲/۹، ۱۲/۵ و ۱۱/۸ روز بود. مقدار RMSE عملکرد دانه در کرمانشاه از ۴/۱ تا ۱۵/۲ و ازنا از چهار تا هفت گرم در مترمربع بود. بنابراین می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای بررسی وضعیت مدیریت زراعی و تجزیه و تحلیل رشد و عملکرد عدس در شرایط کرمانشاه و ازنا استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پارامترسازی، شبیه‌سازی، عملکرد دانه، مراحل نمو

مقدمه

دارد و تقریباً ۴۴ درصد از تولید جهانی را به خود اختصاص داده است و پس از آن هند، استرالیا، ترکیه و ایالات متحده قرار دارند. این پنج کشور ۸۲ درصد از کل تولید جهانی عدس را به خود اختصاص داده‌اند (FAO, 2023). حبوبات به عنوان دومین منبع مهم غذایی بعد از غلات حدود ۶۱۳ هزار هکتار از سطح زیرکشت سالانه محصولات زراعی را در ایران تشکیل می‌دهند. از نظر سطح زیرکشت، عدس بعد از نخود و لوبیا جایگاه سوم را در بین حبوبات داشته و استان‌های همدان، لرستان، کرمان، فارس و بوشهر مراکز اصلی تولید این گیاه هستند (Ministry of Agriculture, 2023). پروتئین دانه عدس در مقایسه با دیگر حبوبات، مانند نخود کیفیت بالاتری دارد (Oduro- Yeboah et al., 2023). کشت عدس به دلیل داشتن مقدار قابل توجهی مواد آلی و توانایی تثبیت نیتروژن از طریق همزیستی، نقش مهمی در حفظ و بهبود حاصلخیزی خاک ایفا می‌کند (Abraham, 2015).

در بین حبوبات، عدس (*Lens culinaris* Medik.) یک گیاه دانه‌ای یکساله است که از ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد به عنوان اولین محصول اهلی شده است (Erskine et al., 2016). عدس یک محصول مغذی مهم است که به دلیل محتوای بالای مواد مغذی پرمصرف و کم‌مصرف، از جمله مواد معدنی، در سراسر جهان کشت و مصرف می‌شود (Benayad & Aboussaleh, 2021). این محصول سومین حبوبات مهم فصل سرد پس از نخود (*Cicer arietinum* L) و نخودفرنگی (*Pisum sativum* L.) در سراسر جهان است (Sehgal et al., 2021). کانادا با تولید ۲/۸۷ میلیون تن عدس در رتبه اول قرار

۱- گروه تولیدات گیاهی و ژنتیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(Email: f.mondani@razi.ac.ir)
* - نویسنده مسئول:
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94482.1417>

که شامل تقسیم ماده خشک بین برگ، ساقه، ریشه و اندام زایشی است و زیر مدل عملکرد نهایی^۶ که شامل تبدیل ماده خشک تجمع یافته به دانه یا اندام اقتصادی است (Soltani & Sinclair, 2012).

عملکرد مدل های گیاهی در شبیه سازی پاسخ گیاه به عوامل اقلیمی، خاکی، مدیریتی و ژنتیکی تا حدود زیادی به داده های ورودی و کیفیت پارامتریابی بستگی دارد (Manschadi et al., 2022). مدل های گیاهان زراعی از پارامترهای مختلف گیاهی و محیطی برای شبیه سازی رشد محصول استفاده می کنند و قبل از به کارگیری این مدل ها باید آن ها را پارامتریابی و سپس ارزیابی نمود (Hsiao et al., 2009). پارامتریابی عبارتست از تعیین پارامترها و ضرایب مدل برای منطقه مورد مطالعه به منظور تصحیح مراحل فنولوژی و عملکرد (Soltani & Sinclair, 2012). در تحقیقی که با هدف پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه سازی رشد و عملکرد لوبیای معمولی در ایران انجام گردید، گزارش شد که می توان از این مدل برای بررسی سیستم های زراعی و تفسیر نتایج در شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت در جهت بهبود مدیریت مزارع لوبیا (Phaseolus vulgaris L.) با اطمینان استفاده کرد (Mohammadi et al., 2022). در مطالعه ای دیگر که به منظور تخمین پارامترهای SSM-iCrop و ارزیابی کارایی آن در پیش بینی رشد و نمو گیاه باقلا (Vicia faba L.) در گرگان انجام شده بود، نتایج نشان داد که با استفاده از پارامترهای به دست آمده، ارزیابی مدل حاکی از دقت قابل قبول مدل برای پیش بینی فنولوژی، شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه گیاه باقلا است (Torabi et al., 2020). مدل SSM-iCrop به واسطه دارا بودن مزیت هایی مانند تسهیل آزمون، کاربرد و درک تفسیر و نتایج و نیاز به حداقل ورودی ها در تجزیه و تحلیل عملکرد کاربرد بالایی دارد (Rahban et al., 2020). بنابراین پژوهش حاضر با هدف تخمین پارامترهای مدل SSM-iCrop2 برای گیاه عدس (ارقام بیلہ سوار، کیمیا و گچساران) و ارزیابی کارایی آن در پیش بینی رشد و نمو این گیاه در شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا انجام شد.

مواد و روش ها

به منظور تهیه داده ها و اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2، پژوهش هایی در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی و شهرستان ازنا در مزرعه یک کشاورز پیشرو طی سال های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام گرفت. به این صورت که یک آزمایش به منظور استخراج پارامترهای مورد نیاز

برای افزایش بهره وری کشاورزی و سودآوری مزرعه، تعیین کمیت تعاملات بین خاک، رشد گیاه، عوامل محیطی و شیوه های مدیریتی بسیار مهم است. این امر به سیاست گذاران و کشاورزان در تصمیم گیری آگاهانه برای کاهش خطرات مرتبط با بهره وری کشاورزی کمک می کند (Banerjee). مدل سازی رشد گیاه اجازه می دهد تا فرضیه های مختلفی را آزمایش کرده و آزمایش های مجازی در مورد فرآیندهای رشد گیاه انجام شود که در غیر این صورت ممکن است این آزمایش ها به مدت زمان طولانی در شرایط مزرعه نیازمند باشد. انواع مختلفی از مدل های رشد گیاه، با درجات مختلف پیچیدگی، بسته به هدف از کاربرد آن ها وجود دارد (Fourcaud et al., 2008). SSM^۱ به گروهی از مدل های شبیه سازی گیاهی اطلاق می شود که ساخت آن ها به سال ۱۹۸۶ برمی گردد. در این زمان، سینکسر مدلی برای رشد و نمو سویا (*Glycin max* L.) تهیه کرد (Sinclair, 1986). طی ۳۰ سال بعد، ساختار این مدل بهبود یافت و تقریباً برای همه گیاهان زراعی قابل استفاده شد (Soltani et al., 2013). این مدل توانایی شبیه سازی مراحل نمو فیزیولوژیک (سبز شدن، شروع مؤثر پُر شدن دانه، پایان مؤثر پُر شدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی)، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. مدل شبیه سازی محصول SSM iCrop2N یک مدل ساده شده از مدل های محصول SSM است که برای شبیه سازی رشد، نمو و عملکرد محصولات مختلف در شرایط محیطی مختلف و برآورد مقیاس بزرگ تولید محصول به ویژه در ارزیابی اثرات اقلیمی مناسب است (Soltani et al., 2020). این مدل دارای کد باز بوده و از محیط اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می کند. همچنین این مدل، شبیه سازی را به صورت روزانه انجام می دهد و از اطلاعات قابل دسترس آب و هوا، خاک و مدیریتی استفاده می کند. همچنین این مدل اثر آفات، بیماری ها و علف هرز را بر روی گیاه در نظر نمی گیرد. ساختار کلی مدل SSM به صورت مدل های ماژولار معرفی می شود که شامل چند زیر مدل اصلی است. زیر مدل فنولوژی^۲ که شامل مراحل فنولوژیک در مدل به عنوان تابعی از دما، طول روز و تنش کمبود آب است. زیر مدل توسعه سطح برگ^۳ که تعیین کننده گسترش سطح برگ و شاخص سطح برگ است. گسترش و پیری برگ ها تابعی از دما، مواد فتوسنتزی فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن است. زیرمدل تولید ماده خشک^۴ که در آن تولید ماده خشک به عنوان تابعی از تابش دریافت شده و دما تخمین زده می شود. زیرمدل تخصیص ماده خشک^۵

- 1- Simple Simulation Models
- 2- Phenology sub-model
- 3- Leaf Area Development
- 4- Dry Matter Production
- 5- Partitioning/Allocation

محل آزمایش مشخص گردید (جدول ۱). شهرستان کرمانشاه از نظر اقلیمی به‌عنوان اقلیم معتدل و نیمه‌خشک (مدیترانه‌ای) با میانگین دمای ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد محسوب می‌شود. شهرستان ازنا نیز با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۸۷۰ متر است. اطلاعات هواشناسی مناطق مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای واسنجی مدل تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه در سال ۱۴۰۰ و سپس دو آزمایش دیگر جهت استخراج اطلاعات مورد نیاز برای تعیین اعتبار مدل تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا در سال ۱۴۰۱ اجرا گردید. موقعیت منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شهرستان کرمانشاه با طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر بود. آنالیز خاک قبل از کاشت در دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ انجام شد و در نهایت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در هر دو

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در محل اجرای آزمایش

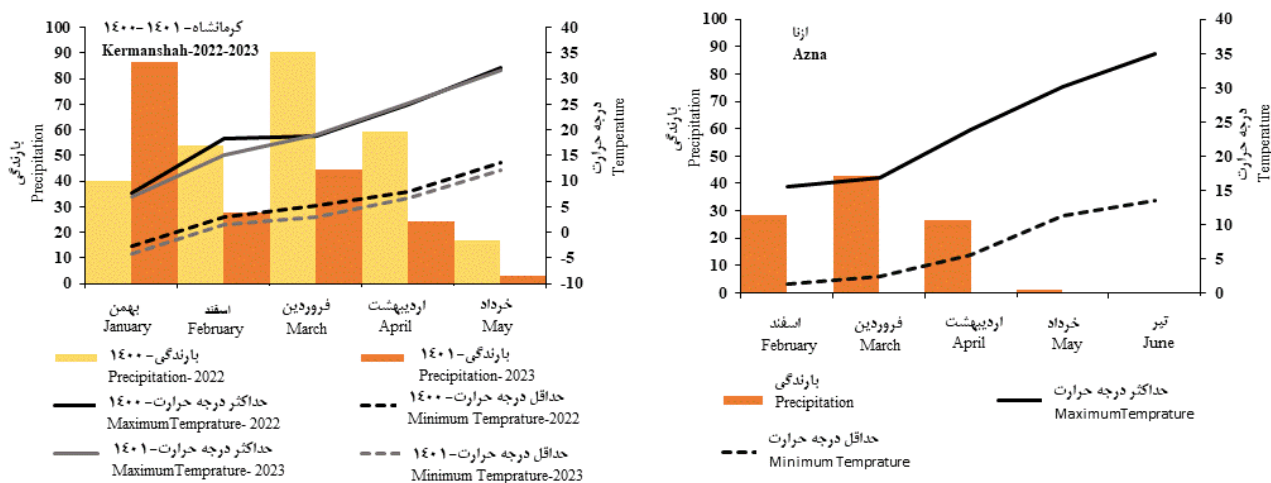
Table 1- Soil physical and chemical traits in the region of experiment

منطقه Region	عمق Depth	کربن آلی Organic C (%)	شیب Slope	حد ظرفیت زراعی DUL (m)	مقدار آب در زمان اشباع SAT (m)	شماره منحنی خاک CN	نقطه پژمردگی LL (m)	زهکشی DRAINF
کرمانشاه Kermanshah	30	1.50	10	0.32	0.49	79	0.22	0.55
	60	1.10	10	0.32	0.49	79	0.22	0.55
ازنا Azna	30	1.8	10	0.35	0.45	79	0.23	0.55
	60	1.2	10	0.35	0.45	79	0.23	0.55

DUL: محتوای حجمی آب خاک در حد بالایی زهکشی‌شده، SAT: محتوای حجمی آب خاک در حالت اشباع، CN: شماره منحنی، LL: محتوای آب خاک در لایه L خاک در حد پایینی گیاه و

DRAINF: ضریب زهکشی

DUL: volumetric soil water content at drained upper limit, SAT: volumetric soil water content at saturation, CN: curve number, LL: soil water content in soil layer L at lower limit of plant and DRAINF: drainage factor



شکل ۱- میانگین حداقل و حداکثر دماهای ماهانه و بارندگی تجمعی در طول فصل رشد عدس در کرمانشاه و ازنا

Figure 1- Average of minimum and maximum monthly temperatures and cumulative precipitation during the lentil growing season in Kermanshah and Azna

غلاف‌دهی) به‌عنوان عامل اصلی و تاریخ کشت و رقم به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. ارقام مورد مطالعه شامل سه رقم بیل‌سوار (ILL6037)، کیمیا (FLIP 92-12L) و گچساران بودند. ارقام در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

آزمایش‌ها به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری تکمیلی (بدون آبیاری)، یک بار آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و دو بار آبیاری تکمیلی در مراحل گل‌دهی و شروع

جدول ۲- خصوصیات ارقام مورد بررسی

Table 2- Characteristics of the studied cultivars

رقم Cultivar	طول دوره رشد Growth period (Day)	پتانسیل عملکرد Yield potential (kg ha ⁻¹)	وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight (g)
کیمیا Kimiya	90-110	1263	5
بیلہ سوار Bilehsavar	90-110	1196	5.7
گچساران Gachsaran	90-110	1200	5

مورد نظر، کشت بذر ضد عفونی شده (مانکوزب با غلظت دو در هزار) عدس به صورت دستی در عمق سه سانتی متری کشت گردید. مه‌ار علف‌های هرز به صورت وجین دستی انجام گرفت. کود اوره به میزان ۴۰ کیلوگرم در هکتار در دو نوبت (شش برگچه‌ای و قبل از گل‌دهی) تقسیم گردید. آبیاری تکمیلی توسط لوله پلی‌اتیلن و نوار تیپ و به صورت قطره‌ای در مراحل نمو گل‌دهی و پر شدن دانه انجام گرفت. حجم آب ورودی به هر کرت توسط کنتور اندازه‌گیری شد (جدول ۳).

کشت به صورت بهار انجام گرفت. تاریخ کشت در منطقه کرمانشاه بر مبنای بارندگی مؤثر (اولین بارندگی کافی برای جوانه‌زنی و استقرار گیاه) در تاریخ‌های ۲۷ بهمن، ۹ اسفند و ۲۱ اسفند و در منطقه ازنا بر مبنای بارندگی مؤثر شامل ۶ اسفند، ۱۶ اسفند و ۲۴ اسفند بود. آماده‌سازی و تسطیح زمین قبل از کشت با توجه به تاریخ کشت با استفاده از گاواهن قلمی انجام گرفت. ابعاد هر کرت فرعی ۲/۲۵ در سه متر، فاصله روی ردیف ۲/۵ سانتی متر، فاصله بین ردیف ۲۵ سانتی متر و فاصله بین رژیم‌های آبیاری سه متر در نظر گرفته شد. هر کرت فرعی شامل چهار ردیف کشت بود. سپس در تاریخ‌های

جدول ۳- میزان آب آبیاری و زمان مصرف آب آبیاری تکمیلی برای مناطق کرمانشاه و ازنا

Table 3- Irrigation water amount and time of supplementary irrigation consumed for Kermanshah and Azna regions

منطقه Region	تاریخ کشت Sowing date	زمان اعمال تیمار آبیاری (روز پس از کاشت) Irrigation timing (day after planting)		حجم آبیاری Irrigation volume (mm)	
		یک بار آبیاری Single-irrigation	دو بار آبیاری Double-irrigation	یک بار آبیاری Single-irrigation	دو بار آبیاری Double-irrigation
کرمانشاه Kermanshah	۲۷ بهمن February 16	75	80	46.4	62.2
	۹ اسفند February 28	79	85	46.7	64
	۲۱ اسفند March 12	64	72	44.6	66.7
	۶ اسفند February 25	80	93	35	57.6
ازنا Azna	۱۶ اسفند March 6	81	91	37	59.3
	۲۴ اسفند March 14	68	81	41	59.3

روزانه ET، مجموع آن در طول هر مرحله رشدی (مرحله گل‌دهی و مرحله پر شدن غلاف) به عنوان نیاز آبی گیاه در آن مرحله در نظر گرفته شد. مقدار ضریب Kc برای کرمانشاه برای دوره گل‌دهی و پر شدن بذر به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۱/۰۸ (Saremi et al., 2015) بود و برای ازنا برای دوره گل‌دهی و پر شدن بذر به ترتیب برابر با ۰/۸۹ و ۱/۱۹ (Allen et al., 1998) بود.

پس از سبز شدن (مرحله شش برگچه‌ای) تا زمان رسیدگی

برآورد نیاز آبی گیاه با استفاده از تشتک تبخیر از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$ET = Kc \times Kpan \times ETpan \quad (1)$$

که در آن، ET: تبخیر و تعرق گیاه (میلی‌متر در روز)، ETpan: تبخیر و تعرق از تشتک (میلی‌متر در روز)، kpan: ضریب تشت (برای کرمانشاه ۰/۷ و برای ازنا ۰/۸) و Kc: ضریب گیاهی براساس مرحله رشد گیاه است (Ghamarnia et al., 2023). پس از محاسبه مقدار

فرایندهای مختلف نمو فنولوژیک، تغییرات سطح برگ، تولید ماده خشک، تشکیل عملکرد و روابط آب و گیاه و اطلاعات مربوط به خاک منطقه مورد نظر از جمله عمق خاک، ضریب الییدو، فاکتور زهکشی، شماره خاک برای محاسبه رواناب، مقدار آب در زمان اشباع (برحسب میلی‌متر)، مقدار آب در زمان ظرفیت زراعی (برحسب میلی‌متر) و مقدار آب قابل دسترس (برحسب میلی‌متر) است. اطلاعات خاک‌شناسی از نتایج آزمون خاک محل اجرای تحقیق استخراج شد (جدول ۱).

واسنجی پارامترهای مدل SSM-iCrop2

برای واسنجی مدل، پارامترهای مورد نیاز از اطلاعات آزمایش اجرا شده تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه در سال ۱۴۰۰ استخراج شد (جدول ۴). به‌منظور واسنجی مدل اطلاعات ورودی شامل جزئیات مدیریت زراعی (سال و تاریخ کاشت، زمان و مقدار آبیاری) و ویژگی‌های خاک و پارامترهای مورد نظر برای منطقه اجرای آزمایش که از نمونه‌برداری خاک مندرج در جدول ۱ استخراج گردید، استفاده شد. داده‌های هواشناسی روزانه (حداقل و حداکثر دما، ساعات آفتابی و میزان بارش) برای منطقه مورد نظر از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. با استفاده از برنامه Srad-Calc (Soltani & Sinclair, 2012) میزان تشعشع خورشیدی براساس ساعت آفتابی و روز از سال محاسبه شد. براساس منابع مربوط به مدل SSMiCrop2، پارامترهای گیاهی زیادی در شبیه‌سازی مدل به کار می‌روند. اما با توجه به ماهیت مدل و نقش فنولوژیکی این عوامل در رشد و عملکرد گیاه، اثر آن‌ها در نهایت از طریق کاهش سه پارامتر اصلی اعمال شده و باعث افت رشد و عملکرد گیاه می‌شود. این سه پارامتر عبارت از حداکثر شاخص سطح برگ (LAIMX)، حداکثر شاخص برداشت (HLMX) و واحد دمای کاشت تا برداشت (tu HAR) است (Soltani et al., 2020). ابتدا روز از کاشت تا رسیدگی فنولوژیک (زمانی که دانه‌ها کاملاً شکل گرفته و غلاف‌های یک سوم پایینی گیاه به رنگ قهوه‌ای است و غلاف‌ها هنگام تکان دادن صدا می‌دهند) در مزرعه برای هر رقم و تیمار ثبت شد (Erskin et al., 1990) و سپس مقدار میانگین درجه روز رشد طبق فرمول (رابطه ۲) محاسبه شد و به‌عنوان پارامتری برای tu HAR وارد مدل شد تا روز از کاشت تا رسیدگی فنولوژیک با مزرعه منطبق شود. برای انطباق میزان وزن خشک کل نیز باید حداکثر شاخص سطح برگ در مدل برای هر رقم و تیمار وارد شود. در نهایت میزان عملکرد دانه از طریق حداکثر شاخص برداشت تعیین گردد.

$$GDD = T_{base} - \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (2)$$

فیزیولوژیک، در مراحل مختلف نمو، از هر کرت به‌صورت تصادفی سه بوته برداشت شد. بعد از رسیدگی فنولوژیک (قهوه‌ای رنگ شدن غلاف‌ها) و انتهای فصل رشد، جهت برداشت نهایی، دو ردیف از هر کرت به‌صورت کف‌بر برداشت شد. سپس جهت تعیین وزن خشک کل، ابتدا نمونه‌ها به مدت زمان ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند و سپس توسط ترازو توزین گردید. جهت تعیین عملکرد دانه، غلاف‌ها جدا شده و سپس کاه و کلش آن تمیز گردید و توزین شد. برای جلوگیری از ریزش و پوک شدن غلاف‌ها زمانی که رطوبت دانه حدود ۱۵ تا ۱۶ درصد بود، برداشت انجام شد. سطح برگ با استفاده از نرم‌افزار Microvision ز محاسبه گردید. مساحت برگ‌های هر بوته با تصویربرداری از آن‌ها محاسبه و شاخص سطح برگ در هر تیمار با تعمیم این مقدار در واحد مترمربع محاسبه شد. در پایان با استفاده از داده‌های حاصل، پارامترهای گیاهی مدل تخمین زده شدند.

توصیف مدل

مدل SSM-iCrop2 یک مدل شبیه‌سازی گیاه زراعی و نسخه ساده‌شده‌ای از مدل اصلی SSM است (Soltani et al., 2013). این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک (سبز شدن، شروع مؤثر پُر شدن دانه، پایان مؤثر پُر شدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی)، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. این مدل دارای کد باز بوده و از محیط اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌شود. در این مدل، شبیه‌سازی‌ها به‌صورت روزانه انجام می‌گیرد. این مدل اثر آفات، بیماری‌ها و علف‌هرز را بر رشد و نمو گیاه شبیه‌سازی نمی‌کند. مراحل نمو فنولوژیک در مدل به‌عنوان تابعی از دما، طول روز و تنش کمبود آب است. گسترش و پیری برگ‌ها تابعی از دما، مواد فتوسنتزی فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن است (Soltani et al., 2013). تولید ماده خشک به‌عنوان تابعی از تابش دریافت‌شده و دما تخمین زده می‌شود. در مدل SSM به‌دلیل استفاده از روش‌ها و الگوریتم متفاوت و جدید در ساختار مدل برای بیان گسترش و پیری برگ‌ها و همچنین توزیع ماده خشک، شبیه‌سازی نمو فنولوژیک و تولید ماده خشک نیاز به پارامترهای ورودی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد (Soltani et al., 2020).

ورودی‌های مدل شامل اطلاعات روزانه آب‌وهوا (دمای حداکثر و حداقل برحسب (درجه سانتی‌گراد)، تشعشع (برحسب مگاژول در مترمربع) و بارندگی (بر حسب میلی‌متر)، اطلاعات مربوط به منطقه مورد مطالعه (عرض جغرافیایی، کمبود فشار بخار، غلظت دی‌اکسید کربن و تغییرات دما و بارندگی)، پارامترهای گیاهی مرتبط با

جدول ۴- پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی مدل

Table 4- Attributes used in model calibration

تاریخ کاشت Sowing date	آبیاری Irrigation	حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index (LAIMX)			حداکثر شاخص برداشت Maximum harvest index (HLMX)			واحد دمایی کاشت تا برداشت Thermal units from planting to harvest (tuHAR)		
		کیمیا Kimiya	بيله سوار Belehsavar	گچساران Gachsaran	کیمیا Kimiya	بيله سوار Belehsavar	گچساران Gachsaran	کیمیا Kimiya	بيله سوار Belehsavar	گچساران Gachsaran
۲۷ بهمن February 16th	بدون آبیاری No irrigation	2.2	2.5	2.3	0.28	0.28	0.27	1417	1405	1444
	یک بار آبیاری One irrigation	2.4	2.6	2.5	0.29	0.29	0.28	1417	1405	1444
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.6	2.7	2.6	0.29	0.29	0.28	1417	1405	1444
۶ اسفند February 28th	بدون آبیاری No irrigation	2.2	2.3	2.1	0.28	0.28	0.27	1470	1459	1495
	یک بار آبیاری One irrigation	2.3	2.4	2.2	0.29	0.29	0.28	1470	1459	1495
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.4	2.5	2.2	0.29	0.29	0.28	1470	1459	1495
۲۱ اسفند March 12th	بدون آبیاری No irrigation	2.1	2.2	2	0.28	0.28	0.27	1502	1490	1526
	یک بار آبیاری One irrigation	2.2	2.3	2.1	0.29	0.28	0.28	1502	1490	1526
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.3	2.3	2.2	0.29	0.28	0.28	1502	1490	1526

تعیین اعتبار مدل

شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده شامل برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و مقایسه آن‌ها با شیب خط ۱:۱، جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نرمال‌شده^۲ (nRMSE)، میانگین خطای تقریبی^۳ (MBE) و شاخص توافق ویلموت^۴ (d) بود که از طریق روابط (۳) تا (۶) محاسبه شدند. برای ارزیابی مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده مراحل نمو فنولوژیک (گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک) و عملکرد دانه در

آزمایش‌های اجراشده تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا در سال

۱۴۰۱ استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(s_1 - o_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=0}^n (|s_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (4)$$

$$nRMSE(\%) = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(s_1 - o_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{o}} \quad (5)$$

$$MBE = \sum_{i=0}^n \frac{(s_1 - o_i)}{n} \quad (6)$$

که در آن‌ها، n: تعداد مشاهدات، O_i: مقادیر مشاهده‌شده، S_i:

مقادیر شبیه‌سازی‌شده و O: میانگین مقدار مشاهده‌شده برای مشاهده

i ام است (Willmott, 1982). مقادیر شاخص ویلموت می‌توانند بین ۰ و

۱ متغیر باشد، مقدار ۱ نشانگر توافق کامل بین داده‌های شبیه-

1- Root mean square error

2- Normalized root mean squared error

3- Mean bias error

4- Willmott indrx of Agreement

سازی شده و مشاهده شده است. جذر میانگین مربعات خطاء نیز اطلاعاتی در مورد انحراف کلی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارائه می‌دهد. میانگین مربعات خطای نرمال شده (%) تفاوت نسبی داده‌های شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهده شده را نشان می‌دهد و با نزدیک شدن به صفر دقت شبیه‌سازی مدل افزایش می‌یابد. مقادیر مثبت میانگین خطای تقریبی نشان‌دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیش‌تر از مقادیر واقعی و مقادیر منفی آن بیانگر این است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کم‌تر از مقادیر واقعی است. علاوه بر این، تطابق خط ۱:۱ نشان می‌دهد که مدل توانسته صفت مورد نظر را با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

نتایج و بحث

واسنجی مدل

مراحل فنولوژی نقش بسزایی در سیستم مدیریت کشت دارند و به همین دلیل، تعیین دقیق پارامترهای مرتبط با فنولوژی اهمیت زیادی در کارهای شبیه‌سازی دارند (Nehbandani & Soltani, 2015). نتایج واسنجی مدل SSM-iCrop2 نشان داد که پارامترهای تخمین زده شده (جدول ۴) در ساختار مدل از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک و عملکرد دانه ارقام عدس مورد بررسی در تیمارهای آزمایش برخوردار است (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطاء، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای مراحل نمو از کاشت تا گل‌دهی رقم کیمیا به ترتیب برابر با ۲ روز، ۳ درصد میانگین مشاهدات و ۱/۵، رقم بیل به سوار به ترتیب برابر با ۴/۵ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۲/۲ و رقم گچساران به ترتیب برابر با ۴/۵ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۲/۲ بود. در هر سه رقم و شرایط تیمارهای آبیاری، شاخص ویلموت (d) برابر با ۰/۹۹ بود. مقدار جذر میانگین مربعات خطاء، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای مراحل نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای رقم کیمیا به ترتیب برابر با ۵/۱ روز، ۵/۱ درصد میانگین مشاهدات و ۶-، برای رقم بیل به سوار به ترتیب برابر با ۴/۴ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۴/۸ - و رقم گچساران به ترتیب برابر با ۴/۸ روز، ۴/۶ درصد میانگین مشاهدات و ۵/۲- بود. شاخص ویلموت (d) برای مراحل نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام مورد بررسی در شرایط تیمارهای آزمایش برابر با ۰/۹۹ بود. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل‌دهی و روز از کاشت تا گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک را پیش‌بینی کند (شکل ۲). اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد

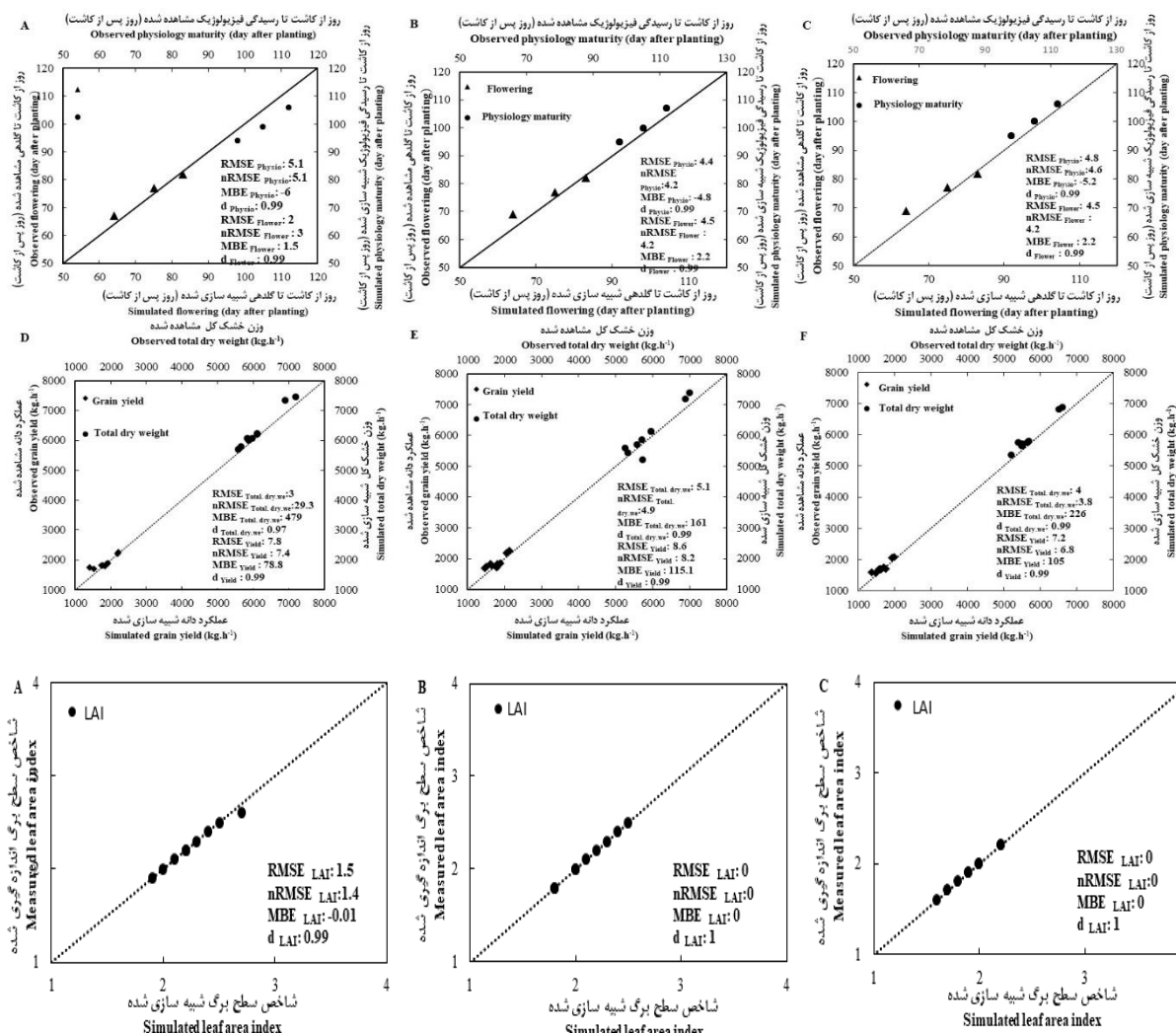
دانه رقم کیمیا بین ۸ تا ۹۳ کیلوگرم در هکتار، رقم بیل به سوار بین ۱۹ تا ۱۳۸ کیلوگرم در هکتار و رقم گچساران بین ۱۳ تا ۹۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بود. مقدار جذر میانگین مربعات خطاء، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای عملکرد دانه رقم کیمیا به ترتیب ۷/۸ کیلوگرم در هکتار، ۷/۴ درصد میانگین مشاهدات و ۷۸/۸، برای رقم بیل به سوار به ترتیب ۶۸ کیلوگرم در هکتار، ۸/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۱۱۵/۱ و برای رقم گچساران به ترتیب ۷/۲ کیلوگرم در هکتار، ۶/۸ درصد میانگین مشاهدات و ۱۰۵ بود (شکل ۲). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۵ درصد تغییرات مشاهده شده عملکرد دانه را پیش‌بینی کند (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطاء، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای وزن خشک کل در رقم کیمیا به ترتیب ۳۰ کیلوگرم در هکتار، ۲۹/۳ درصد میانگین مشاهدات و ۴۷۹، برای رقم بیل به سوار به ترتیب ۸/۶ کیلوگرم در هکتار، ۴/۹ درصد میانگین مشاهدات و ۱۶۱ و برای رقم گچساران به ترتیب ۴ کیلوگرم در هکتار، ۳/۸ درصد میانگین مشاهدات و ۲۲۶ بود (شکل ۲).

همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۷ درصد تغییرات مشاهده شده عملکرد دانه را پیش‌بینی کند (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطاء، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای شاخص سطح برگ در رقم کیمیا به ترتیب ۱۰۵، ۱/۴ درصد میانگین مشاهدات و ۰/۰۱-، برای رقم بیل به سوار و گچساران به ترتیب برابر با صفر بود (شکل ۲). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۹ درصد تغییرات مشاهده شده سطح برگ را پیش‌بینی کند (شکل ۲).

به طور کلی، نتایج شاخص‌های آماری نشان داد که دقت پارامترهای گیاهی انتخاب شده در فرآیند واسنجی مدل SSM-iCrop2 قابل قبول بود. مطالعات متعدد نتایج مشابهی از واسنجی مدل SSM-iCrop2 را گزارش کرده‌اند. در تحقیقی دیگر گزارش شد که پارامترهای به کاررفته در مدل SSM-iCrop2 از دقت قابل قبولی برخوردار است (اگر مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر از ۱۰ درصد باشد در سطح عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد قابل قبول و در صورتی که بیش از ۳۰ درصد باشد در سطح ضعیف ارزیابی می‌شود)، به گونه‌ای که مقدار جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک سویا ۱۲ روز گزارش شد که حاکی از دقت نسبتاً خوب بود (Nehbandani et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر که با هدف پارامتریابی و ارزیابی مدل

اظهار داشتند که می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای بررسی سیستم‌های زراعی و تفسیر نتایج در شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت در جهت بهبود مزارع لوبیا با اطمینان استفاده کرد.

SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیای معمولی انجام شده بود، نتایج نشان داد که جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه برابر با ۶۲ گرم در مترمربع بود (Mohammadi et al., 2022). آن‌ها

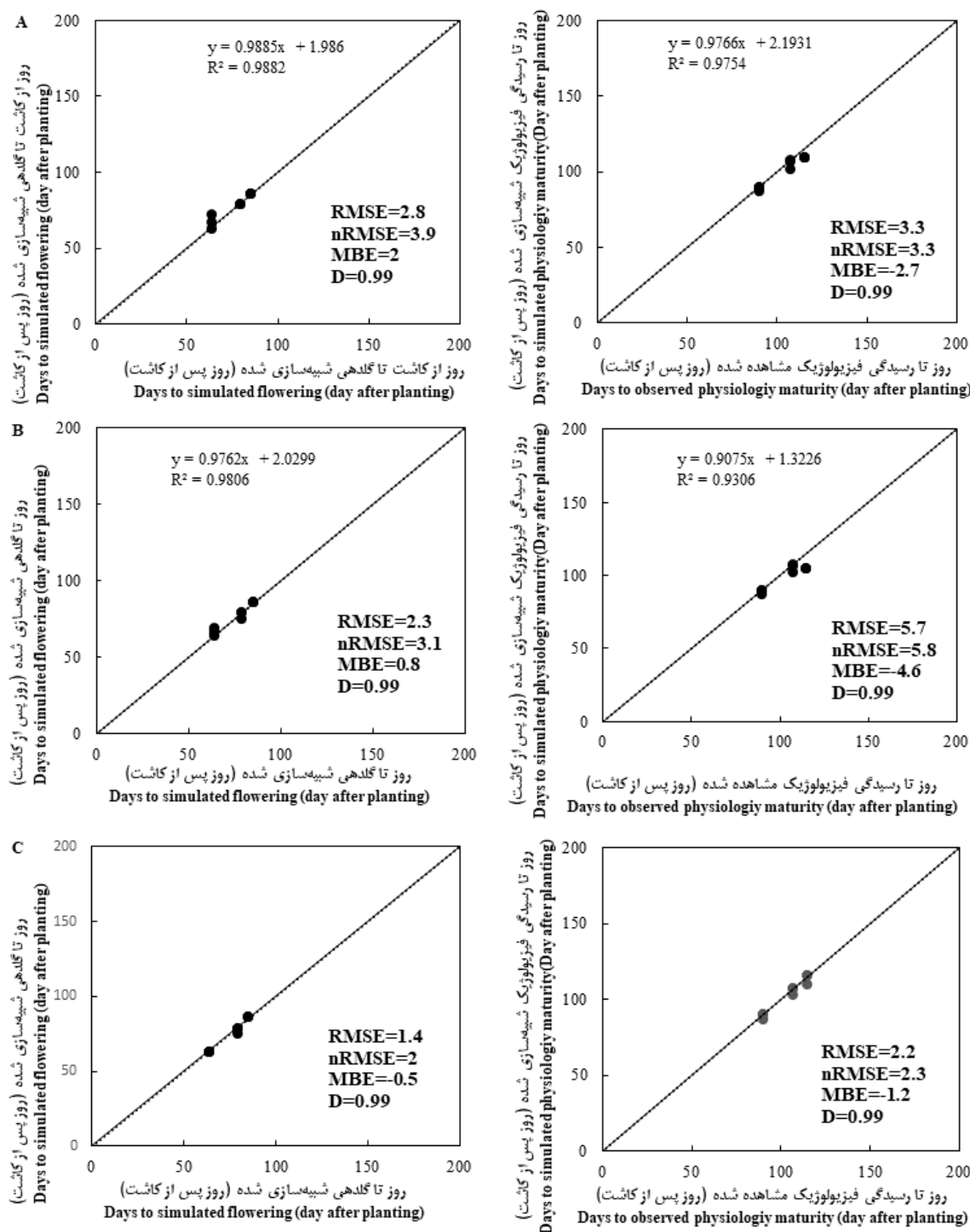


شکل ۲- نتایج واسنجی: مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک (شکل A: رقم کیمیا، شکل B: رقم بیل‌سوار، شکل C: رقم گچساران)، عملکرد دانه و وزن خشک کل ارقام عدس (شکل D: رقم کیمیا، شکل E: رقم بیل‌سوار، شکل F: رقم گچساران) در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ‌های مختلف کاشت

Figure 2- The results of calibration: comparison of simulated and measured values of number of days from sowing to anthesis date and to physiological maturity (A: Kimiya, B: Bilehsavar, C: Gachsaran), grain yield and total dry weight of lentil cultivars (D: Kimiya, E: Bilehsavar, F: Gachsaran) in different sowing dates and different irrigation

مشاهده‌شده به‌ترتیب مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن در هر سه تیمار آبیاری و تاریخ کشت ۲۱ اسفند در هر سه تیمار آبیاری بود. بیش‌ترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده به‌میزان ۸۶ روز نیز مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن، در هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۱ اسفند، رقم گچساران و در هر سه تیمار آبیاری به‌میزان ۶۳ روز بود (شکل ۳).

ارزیابی مدل نمو فنولوژیک برای ارزیابی مدل از داده‌های مزرعه‌ای در سال دوم کرمانشاه و ازنا استفاده شد. در شرایط اقلیمی کرمانشاه بیش‌ترین (۸۵ روز) و کم‌ترین (۶۴ روز) طول دوره نمو روز از کاشت تا گل‌دهی



شکل ۳- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل‌دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در تاریخ کاشت‌ها و تیمارهای مختلف آبیاری تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه.

A: رقم کیمیا B: رقم بیل‌سوار و C: رقم گچساران

Figure 3- Regression analysis between simulated and measured values of phenological stages (days from planting to flowering and days from planting to physiological maturity), as well as the evaluation results of the SSM-iCrop2 model indices under different planting dates and irrigation treatments in the climatic conditions of Kermanshah. A: Kimiya cultivar, B: Bilihsavar cultivar and C: Gachsaran cultivar.

خطای نرمال شده به ترتیب ۱۰/۷، ۱۰/۹ و ۱۰/۹ درصد مشاهدات بود (شکل ۴).

میزان جذر میانگین مربعات خطای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام مورد بررسی از ۱۱/۸ تا ۱۲/۹ روز و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده از ۱۰ تا ۱۱ درصد میانگین مشاهدات متغیر بود. میانگین خطای تقریبی نیز برای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی مثبت و برای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک منفی بود. ضریب توافق ویلموت (d) برای صفات روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بیش از ۰/۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه سازی مراحل نمو فنولوژیک ارقام عدس مورد بررسی در شرایط اقلیمی ازنا است. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل توانست بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک را پیش بینی کند (شکل ۴). برای شبیه سازی با کیفیت بالا به داده های ورودی با کیفیت (آب و هوا، خاک، مدیریت)، آمارها (سطح زیرکشت، منابع آب و زمین)، روش دقیق مقیاس بندی و یک مدل زراعی که دقیق پارامتریابی شده باشد، نیاز است. یکی از دلایل دقت بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه سازی مراحل نمو فنولوژیک عدس در این مطالعه را می توان دقت در ثبت مراحل مختلف فنولوژیکی برای برآورد پارامترها و ارزیابی مدل ذکر کرد. پیش بینی نمو فنولوژیک گیاه اهمیت زیادی دارد، چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل های شبیه سازی گیاهان زراعی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژیک است (Soltani et al., 2006).

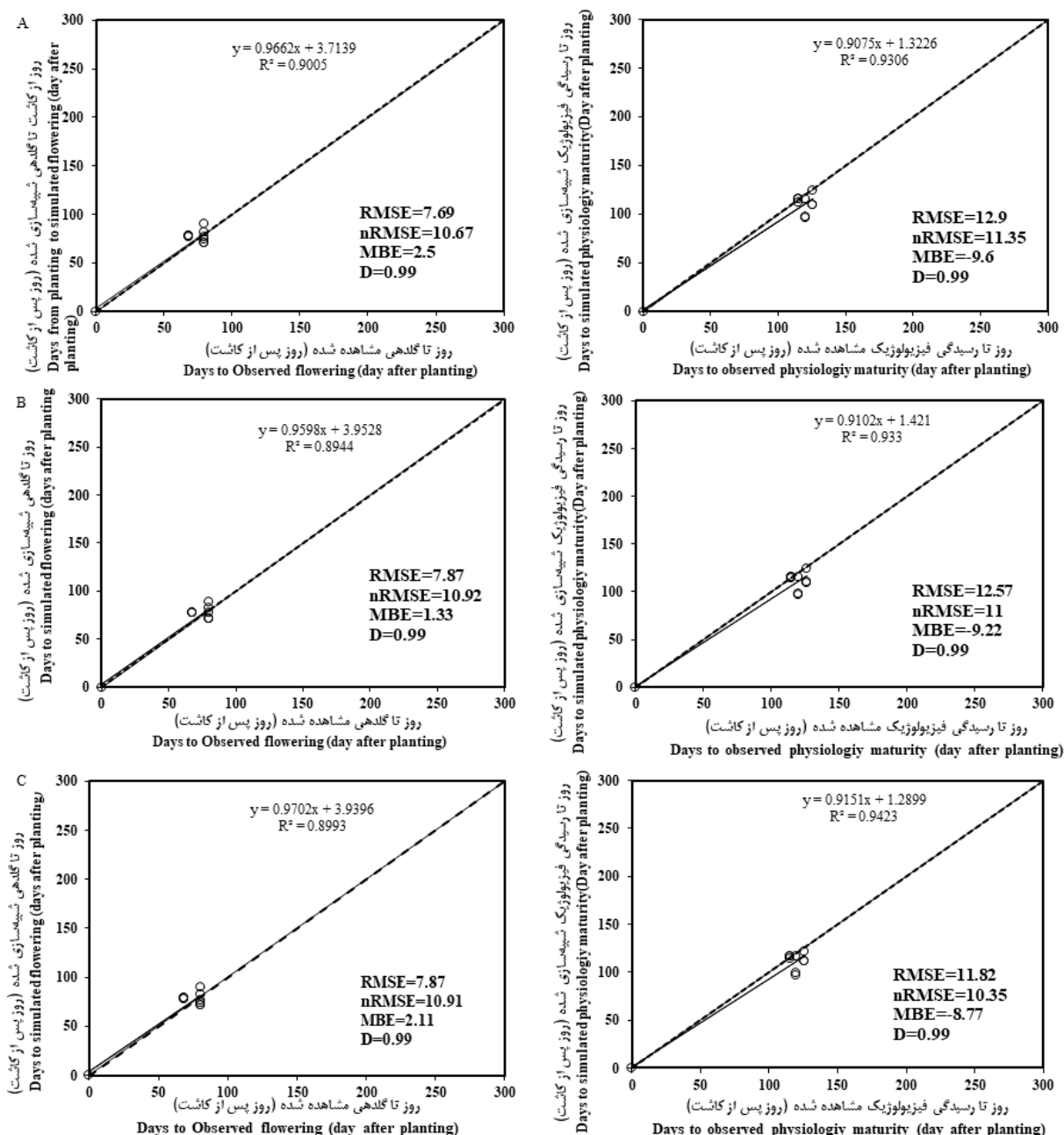
نتایج حاصل از شبیه سازی تعیین اعتبار مراحل نمو فنولوژیک گیاه باقلا نشان داد که مدل SSM-iCrop2 با دقت زیادی مراحل روز از کاشت تا گل دهی و رسیدگی فیزیولوژیک را پیش بینی کرده است، به گونه ای که مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای روز از کاشت تا گل دهی ۳/۸ روز و برای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ۱۱/۹ روز بود (Torabi et al., 2020). حاجی شعبانی و همکاران (Hajishabani et al., 2020) میزان جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک نخود را نیز با استفاده از مدل CROPGRO-Chickpea به ترتیب ۲/۹ و ۲/۷ روز گزارش کردند (Hajishabani et al., 2020). در مطالعه ای دیگر، نسبت مقدار جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک سویا در شرایط آب و هوایی گرگان با استفاده از مدل SSM-iCrop2 برابر با ۸/۷ روز به دست آمد (Nehbandani & Soltani, 2016). این محققان اظهار داشتند که مدل SSM-iCrop2 توانست با دقت بالایی مراحل نمو فنولوژیک

در شرایط مزرعه، بیشترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن به میزان ۱۱۵ روز برای هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۹ اسفند برای هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری به میزان ۹۰ روز بود. در شرایط شبیه سازی نیز بیشترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک (۱۱۶ روز) برای رقم گچساران در تیمارهای یک بار و دو بار آبیاری و کمترین آن (۸۷ روز) برای دیگر ارقام و در شرایط تیمار بدون آبیاری بود (شکل ۳).

نتایج شاخص های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 نشان داد که تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه، میزان جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا گل دهی برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب برابر با ۵/۷، ۳/۳ و ۲/۲ روز و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به ترتیب ۵/۸، ۳/۳ و ۲/۳ درصد مشاهدات بود (شکل ۳). میانگین خطای تقریبی نیز برای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی تنها در رقم گچساران منفی و برای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در تمام ارقام منفی بود. ضریب توافق ویلموت (d) برای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بیش از ۰/۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه سازی مراحل نمو ارقام عدس تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه است. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک را تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه پیش بینی کند (شکل ۳). نتایج همچنین نشان داد که در شرایط اقلیمی ازنا، بیشترین و کمترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گل دهی اندازه گیری شده برای هر سه رقم مورد مطالعه در تاریخ کاشت های ۶ و ۲۴ اسفند به ترتیب معادل ۸۰ و ۶۸ روز مشاهده شد. بیشترین و کمترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گل دهی شبیه سازی شده نیز مربوط به تاریخ کاشت های ۶ و ۲۴ اسفند به ترتیب معادل ۹۰ روز و ۷۷ روز برای رقم بیله سوار بود (شکل ۴). در شرایط مزرعه، بیشترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به تاریخ ۶ اسفند برای هر کدام از ارقام مورد بررسی به میزان ۱۲۶ روز و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۴ اسفند به میزان ۱۱۵ روز بود. بیشترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه سازی شده نیز مربوط به تاریخ ۶ اسفند به میزان ۱۲۴ روز برای ارقام بیله سوار و کیمیا و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۴ اسفند و رقم بیله سوار معادل ۹۶ روز بود (شکل ۴). جذر میانگین مربعات خطای مرحله نمو روز از کاشت تا گل دهی برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب ۷/۷، ۷/۹ و ۷/۹ روز بود و جذر میانگین مربعات

پیش‌بینی عملکرد، این مدل در اقلیم‌های متفاوت به‌عنوان یک ابزار مفید برای مدیریت مزرعه محسوب می‌شود.

را پیش‌بینی کند و با توجه به نقش کلیدی مراحل فنولوژی در مدل‌سازی رشد، عملکرد و پاسخ گیاهان به شرایط محیطی و بهبود



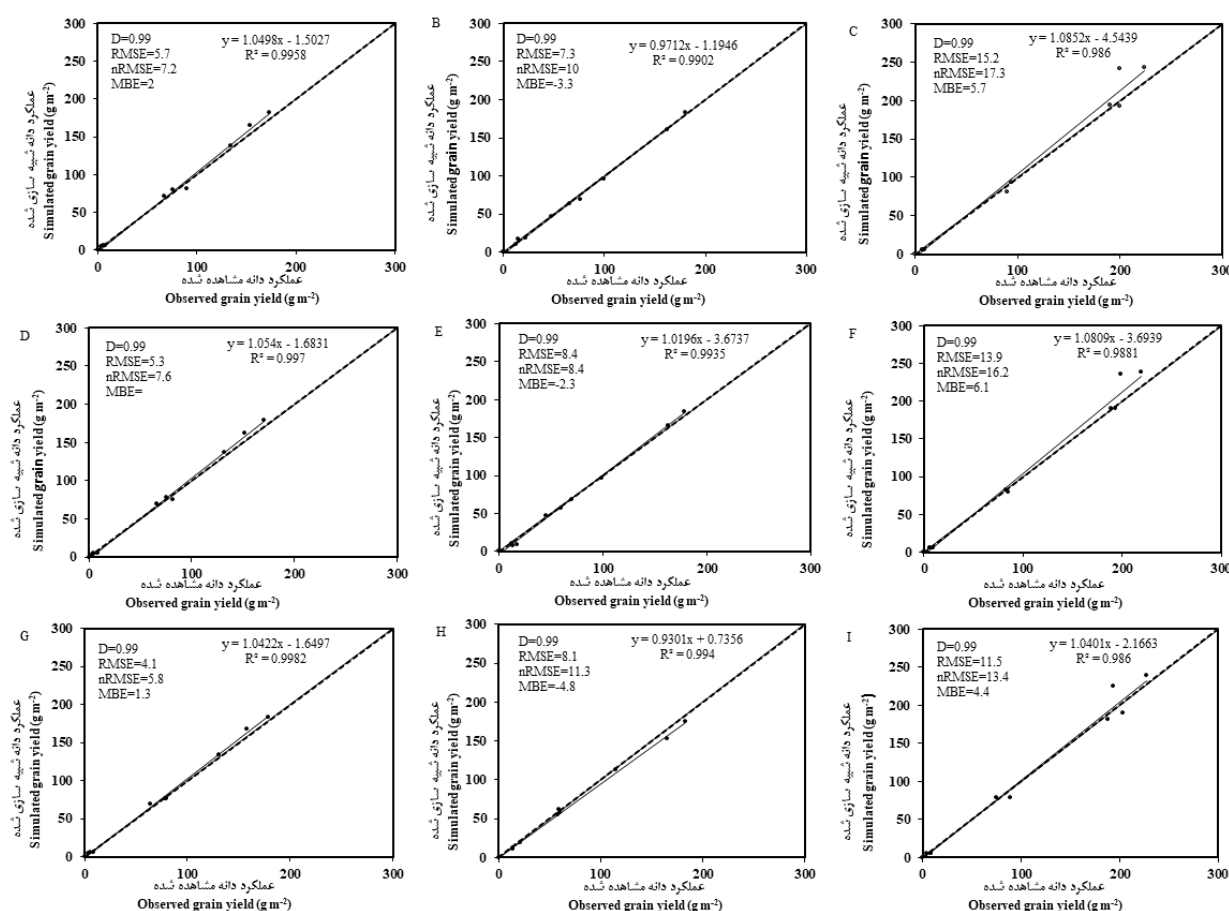
شکل ۴- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گل‌دهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در تاریخ کاشت‌ها و تیمارهای مختلف آبیاری تحت شرایط اقلیمی ازنا. A: Belehshavar cultivar، B: Kimiya cultivar و C: Gachsaran cultivar

Figure 4- Regression analysis between simulated and measured values of phenological stages (days from planting to flowering and days from planting to physiological maturity), as well as the evaluation results of the SSM-iCrop2 model indices under different planting dates and irrigation treatments in the climatic conditions of Azna. A: Belehshavar cultivar, B: Kimiya cultivar and C: Gachsaran cultivar

عملکرد دانه

میانگین مشاهدات به دست آمد. میانگین خطای تقریبی برای عملکرد دانه تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه مثبت بود، به گونه‌ای که بالاترین و پایین‌ترین میانگین خطای تقریبی به ترتیب در تیمار بدون آبیاری و تیمار دو بار آبیاری تکمیلی مشاهده شد (شکل ۴). ضریب توافق ویلموت (d) برای عملکرد دانه ارقام کشت شده حدود ۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده توانایی بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف بود. همچنین نتایج برآزش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 در تیمارهای مورد بررسی قادر بود که بیش از ۹۹ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کند که نشان از دقت بسیار بالای این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه داشت (شکل ۵).

نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های مشاهده شده عملکرد دانه ارقام عدس در شرایط مزرعه هم‌خوانی بسیار بالایی داشت. در هر دو شرایط مزرعه و شبیه‌سازی تأخیر در کاشت منجر به کاهش عملکرد دانه شد و کاربرد آبیاری تکمیلی تأثیر مثبتی بر عملکرد دانه داشت. در شرایط اقلیمی کرمانشاه، میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه در تیمارهای بدون آبیاری از ۴/۱ تا ۵/۶ گرم در مترمربع، یک بار آبیاری تکمیلی از ۷/۳ تا ۸/۴ گرم در مترمربع و دو بار آبیاری تکمیلی از ۱۱/۵ تا ۱۵/۲ گرم در مترمربع مشاهده شد (شکل ۵). جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در تیمار بدون آبیاری از ۵/۸ تا ۷/۹ درصد میانگین مشاهدات، تیمار یک بار آبیاری از ۸/۴ تا ۱۱/۳ درصد میانگین مشاهدات و تیمار دو بار آبیاری از ۱۳/۴ تا ۱۷/۳ درصد

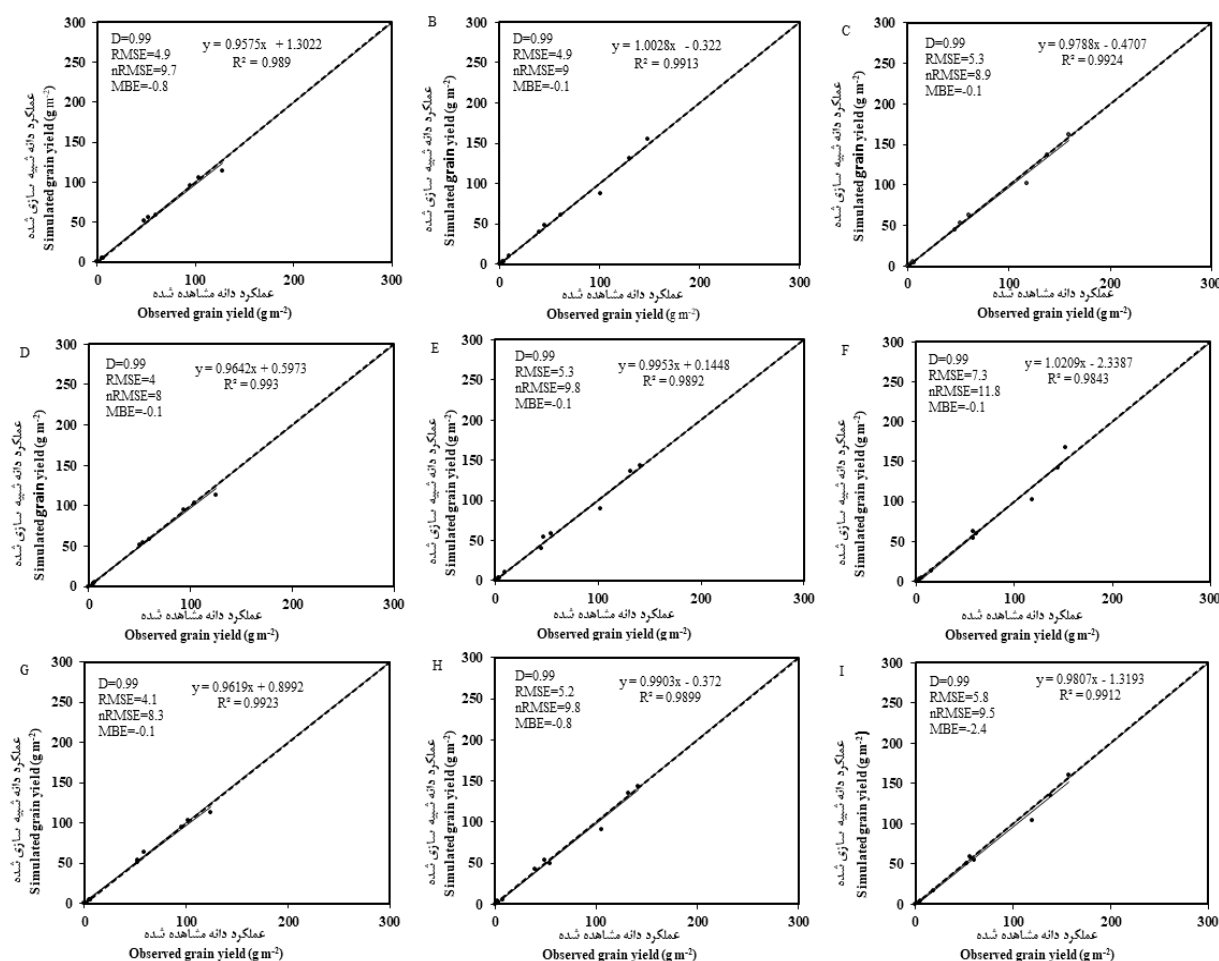


شکل ۵- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه عدس و نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM iCrop2 در شرایط اقلیمی کرمانشاه. A, B و C: رقم بیل سوار در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. D, E و F: رقم کیمیا در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. G, H و I: رقم گچساران در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف

Figure 5- Regression analysis between simulated and measured values of lentil grain yield and the results of SSM iCrop2 model evaluation indices in Kermanshah climatic conditions. A, B and C: Behlsavar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. D, E and F: Kimiya cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. G, H and I: Gachsaran cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates

ضریب توافق ویلموت (d) برای عملکرد دانه ارقام کشت‌شده تحت شرایط اقلیمی ازنا حدود ۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده توانایی بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد دانه بود. همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 قادر بود بیش از ۹۹ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده‌شده را پیش‌بینی کند که نشان از قدرت بسیار بالای این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تاریخ کشت‌ها و تیمارهای آبیاری مورد بررسی داشت (شکل ۶).

تحت شرایط اقلیمی ازنا، میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه ارقام مختلف عدس در شرایط تیمارهای آزمایش از ۴/۰ تا ۷/۳ گرم در مترمربع متغیر بود (شکل ۶). جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده در تیمارهای بدون آبیاری از ۸/۰ تا ۹/۷ درصد میانگین مشاهدات، یک بار آبیاری تکمیلی از ۹/۰ تا ۹/۸ درصد میانگین مشاهدات و تیمار دو بار آبیاری تکمیلی از ۸/۹ تا ۱۱/۸ درصد میانگین مشاهدات بود. میانگین خطای تقریبی در تیمار بدون آبیاری و تیمار یک بار آبیاری تکمیلی بین ۰/۱- تا ۰/۸- و در تیمار دو بار آبیاری تکمیلی بین ۰/۱- تا ۲/۴- مشاهده شد (شکل ۶).



شکل ۶- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده عملکرد دانه عدس و نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM iCrop2 در شرایط اقلیمی ازنا. A, B و C: رقم بیل‌سوار در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. D, E و F: رقم کیمیا در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. G, H و I: رقم گچساران در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف

Figure 6- Regression analysis between simulated and measured values of lentil grain yield and the results of SSM iCrop2 model evaluation indices in Azna climatic conditions. A, B and C: Behlshavar cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. D, E and F: Kimiya cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. G, H and I: Gachsaran cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates

استفاده شده است. در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شده است که مدل SSM-Legumes عملکرد دانه گیاه لوبیا در جنوب غربی فرانسه را با RMSE برابر با ۴۱ گرم در مترمربع برآورد کرد (Marrou et al., 2014). مقدار جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده در شبیه‌سازی عملکرد دانه لوبیا چشم بلبلی توسط مدل DSSAT به ترتیب ۹۲ و ۱۲/۶ درصد گزارش شده است (Baradaran-Hazaveh et al., 2022). همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در شبیه‌سازی عملکرد دانه نخود توسط مدل CROPGRO-chickpea بین ۱۰/۳ تا ۱۶/۶ درصد میانگین مشاهدات گزارش شده است (Hajishabani et al., 2020).

نتیجه گیری

در این مطالعه، پارامترهای مربوط به فنولوژی و عملکرد دانه ارقام عدس با استفاده از مدل SSM-iCrop2 با دقت بالایی برآورد شد. مدل توانست رشد و عملکرد عدس را با وجود تاریخ کاشت و آبیاری متفاوت، با تعداد پارامترهای کم و در دسترس با موفقیت شبیه‌سازی کند. نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop2 که با استفاده از شاخص‌های آماری انجام گرفت، نشان داد که این مدل می‌تواند زمان رسیدگی و عملکرد دانه عدس را در تاریخ‌های مختلف کاشت در شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا با دقت زیادی شبیه‌سازی کند. بنابراین با توجه به این نتایج ارزیابی‌ها می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد عدس بهره برد. این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد عدس در آب‌وهوای مناطق مختلف و تحت شرایط مدیریتی متفاوت استفاده شود.

سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت کادر محترم مزرعه آموزش و تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی برای انجام این پژوهش تقدیر می‌گردد.

به‌طور کلی، نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در شرایط تیمارهای تاریخ کاشت و آبیاری تکمیلی نشان داد که این مدل قادر است با دقت بالایی تغییرات عملکرد دانه ارقام مورد بررسی عدس را برای شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا شبیه‌سازی کند. با این وجود مدل SSM-iCrop2 در تیمار دو بار آبیاری تکمیلی، مقدار عملکرد دانه ارقام بیل سوار و کیمیا را تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه بیشتر از شرایط مزرعه پیش‌بینی نمود. ولی در شرایط اقلیمی ازنا، برآیند شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده نشان از نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه در تیمارهای آزمایش داشت. به‌طور قطع مدل‌های شبیه‌سازی، ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های طبیعی می‌باشند، اما این بدان معنی نیست که این مدل‌ها دقیقاً رفتار سیستم‌های طبیعی را پیش‌بینی کنند و در نهایت، ملاک برای قابل قبول بودن دقت مدل شاخص‌های آماری می‌باشد که در زمان ارزیابی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. علی‌رغم اینکه در برخی از تیمارها، این مدل عملکرد دانه را بیش‌تر یا کم‌تر از شرایط مزرعه شبیه‌سازی کرده است، اما نتایج تمام شاخص‌های آماری تاییدکننده دقت قابل قبول این مدل می‌باشد. ارزیابی موفقیت‌آمیز یک مدل شبیه‌سازی محصول به تخمین صحیح عملکرد و شاخص سطح برگ بستگی دارد (Amiri et al., 2016). با توجه به آنکه صحت و دقت پارامترهای مشاهده‌شده نقش مهمی در ارزیابی عملکرد مدل دارد، می‌توان دقت بالای نتایج این مطالعه را تا حد زیادی به دقت داده‌های مشاهده‌شده مرتبط دانست. نتایج مطالعات دیگر نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 نه تنها می‌تواند مراحل نمو فنولوژیک از جمله گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند، بلکه عملکرد دانه را نیز تحت شرایط مختلف اقلیمی، خاکی و مدیریتی با قابلیت قابل توجهی پیش‌بینی می‌کند (Ghanem et al., 2015). مقدار RMSE برای عملکرد دانه نخود توسط مدل SSM-Chickpea ۲۶ گرم در مترمربع گزارش شده است (Soltani & Sinclair, 2012). همچنین از مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد نخود (Hajarpour et al., 2013)، سویا (Akbari & Soltani, 2017) و باقلا (Torabi et al., 2020)

References

1. Abraham, R. (2015). Lentil (*Lens culinaris* Medikus) current status and future prospect of production in Ethiopia. *Advance in Plant and Agriculture Resresearch*, 2(2)00040.
2. Akbari, S., & Soltani, E. (2017). Parameterization and evaluation of simple model for simulation of growth and yield of soybean in Tehran climatic condition. *Journal of Crops Improvement*, 19, 751–764. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2017.60477>
3. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: food and agriculture organization of the United Nations, 56(97), e156.
4. Amiri, S. R., Deihimfard, R., & Soltani, A. (2016). A single supplementary irrigation can boost chickpea grain yield and water use efficiency in arid and semiarid conditions: A modeling study. *Agronomy Journal*, 108(6), 2406–2416. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0087>.

5. Baradaran-Hazaveh, F., Babazadeh, H., Amiri, E., & Ebrahimi, H. (2022). Evaluation of DSSAT model in estimating cowpea water productivity and yield at different levels of applied water. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Science)*, 35(4), 323-336. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2022.355847.890>.
6. Benayad, A., & Aboussaleh, Y. (2021). Mineral composition of lentils: Physiological functions, antinutritional effects, and bioavailability enhancement. *Journal of Food Quality*, 2021(1), 5515654. <https://doi.org/10.1155/2021/5515654>.
7. Erskine, W., Muehlbauer, F. J., & Short, R. W. (1990). Stages of development in lentil. *Experimental Agriculture*, 26(3), 297-302. <https://doi.org/10.1017/S0014479700018457>
8. Erskine, W., Sarker, A., & Kumar, S. (2011). Crops that feed the world 3. Investing in lentil improvement toward a food secure world. *Food Security*, 3, 127-139. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0124-5>.
9. FAO, Climate-smart Agriculture Sourcebook, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 2023. <https://doi.org/10.4060/cc8166en>.
10. Fourcaud, T., Zhang, X., Stokes, A., Lambers, H., & Korner, C. (2008). Plant growth modelling and application: The increasing importance of plant architecture in growth models. *Annals of Botany*, 101(8), 1053-1063. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn050>.
11. Ghamarnia, H., Palash, M., & Ghamarnia, H. (2023). Estimation and introduction of the best coefficients of monthly evaporation pan for calculations of water requirement) Case study Kermanshah province). *Water and Irrigation Management*, 12(4), 747-761. <http://doi.org/10.22059/jwim.2022.344535.1001>
12. Ghanem, M. E., Marrou, H., Biradar, C., & Sinclair, T. R. (2015). Production potential of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in East Africa. *Agricultural Systems*, 137, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.005>.
13. Hajarpour, A., Soltani, A., Zeinali, E., & Sayyedi, F. (2013). Simulating the impact of climate change on production of chickpea in rainfed and irrigated condition of Kermanshah. *Journal of Plant Production*, 20(2), 235-252. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222050.1392.20.2.12.7>.
14. Hajishabani, H., Mondani, F., & Bagheri, A. (2020). Simulation Effects of Sowing Date on Growth and Yield of Rainfed Chickpea (*Cicer arietinum* L.) by CROPGRO- CHICKPEA MODEL. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(2), 197-212. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v18i2.82684>.
15. Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
16. Manschadi, A. M., Palka, M., Fuchs, W., Neubauer, T., Eitzinger, J., Oberforster, M., & Soltani, A. (2022). Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen dynamics in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 135, 126487. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126487>
17. Marrou, H., Sinclair, T. R., & Metral, R. (2014). Assessment of irrigation scenarios to improve performances of Lingot bean (*Phaseolus vulgaris*) in southwest France. *European Journal of Agronomy*, 59, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.05.006>.
18. Ministry of Agriculture of Iran. (2023). (in Persian). Retrieved from <https://www.maj.ir/>.
19. Mohammadi, S., Zeinali, E., Soltani, A., & Torabi, B. (2022). Parameterization and evaluation of SSM_iCrop2 model to simulate the growth and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran. *Iranian Journal of Pulses Research*, 13(1), 37-54. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v13i1.2103-1004>.
20. Nehbandani, A., & Soltani, A. (2016). Simulate the effect of climate change on development, irrigation requirements and soybean yield in Gorgan. *Journal of Water and Soil*, 30(1), 77-87. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i1.37529>.
21. Nehbandani, A., Soltani, A., Nourbakhsh, F., & Dadras, A. (2020). Estimating crop model parameters for simulating soybean production in Iran conditions. *Oilseeds & Fats Crop and Lipids*, 27, 58. <https://doi.org/10.1051/ocl/2020057>.
22. Oduro-Yeboah, C., Sulaiman, R., Uebersax, M. A., & Dolan, K. D. (2023). A review of lentil (*Lens culinaris* Medik.) value chain: Postharvest handling, processing, and processed products. *Legume Science*, 5(2), e171. <https://doi.org/10.1002/leg3.171>
23. Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2022). Determining yield gap and potential for improved production of irrigated canola in Iran. *Journal of Crops Improvement*, 24(2), 393-406. (in Persian with English abstract).
24. Saremi, M., Farhadi, B., Maleki, A., & Farasati, M. (2015). Determination the crop coefficient and water requirement of lentil, using water balance method (case study: Khorram Abad). *Iranian Journal Pulses Research*, 6(2), 87-97. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v1394i2.38241>
25. Sehgal, A., Sita, K., Rehman, A., Farooq, M., Kumar, S., Yadav, R., Nayyar, H., Singh, S., & Siddique, K. H. (2021). Lentil. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*, 408-428. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00013-X>.

26. Sinclair, T. R. (1986). Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. model development. *Field Crop Research*, 15(2), 125–141. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(86\)90082-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90082-1).
27. Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., & Sinclair, T. R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, 102855. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102855>
28. Soltani, A., Hammer, G. L., Torabi, B., Robertson, M. J., & Zeinali, E. (2006). Modeling chickpea growth and development: phenological development. *Field Crops Research*, 99(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.004>
29. Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T. R. (2013). SSM-Wheat: A simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, 7(4), 711-740. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2013.1266>.
30. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124(2), 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021>.
31. Torabi, B., Ebrahimi, N., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and evaluation of SSM iCrop model for prediction of growth and development of faba bean in climatic conditions of Gorgan. *Journal of Crops Improvement*, 22(4), 531-542. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2020.273742.2148>.
32. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2).



Evaluation of Foliar Application of Cytokinin, Iron, Zinc and Selenium on Chlorophyll Fluorescence Parameters of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Drought Stress

A. Faridnia¹, F. Paknejad^{1*}, M. Sadeghi Shoaee², M. N. Ilkaee¹, F. AghaYari¹

1- Department of Agronomy and Plant Breeding, Ka.C. Islamic Azad University, Karaj, Iran

2- Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(*- Corresponding author's Email: Farzadpaknejad@iaau.ac.ir)

Received: 22 August 2025

Revised: 27 October 2025

Accepted: 03 November 2025

Available Online: 02 December 2025

How to cite this article:

Faridnia, A., Paknejad, F., Sadeghi Shoaee, M., Ilkaee, M. N., & AghaYari, F. (2026). Evaluation of foliar application of cytokinin, iron, zinc and selenium on chlorophyll fluorescence parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 281-297. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.95050.1421>

Introduction

Environmental stresses are important factors in reducing agricultural production worldwide. Plants are continuously exposed to various stresses under natural and agricultural conditions, and water scarcity is the most important limiting factor for crop yield in most parts of the world. Drought stress can cause morphological, physiological, and biochemical changes in crop plants. Cytokinin application and foliar application of micronutrients can have beneficial effects on plant photosynthesis and wheat yield under moisture stress conditions.

Materials and Methods

This study was conducted as a split-plot factorial experiment based on a randomized complete block design with three replications in two regions, Karaj and Hamadan, during the 2019–2020 growing seasons. Irrigation regimes, including three levels—(i) irrigation at 40% available soil moisture depletion throughout the growing season (control), (ii) normal irrigation from planting to the pollination stage followed by irrigation at 60% available soil moisture depletion, and (iii) normal irrigation from planting to the pollination stage followed by irrigation cutoff until maturity—were assigned to the main plots. The factorial sub-factors included low-consumption nano-elements at five levels (control, zinc, iron, selenium, and a combined application of the three elements) and cytokinin application timing at four levels (control, flowering stage, milking stage, and flowering + milking stages). Measured traits included grain yield, biological yield, and chlorophyll fluorescence parameters.

Results and Discussion

The results indicate that the effects of irrigation, cytokinin and Nano-micronutrient treatments on the studied traits were significant, but the interaction effects of these treatments were not significant. Drought stress has an inhibitory effect on various photosynthetic activities, especially photosystem II activity, in wheat. In the present study, it was determined that chlorophyll fluorescence parameters along with chlorophyll content have a special role in investigating the effects of drought stress on plant photosynthetic systems. Therefore, by applying drought stress, the rate of transpiration, gas exchange, maximum photochemical efficiency of photosystem II,



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.2025.95050.1421>

maximum fluorescence (F_m) and photosynthesis rate decreased. However, the use of cytokinin hormone and the combined application of micronutrients significantly increased the rate of photosynthesis, stomatal conductance, transpiration intensity, maximum photochemical efficiency of photosystem II, maximum fluorescence (F_m), minimum fluorescence (F_0), relative water content of leaf and chlorophyll content. Normal irrigation treatment increased the stable fluorescence (26.68%) and the variable fluorescence index (24.78%) compared to the normal irrigation treatment until pollination and then completely stopped irrigation. Zinc + iron + selenium elements improved the stable fluorescence (26.16%) and variable fluorescence (21.48%) compared to the control treatment. Foliar application of cytokinin at pollination + grain milking increased the stable fluorescence (15.34%) and variable fluorescence (20.74%) compared to the control. Drought stress had an inhibitory effect on various activities of the photosynthetic apparatus, especially the activity of photosystem II, in wheat, but the application of micronutrients and the hormone cytokinin reduced the inhibitory effect. The improvement of photosynthesis by cytokinin and micronutrients under stress may be due to the effect of these substances in maintaining leaf chlorophyll. It seems that cytokinin and micronutrients have inhibitory effects on the functioning of the photosynthetic apparatus. According to the results obtained, it can be concluded that the decrease in the quantum yield of photosystem II is mainly due to the occurrence of disorder in the chloroplast and the decrease in chlorophyll also confirms this issue, because chlorophyll fluorescence is directly related to the activity of chlorophyll in the reaction of photosystems and can be used as a criterion for measuring the efficiency of the photosystem.

Conclusion

The combined application of nano micronutrients (zinc + iron + selenium) led to an increase in wheat yield compared to the application of each of them individually, so the combined foliar application of these three elements is recommended to increase wheat yield. Cytokinin foliar application at the pollination + grain milk stage increased wheat yield compared to application at other stages, although various sources consider the application of nano micronutrients and cytokinin foliar application important for water stress tolerance, but the results of the present study showed that in conditions of low irrigation and stress, these strategies are not recommended to reduce the negative effects of deficit irrigation.

Keywords: Chlorophyll index, Leaf relative humidity, Micronutrients, Steady fluorescence, Variable fluorescence

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۹۷-۲۸۱

ارزیابی محلول پاشی سیتوکینین، آهن، روی و سلنیوم بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش خشکی

امیر فریدنیا^۱، فرزاد پاک‌نژاد^۱، مهدی صادقی شعاع^۲، محمد نبی ایلکایی^۱، فیاض آقایی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

چکیده

به منظور ارزیابی سیتوکینین و محلول پاشی عناصر ریزمغذی و اثرات مفید آنان بر فتوسنتز گیاه و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) در شرایط تنش خشکی، پژوهشی در دو منطقه کرج و همدان به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل‌های آزمایش شامل رژیم‌های آبیاری با سه سطح (الف: آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس در تمام دوره رشدی (شاهد)، ب: آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و ج: آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس تا پایان دوره رشد، آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و قطع آبیاری تا پایان دوره رشد)، در کرت‌های اصلی و فاکتوریل عناصر نانو کم مصرف با پنج سطح: شاهد (عدم مصرف عناصر ریزمغذی نانو)، محلول پاشی روی، آهن، سلنیوم و ترکیب سه عنصر (آهن + روی + سلنیوم) و زمان استفاده از سیتوکینین با چهار سطح (شاهد (عدم مصرف)، مصرف در مرحله گل‌دهی، مصرف در مرحله شیری شدن و مصرف در مرحله گل‌دهی + شیری شدن) در کرت‌های فرعی بودند. نتایج نشان داد که تیمار آبیاری نرمال موجب افزایش فلورسانس پایدار (۲۶/۶۸ درصد)، شاخص فلورسانس متغیر (۲۴/۷۸ درصد) نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. عناصر روی + آهن + سلنیوم سبب بهبود فلورسانس پایدار (۲۶/۱۶ درصد) و فلورسانس متغیر (۲۱/۴۸ درصد) نسبت به شاهد گردید. محلول پاشی سیتوکینین در گرده‌افشانی + شیری شدن دانه، فلورسانس پایدار (۱۵/۳۴ درصد) و فلورسانس متغیر (۲۰/۷۴ درصد) را نسبت به شاهد افزایش داد. بنابراین اعمال تنش خشکی بر گندم قابل توصیه نیست و کاربرد هورمون سیتوکینین و همچنین عناصر ریزمغذی برای بهبود شرایط کشت گندم قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: رطوبت نسبی برگ، شاخص کلروفیل، عناصر ریزمغذی، فلورسانس پایدار، فلورسانس متغیر

مقدمه

گندم از نظر تولید و سطح زیرکشت سالانه در ایران و جهان در درجه اول اهمیت قرار دارد. سطح زیرکشت گندم دیم در ایران بیش از چهار میلیون هکتار است که بیشترین سطح زیر کشت زمین‌های زراعی را شامل می‌شود. بنابراین استقلال غذایی و خودکفایی در تأمین مواد غذایی کشور مستلزم توجه زیاد به زراعت در اراضی دیم است (Agricultural Statistics, 2022). افزایش تقاضا برای غذا و مواد مغذی به دلیل رشد جمعیت، اهمیت محصول گندم را بیش از پیش افزایش می‌دهد (Hussain & Jatoti, 2021).

تنش‌های محیطی از عوامل حائز اهمیت در کاهش تولید محصولات کشاورزی در سراسر دنیا هستند. گیاهان تحت شرایط طبیعی و زراعی به طور پیوسته در معرض تنش‌های گوناگون قرار می‌گیرند و در این میان، کمبود آب مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد محصولات زراعی در بیشتر نقاط جهان می‌باشد. تنش

گندم (*Triticum aestivum* L.) از جمله مهم‌ترین غلات در کل دنیا و پر ارزش‌ترین گیاهان روی زمین است که بیش از هر محصول دیگری در دنیا کشت می‌شود. این گیاه راهبردی حاوی پروتئین و کالری بیشتری نسبت به سایر غلات است که بیش از هر محصول دیگری تأمین کالری نموده و بیشترین پروتئین را در رژیم غذایی انسان عرضه می‌کند (Wan et al., 2022; Seleiman & Kheir, 2022).

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۲- موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: Farzadpaknejad@iau.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.95050.1421>

خشکی می‌تواند باعث تغییرات ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان زراعی شود. در شرایط خشکی، ترکیبات شیمیایی گیاهان از جمله قند، پروتئین و میزان کلروفیل می‌توانند در راستای افزایش مقاومت به تنش خشکی تغییر کنند. علاوه بر این، تنش خشکی نه تنها راندمان تولید را کاهش می‌دهد، بلکه فرسایش خاک و همچنین تخریب محیط‌زیست را نیز به همراه دارد (Guerrini et al., 2020; Bhandari et al., 2020). فتوسنتز مهم‌ترین فرآیند شیمیایی روی زمین است. همچنین یک فرآیند فیزیولوژیکی کلیدی در رشد و نمو محصولات کشاورزی محسوب می‌شود و به شدت تحت تأثیر تنش خشکی قرار دارد (Han et al., 2023). کلروفیل به عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین رنگدانه در فتوسنتز می‌تواند منعکس کننده وضعیت رشد گیاهان و میزان تنش باشد. برای ارزیابی اثر تنش خشکی بر فتوسنتز گیاه از شاخص‌های فلورسانس کلروفیل استفاده می‌شود. در واقع، ارزیابی فلورسانس کلروفیل تخمینی از نحوه عملکرد فتوسنتز است. فلورسانس کلروفیل، مؤلفه‌های مختلفی دارد که با ارزیابی آن‌ها می‌توان فعالیت فتوسیستم I و II را مورد بررسی قرار داد. با افزایش فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش خشکی، کارایی فتوسنتز کاهش می‌یابد. بنابراین ارزیابی فلورسانس کلروفیل می‌تواند برای تعیین وضعیت فیزیولوژی گیاه و آسیب به سازوکار فتوسنتزی استفاده شود (Wasaya et al., 2021; Yan et al., 2021). فتوسنتز یکی از اصلی‌ترین فرآیندهای متابولیکی است که بر بازده غلات تأثیر می‌گذارد. بنابراین فعالیت فتوسنتز خالص و محتوای کلروفیل، شاخص‌های مهم سازگاری گندم با تنش گرما و سایر عوامل تنش‌زای غیرزنده هستند (Bhandari et al., 2021). لذا ارائه راهکارهایی جهت مقابله با اثرات منفی ناشی از تنش خشکی با حفظ و یا کاهش کمتر عملکرد محصول، امری بسیار ضروری است.

یکی از راهکارهای مقابله با تنش خشکی، کاربرد عناصر ریزمغذی است. محققان اظهار داشتند که استفاده از کودهای ریزمغذی می‌تواند نتایج قابل توجهی در رابطه ویژگی‌های عملکرد و افزایش دسترسی به مواد مغذی و تأثیر بر شاخص‌های فیزیولوژیکی محصول داشته باشد. همچنین کاربرد عناصر ریزمغذی باعث افزایش عملکرد محصول و بهبود اثربخشی استفاده از عناصر پرمصرف در گیاه می‌شود (Saquee et al., 2023). برخی عناصر غذایی کم‌مصرف همانند روی و آهن، برای رشد گیاه ضروری هستند و در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تولید هورمون‌های رشد و تشکیل کلروفیل دخالت دارند و کمبود آن‌ها می‌تواند موجب عدم توازن عناصر غذایی در گیاه و در نهایت کاهش کمی و کیفیت محصول شود (Hayyawi et al., 2020; Mohammed Al-Toki & Halloul, 2021). پژوهشگران اظهار داشتند که کاربرد روی موجب افزایش عملکرد و کارایی فتوسنتز گندم نسبت به شاهد شد و اثرات منفی ناشی از تنش خشکی را کاهش داد (Anwar et al., 2021).

2021). سلیوم یکی دیگر از ریزمغذی‌ها است که به دلیل حضور در سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی و تعادل هورمونی به عنوان یک عنصر مهم برای گیاه شناخته شده است (Titov et al., 2022). همچنین سازوکارهای محافظتی سلیوم در گیاهان در برابر تنش‌ها از طریق تنظیم فعالیت آنزیمی گیاهان و افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها و ترکیبات فنلی است. این سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، خسارت اکسیداتیو ناشی از تنش را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، سلیوم می‌تواند فتوسنتز گیاهان را با افزایش کارایی فتوسیستم، افزایش فلورسانس کلروفیل و کاهش تخریب غلظت کلروفیل بهبود بخشد. سلیوم به تنظیم وضعیت آب در گیاهان با ارتقای راندمان جذب آب از ریشه و کاهش از دست دادن آب از بافت‌ها کمک می‌کند و باعث تحریک رشد گیاه با ارتقای یکپارچگی سیستم غشایی می‌شود که منجر به ازدیاد طول ریشه و ساقه و تجمع زیست‌توده می‌شود (Raza et al., 2020; Li et al., 2022). محققان گزارش کردند که کاربرد سیتوکینین باعث بهبود رشد گیاه، کاهش اثرات سوء گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش انتقال مواد جذب‌شده به دانه‌ها در شرایط تنش خشکی می‌شود (Raza et al., 2020). علاوه بر این گزارش شد که کاربرد ۱۰۰ میکرومولار سیتوکینین موجب افزایش به ترتیب ۴/۳۶ درصد، ۷/۲۱ درصد و ۵/۵۵ درصد عملکرد دانه گندم در زمان اعمال خشکی در مراحل پنجه‌زنی، گرده‌افشانی و پر شدن دانه شد. سیتوکینین موجب افزایش سایر شاخص‌های فیزیولوژیکی شامل سرعت فتوسنتز، شاخص سطح برگ و محتوای کلروفیل شد. سیتوکینین رشد گیاه را بهبود بخشید، اثرات نامطلوب گونه‌های فعال اکسیژن را به حداقل رساند و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها را در شرایط خشکسالی افزایش داد (Raza et al., 2020). با توجه به کاربرد سیتوکینین و ریزمغذی‌ها بر کاهش اثرات حاصل از تنش خشکی، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی توأم محلول‌پاشی هورمون سیتوکینین و ریزمغذی‌ها در شرایط تنش خشکی بر فلورسانس کلروفیل و عملکرد گندم در شرایط آب‌وهوایی دو منطقه کرج و همدان اجرا شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو منطقه کرج و همدان طی سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ بر روی گندم (*Triticum aestivum* L.) اجرا شد. تاریخ کاشت در منطقه کرج ۱۷ مهرماه و در همدان ۱۴ مهرماه بود. اطلاعات هواشناسی مربوط به سال زراعی از ایستگاه سینوپتیک هر دو منطقه در جدول ۱ ارائه شده است. تیمارهای آزمایش شامل رژیم آبیاری با سه سطح (آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل

دسترس در تمام دوره رشدی (شاهد)، آبیاری نرمال تا گرده افشانی (معادل کد ۶۹ براساس مقیاس BBCH) و آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس تا پایان دوره رشد، آبیاری نرمال تا گرده افشانی و قطع آبیاری تا پایان دوره رشد، که در کرت های اصلی قرار گرفت و عامل دوم عناصر نانو کم مصرف با پنج سطح شامل روی، آهن، سلیوم، ترکیب سه عنصر و شاهد (عدم مصرف عناصر ریزمغذی نانو) و زمان استفاده از سیتوکینین با چهار سطح شامل مصرف در مرحله گل دهی، مصرف در مرحله شیری شدن و مصرف در مرحله گل دهی + شیری شدن و شاهد (عدم مصرف)، که به صورت فاکتوریل در کرت های فرعی قرار گرفت.

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی در دو منطقه همدان و کرج

Table 1- Meteorological information in Hamadan and Karaj regions

ماه های کشت Cultivation months	رطوبت Humidity (%)		بارندگی Precipitation (mm)		حداکثر دما Maximum temperature (C)		حداقل دما Minimum temperature (C)	
	همدان Hamadan	کرج Karaj	همدان Hamadan	کرج Karaj	همدان Hamadan	کرج Karaj	همدان Hamadan	کرج Karaj
مهر October	40	43	162.2	130.5	18	25	5	7
آبان November	39	44	151.5	128.5	14	20	1	2
آذر December	42	45	141.5	83	13	18	-2	-1
دی January	43	42	143.5	97.5	10	14	-4	-3.2
بهمن February	44	41	117.5	145.2	11	12	-7.5	-3.5
اسفند March	41	54	124.5	105.5	14	13.3	-1	1
فروردین April	38	48	121.2	97	16	15.5	3	5
اردیبهشت May	42	42	112.6	104.5	16.5	19	9	11
خرداد June	43	46	0	0	23.5	29.3	14	18

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2- Some physical and chemical properties of soil

منطقه Region	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	pH	نیترات NO ₃ (mg kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	مواد آلی Organic matter (%)	فسفر (mg kg ⁻¹)	سدیم Na (meq l ⁻¹)	بافت Texture
همدان Hamadan	1.14	7.67	7.44	509.12	0.81	13.12	6.83	لومی رسی Clay loam
کرج Karaj	2.26	8.07	8.11	411.27	0.19	8.32	7.11	رسی Clay

به وسیله بلوک گچی براساس تخلیه رطوبتی زمین مشخص و اجرا شد. بلوک ها قبلاً در مزارع تحت کشت مورد آزمایش واسنجی قرار گرفته بودند. برای محاسبه میزان آب آبیاری در هر نوبت، از روش اندازه گیری محتوای رطوبت خاک استفاده شد. بدین منظور، قبل از هر آبیاری، رطوبت خاک به وسیله دستگاه تی.دی.آر اندازه گیری گردید و حجم آب مورد نیاز در تیمار آبیاری کامل، براساس اختلاف بین

عملیات اجرایی در مهرماه سال ۱۳۹۸ با کشت بذر در مناطق کرج و همدان، با تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع آغاز گردید. عملیات آماده سازی زمین در هر منطقه شامل شخم عمیق، دیسک و تسطیح لازم در پاییز بود. قبل از آماده سازی نهایی زمین، نمونه برداری مرکب خاک از عمق ۳۰-۴۰ سانتی متری انجام و نسبت به تعیین میزان عناصر غذایی موجود در آن اقدام گردید (جدول ۲). زمان آبیاری

برگ انجام و بعد میانگین سه نقطه در نظر گرفته شد (Minolta, 1989). میزان محتوای رطوبت نسبی ۲۰ روز بعد از گل‌دهی (معادل کد ۶۵ براساس مقیاس BBCH)، از طریق رابطه (۱) محاسبه شد (Ferrat & Loyal, 1999).

$$RWC = \frac{FW - DW}{SW - DW} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، FW: وزن تر برگ، DW: وزن خشک برگ و SW: وزن اشباع برگ است. شاخص‌های فلورسانس در مزرعه شامل فلورسانس اولیه (F_0)، حداکثر فلورسانس در تاریکی (F_m)، پتانسیل عملکرد کوانتوم (F_v/F_m)، حداکثر فلورسانس در روشنایی (F_m')، افت فتوشیمیایی فلورسانس (QP) و افت غیرفتوشیمیایی فلورسانس (Q_n) به‌وسیله Portable Fluorescence Analyzer (PAM 2000, Waltz, Germany) اندازه‌گیری شدند (جدول ۳). اندازه‌گیری‌ها ۲۰ روز بعد از گل‌دهی (معادل کد ۶۵ براساس مقیاس BBCH) از ساعت ۷ تا ۱۰ صبح انجام شد. برای اندازه‌گیری، ابتدا گیره‌ها را بر روی پهنک برگ قرار داده و منفذ میانی گیره‌ها بسته شدند تا عمل سازگاری با تاریکی به مدت نیم ساعت و با تابیدن نور قرمز (۶۹۵ نانومتر) انجام شد. دستگاه به کار برده‌شده، نور با طول موج ۷۱۰ نانومتر را بازتاب می‌کند. پس از تاریک‌سازی، ابتدا گیره‌ها را به دستگاه فلورومتر وصل و سپس منفذ میانی گیره به‌منظور ورود نور به محفظه تاریک باز شد. بلافاصله دکمه روی دستگاه فلورومتر فشار داده شد تا شاخص‌های فلورسانس کلروفیل اندازه‌گیری و ثبت شود (Baker & Rosenquist, 2004). این دستگاه توانایی تخمین میزان آسیب‌های وارده در اثر تنش خشکی وارده به فتوسیستم II را دارا می‌باشد، به‌طوری که با این ابزار کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II اندازه‌گیری می‌شود (Li et al., 2010).

پس از انجام آزمون بارتلت (Bartlett, 1937) جهت اطمینان از همگن بودن واریانس خطاهای آزمایشی، تجزیه مرکب داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن با احتمال خطای پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر منطقه، رژیم‌های آبیاری، عناصر ریزمغذی و سیتوکینین بر عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه با احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که عملکرد بیولوژیک ۲۲/۷۹ درصد و عملکرد دانه ۲۰/۷۳ درصد در منطقه همدان بیشتر از کرج بود.

رطوبت خاک و حد ظرفیت زراعی برآورد گردید. با توجه به مساحت هر کرت، حجم آب آبیاری در هر نوبت براساس منحنی تخلیه رطوبتی قابل دسترس که از قبل به دست آمده بود، محاسبه شد (Paknejad et al., 2007). هورمون سیتوکینین با غلظت ۷۰ میکرومولار از شرکت سازنده Alpha Chemika تهیه شد. نانو کود روی با غلظت ۲/۵ در هزار و نانو کود آهن با غلظت ۲ در هزار و سلیوم به‌میزان ۲۰ گرم در هکتار در دو مرحله ساقه‌دهی و سنبله مورد استفاده قرار گرفتند. در حالت ترکیب کودها نیز همان مراحل اعمال شد. شرکت کود نانو روی ۱۲ درصد خضرا شماره ثبت کودی ۲۹۹۳۶ و شرکت کود نانو آهن ۹ درصد خضرا شماره ثبت کودی ۳۴۴۲۸ بود. محلول استوک نانو سلیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر از شرکت Nanosany خراسان رضوی تهیه گردید.

قبل از کشت، کود نیتروژن از منبع اوره محاسبه و با توجه به خاک مزرعه و براساس توصیه‌های متخصص تغذیه بر مبنای آزمون خاک در هر دو منطقه به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار استفاده شد و به‌مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل قبل از کاشت در مرحله آماده‌سازی زمین، به‌صورت یکنواخت در مزرعه پخش شد و با دیسک به‌عمق حدود ۱۵ سانتی‌متری خاک مخلوط شد. رقم بذر گندم استفاده‌شده SHS ۰۲۲ بود و از مرکز تحقیقات کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی کرج تهیه شد. این رقم از دورگ‌گیری بین گندم میراکل و ارقام روسی ایجاد شده است. لاین حاصل توسط اشعه گاما موتاسیون شده و سلکسیون صورت گرفت. ساقه‌ها نسبت به ارقام معمولی پُرتر بوده و دارای یک سنبله اصلی و ۵-۱۰ سنبله فرعی منشعب از سنبله اصلی بوده و رنگدانه آن قرمز می‌باشد. این رقم دارای تیپ رشد پاییزه بوده و مناسب مناطق سردسیر است. همچنین این رقم مقاوم به زنگ زرد، اما به خوابیدگی حساس است. روش کشت به‌صورت جوی و پشته‌ای توسط دستگاه کارنده غلات و با فاصله ۱۵ سانتی‌متر انجام شد، به‌طوری که فاصله هر پشته ۶۰ سانتی‌متر برای آبیاری بود که هر پشته شامل چهار خط کشت ۱۵ سانتی‌متری و هر کرت شامل سه پشته و در مجموع ۱۲ خط کشت به‌طول شش متر بود. به‌طوری که بین کرت‌های فرعی ۶۰ سانتی‌متر و بین کرت‌های اصلی ۱۸۰ سانتی‌متر فاصله بود. تاریخ برداشت در کرج ۱۹ تیرماه و در همدان ۲۵ تیرماه بود. صفاتی نظیر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، شاخص کلروفیل، محتوای رطوبت نسبی برگ و شاخص‌های فلورسانس اندازه‌گیری شدند. جهت نمونه‌برداری عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه، خط شماره ۱ و خط شماره ۱۲ و همچنین نیم‌متر از بالا و نیم‌متر از پایین کرت به‌عنوان حاشیه حذف و عملیات نمونه‌برداری از خطوط ۲ و ۴ انجام شد. در زمان ۲۰ روز بعد از گل‌دهی، شاخص کلروفیل (عدد اسپد) با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD) اندازه‌گیری شد. دستگاه کالیبره گردید و سپس کار قرائت را از سه نقطه از هر

جدول ۳- مؤلفه های اندازه گیری شده فلورسانس کلروفیل و معادلات مربوط به آنها

Table 3- Measured components of chlorophyll fluorescence and their corresponding equations

شاخص ها Parameters	مخفف Abbreviation	معادله Equation
فلورسانس متغیر Variable fluorescence	Fv	Fm-Fo
حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II Maximum photochemical quantum yield of photosystem II	Fv/Fm	(Fm-Fo)/Fm
کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II Effective photochemical quantum yield of photosystem II	Y(II)	(Fm-Ft)/ Fm'
کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II Quantum yield of regulated energy dissipation	Y(NPQ)	(Ft/ Fm')-(Ft/Fm)
کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II Quantum yield of non-regulated energy dissipation	Y(NO)	Ft/Fm
خاموشی غیرفتوشیمیایی Non-photochemical quenching	NPQ	(Fm- Fm')/ Fm'

(Klughammer & Schreiber, 2008).

داد و کاربرد سیتوکینین موجب افزایش عملکرد گندم شد، که با نتایج حاصل از مطالعه حاضر مطابقت داشت (Raza et al., 2020). همچنین ثابت شده است که تنش خشکی در طول گل دهی و پُر شدن دانه می تواند عملکرد گندم را به شدت کاهش دهد (Farooq et al., 2014). علاوه بر این، تنش خشکی ساختار کلروپلاست را مختل می کند، فعالیت آنزیم های کلیدی مرتبط با فتوسنتز را کاهش می دهد و منجر به کاهش ظرفیت فتوسنتزی می شود و بر توزیع و انتقال مواد فتوسنتزی تأثیر می گذارد و در نهایت منجر به کاهش عملکرد می شود (Castañeda-Murillo et al., 2022). کاربرد سیتوکینین عملکرد گندم را بهبود بخشید. سیتوکینین باعث افزایش زئآتین ریبوزید و تولید ایندول استیک اسید^۱ می شود، بنابراین به کاهش تنش خشکی کمک می کند (Yang et al., 2021). عناصر ریزمغذی نقش اساسی را در رشد و عملکرد دانه گندم ایفا می کنند. کود نانو دارای سطح وسیع و اندازه ذرات کمتری نسبت به اندازه منافذ برگ گیاه است که به بافت های گیاه بهتر نفوذ کرده و باعث جذب بهتر مواد مغذی می شود و با ایجاد شرایط مناسب برای رشد گندم سبب بهبود رشد گیاه و در نهایت منجر به افزایش عملکرد بیولوژیک و دانه می شود (Dimkpa & Bindraban, 2016). سلینیوم از طریق تحریک رشد ریشه، افزایش جذب آب ریشه ها و فراهمی بالاتر رطوبت خاک موجب افزایش عملکرد به خصوص در شرایط کاربرد توأم با عناصر آهن و روی شده است. گزارش شده است که محلول پاشی سلینیوم، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداری آب در خاک، جذب، نگهداری و انتقال عناصر در گیاه را افزایش می دهد. اثر مثبت سلینیوم بر عملکرد گندم می تواند به علت فراهمی نیتروژن و جلوگیری از آبشویی آن نسبت داده شود (Jameson & Song, 2016).

در بین تیمارهای آبیاری، با افزایش مقدار تنش خشکی، عملکرد بیولوژیک و دانه کاهش یافت و تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال)، عملکرد بیولوژیک را ۴۸/۴۳ درصد و عملکرد دانه را ۷۰/۸۰ درصد نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری افزایش داد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلینیوم سبب افزایش عملکرد بیولوژیک (۵۶/۴۷ درصد) و عملکرد دانه (۵۴/۳۹ درصد) نسبت به شاهد شد. در محلول پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده افشانی + شیری شدن دانه، عملکرد بیولوژیک (۶۱/۶۶ درصد) و عملکرد دانه را (۷۱/۵۶ درصد) نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۵). عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در منطقه همدان بیشتر از کرج بود که گمان می رود به علت شرایط آب و هوایی مناسب و همچنین به علت وجود مواد آلی بیشتر در خاک این امر رخ داده است. تأثیر شرایط آب و هوایی در مناطق مختلف بر گیاهان متفاوت است، این تأثیر ناشی از میزان بارندگی، نوع آب و هوا و میزان رطوبت نسبی هوا می باشد که هر کدام از این عوامل تأثیر به سزایی در رشد گیاهان دارد. از طرف دیگر، مواد آلی موجود در خاک در دو منطقه تحقیق متفاوت بود که از طریق رابطه آب و خاک و گیاه می توان به اختلاف دو منطقه و تأثیر آن بر عملکرد گیاه پی برد (Pequeno et al., 2021). تنش خشکی موجب کاهش عملکرد گندم شد. عموماً گیاهان یک ساله با قابلیت تولید بذر (مانند گندم) در مراحل اولیه گل دهی نسبت به خشکی حساس می باشند، چنانچه غلات در مراحل اولیه رشد زایشی تحت تنش قرار گیرند، عملکرد دانه آن ها به میزان قابل توجهی کاهش می یابد که احتمالاً در این حالت تقسیم میوز دچار اختلال شده و تولید گرده های سالم کاهش می یابد و در نهایت عملکرد دانه تحت تأثیر قرار می گیرد (Si et al., 2020). محققان بیان کردند که تنش خشکی در مرحله پنجه زنی، عملکرد بیولوژیک و دانه گندم را کاهش

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس صفات عملکرد، رطوبت نسبی برگ، شاخص کلروفیل و برخی شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم
Table 4- Analysis variance results of yield traits, leaf relative humidity, chlorophyll index and some chlorophyll fluorescence parameters of wheat

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares						
		عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	رطوبت نسبی برگ RWC	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	فلورسانس کمینه F0	فلورسانس بیشینه Fm	فلورسانس بیشینه در حالت اشباع Fm'
منطقه Place (P)	1	964.75**	364.97**	159.66**	95.42**	72.83**	174.83**	135.79**
تکرار در منطقه Replication in P	4	13.11	10.84	12.32	16.58	12.43	16.48	4.33
آبیاری Irrigation (I)	2	673.94**	419.11**	167.01**	117.70**	53.76**	208.65**	367.17**
P × I	2	19.72 ^{ns}	32.70 ^{ns}	19.43 ^{ns}	11.36 ^{ns}	9.88 ^{ns}	10.74 ^{ns}	16.59 ^{ns}
خطا Error	8	28.70	21.56	21.67	17.93	10.17	12.70	13.18
عناصر ریزمغذی Nano-micronutrients (B)	4	751.19**	358.72**	189.73*	96.88*	69.07*	113.52*	10.14*
P × B	4	12.70 ^{ns}	15.74 ^{ns}	5.26 ^{ns}	8.52 ^{ns}	3.26 ^{ns}	5.70 ^{ns}	2.52 ^{ns}
سیتوکینین Cytokinin (C)	3	515.83**	276.30**	109.56**	83.66**	83.34*	74.92*	15.62*
P × C	3	14.61 ^{ns}	19.47 ^{ns}	8.84 ^{ns}	9.43 ^{ns}	6.05 ^{ns}	7.05 ^{ns}	1.10 ^{ns}
I × B	8	20.73 ^{ns}	10.53 ^{ns}	9.23 ^{ns}	8.12 ^{ns}	5.81 ^{ns}	3.78 ^{ns}	2.58 ^{ns}
P × I × B	8	23.84 ^{ns}	42.11 ^{ns}	13.48 ^{ns}	11.52 ^{ns}	6.39 ^{ns}	6.09 ^{ns}	3.21 ^{ns}
I × C	6	15.66 ^{ns}	38.05 ^{ns}	10.74 ^{ns}	12.89 ^{ns}	5.24 ^{ns}	5.64 ^{ns}	2.33 ^{ns}
P × I × C	6	16.32 ^{ns}	22.91 ^{ns}	12.01 ^{ns}	11.03 ^{ns}	7.42 ^{ns}	6.85 ^{ns}	2.18 ^{ns}
B × C	12	19.87 ^{ns}	15.34 ^{ns}	10.95 ^{ns}	11.46 ^{ns}	6.60 ^{ns}	4.28 ^{ns}	1.35 ^{ns}
P × B × C	12	26.40 ^{ns}	19.56 ^{ns}	13.18 ^{ns}	12.58 ^{ns}	7.18 ^{ns}	3.12 ^{ns}	2.67 ^{ns}
I × B × C	24	11.71 ^{ns}	26.27 ^{ns}	14.58 ^{ns}	10.73 ^{ns}	6.27 ^{ns}	3.58 ^{ns}	1.12 ^{ns}
P × I × B × C	24	15.46 ^{ns}	23.48 ^{ns}	16.73 ^{ns}	12.34 ^{ns}	5.90 ^{ns}	2.97 ^{ns}	1.19 ^{ns}
خطا Error	228	21.19	15.80	12.46	14.94	8.21	10.22	7.89
ضریب تغییرات C.V		11.7	13.4	10.5	13.6	10.1	8.4	5.6

** و *: به ترتیب معنی‌دار با احتمال خطای یک و پنج درصد، ns: فاقد اثر معنی‌دار.

* and **: significant at 5% and 1% levels of probability, respectively. ns: not significant.

رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل

اثر منطقه، آبیاری، عناصر ریزمغذی و اثر سیتوکینین با احتمال خطای یک درصد بر رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل معنی‌دار شد (جدول ۴). مطابق با نتایج مقایسه میانگین، رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل به ترتیب ۱۱/۳۱ درصد و ۲۶/۶۷ درصد در همدان بیشتر از کرج بود. با اعمال تنش خشکی، رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل کاهش یافت. تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش رطوبت نسبی برگ ۴۰/۷۸ درصد و شاخص کلروفیل ۸۰/۴۴ درصد نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. در تیمارهای

عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلنیوم سبب بهبود رطوبت نسبی برگ ۴۰/۰۴ درصد و شاخص کلروفیل ۸۷/۶۷ درصد نسبت به شاهد شد. در محلول‌پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده‌افشانی + شیری شدن دانه سبب افزایش رطوبت نسبی برگ ۲۷/۹۸ درصد و شاخص کلروفیل ۶۲/۹۷ درصد نسبت به شاهد گردید (جدول ۵). باید توجه داشت که عدد کلروفیل متر مقدار کلروفیل را مشخص نمی‌کند، بلکه تخمینی از غلظت کلروفیل را نشان می‌دهد. این عدد همبستگی بالایی با مقدار کلروفیل برگ دارد. فتوسنتز یک سیستم تبدیل انرژی و متابولیک حیاتی در رشد و نمو محصولات کشاورزی است.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین صفات عملکرد، رطوبت نسبی برگ، شاخص کلروفیل و برخی شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم
Table 5- Results of comparison of average yield traits, leaf relative humidity, chlorophyll index and some chlorophyll fluorescence parameters of wheat

تیمارها Treatments	عملکرد بیولوژیک Biological yield (t ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (t ha ⁻¹)	رطوبت نسبی برگ RWC (%)	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	فلورسانس کمینه F ₀	فلورسانس بیشینه F _m	فلورسانس بیشینه در حالت اشباع F _{m'}
منطقه Place							
همدان Hamadan	27.58 ^{a*}	10.83 ^a	70.65 ^a	34.86 ^a	21.69 ^a	9.65 ^a	55.72 ^a
کرج Karaj	22.46 ^b	8.97 ^b	63.47 ^b	27.52 ^b	17.80 ^b	7.43 ^b	51.67 ^b
آبیاری Irrigation							
I ₁	26.48 ^a	11.29 ^a	74.53 ^a	34.79 ^a	23.75 ^a	10.42 ^a	58.49 ^a
I ₂	23.05 ^b	8.73 ^b	68.81 ^b	25.54 ^b	16.93 ^b	8.38 ^b	43.17 ^b
I ₃	17.84 ^c	6.61 ^c	52.94 ^c	19.28 ^c	14.26 ^c	6.64 ^b	48.72 ^c
ریزمغذی Micronutrients							
روی + آهن + سلینیوم Zinc + iron + selenium	29.01 ^a	11.78 ^a	72.43 ^a	33.97 ^a	22.87 ^a	9.61 ^a	57.24 ^a
روی Zinc	26.18 ^b	10.23 ^b	66.89 ^b	29.48 ^c	21.56 ^b	7.75 ^b	52.82 ^b
آهن Iron	25.95 ^b	10.51 ^b	62.45 ^c	32.85 ^b	20.31 ^b	7.94 ^b	52.35 ^b
سلینیوم Selenium	25.42 ^b	9.02 ^c	59.33 ^d	26.73 ^d	20.45 ^b	7.38 ^b	52.98 ^b
شاهد Control	18.54 ^c	7.63 ^d	51.72 ^e	18.10 ^e	15.68 ^c	6.03 ^c	48.27 ^c
سیتوکینین Cytokinin							
گل‌دهی + شیری شدن Flowering stage + milking development	28.42 ^a	12.25 ^a	73.21 ^a	31.52 ^a	22.61 ^a	10.11 ^a	52.48 ^a
مرحله شیری شدن Milking	25.73 ^b	10.31 ^b	66.45 ^b	28.49 ^b	20.28 ^b	8.62 ^b	50.69 ^b
مرحله گل‌دهی Anthesis	21.96 ^c	8.66 ^c	61.84 ^c	22.67 ^c	17.95 ^c	6.84 ^c	48.15 ^c
شاهد Control	17.58 ^d	7.14 ^d	57.20 ^d	19.34 ^d	15.63 ^d	6.32 ^c	47.37 ^c

* در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار هستند (آزمون دانکن با احتمال خطای پنج درصد)

* Means with similar letters in each column and each factors are not significantly different at 5% probability level.

I₁: شاهد، I₂: آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس، I₃: آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری

I₁: normal irrigation, I₂: normal irrigation from planting date to pollination stage and irrigation at 60% available moisture discharge afterward, I₃: normal irrigation in from planting date to pollination stage then with holding cut off irrigation

کاهش کلروفیل در اثر تنش خشکی به علت افزایش تولید رادیکال-های اکسیژن باشد، که این رادیکال‌های آزاد سبب پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه رنگیزه می‌شوند. بر اثر تنش خشکی، محتوای

افزایش ظرفیت فتوسنتزی برای ایجاد پایه و اساس رشد گیاه، تجمع ماده خشک و پُر شدن دانه که اساس تشکیل عملکرد محصول هستند، حائز اهمیت است (Lai et al., 2024). به نظر می‌رسد که

شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که فلورسانس کمینه (۲۱/۸۵ درصد)، فلورسانس بیشینه (۲۹/۸۷ درصد) و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع (۷/۸۳ درصد) در منطقه همدان بیشتر از کرج بود. در بین تیمارهای آبیاری، تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش فلورسانس کمینه (۵۲/۵۲ درصد)، فلورسانس بیشینه (۵۶/۹۲ درصد) و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع (۲۰/۰۵ درصد) نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گردهافشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلنیوم سبب افزایش فلورسانس کمینه (۴۵/۸۵ درصد)، فلورسانس بیشینه (۵۹/۳۶ درصد) و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع (۱۸/۵۸ درصد) نسبت به شاهد شد. در محلول پاشی سیتوکینین نیز تیمار گردهافشانی + شیری شدن دانه، فلورسانس کمینه (۴۴/۶۵ درصد)، فلورسانس بیشینه (۵۹/۹۶ درصد) و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع (۱۰/۷۸ درصد) را نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۵). وقتی مولکولهای کوئینون در وضعیت اکسید شده هستند، در این حالت سیستم دارای کمترین فلورسانس (F_0) است. به تدریج، با افزایش درجه احیاء شدن، فلورسانس افزایش می‌یابد. این فرآیند تا احیاء کامل ادامه یافته و مراکز احیاء فتوسیستم II به تدریج بسته می‌شوند و انتقال الکترون به فتوسیستم I صورت نمی‌گیرد. در این حالت، فلورسانس کلروفیل افزایش می‌یابد و مراکز فتوسیستم دارای بیشترین فلورسانس (F_m) هستند. در واقع، تنش خشکی و افزایش شدت آن با تأثیر منفی بر ظرفیت پذیرش و انتقال الکترون باعث شد که سیستم به سرعت به F_m برسد. افزایش در مقدار F_0 و کاهش در F_m ، فعالیت فتوسیستم II را مختل می‌کند. افت F_m ممکن است با کاهش فعالیت کمپلکس آنزیم تجزیه کننده آب و همچنین چرخه انتقال الکترون در درون یا اطراف فتوسیستم II مرتبط باشد (Thakur et al., 2007; Paknejad et al., 2025). هم‌راستا با نتایج حاصل از پژوهش حاضر، گزارش شده است که تنش خشکی موجب کاهش فلورسانس کمینه، بیشینه و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع گندم شده است (Ali et al., 2023). از طرف دیگر، کاربرد هورمون سیتوکینین و همچنین عناصر ریزمغذی با بهبود شرایط تغذیه‌ای و رشد گیاه سبب اثر مثبت بر ظرفیت پذیرش و انتقال الکترون شد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت (Thakur et al., 2025). هرچه فلورسانس کلروفیل کمتر باشد، گیاهان مقاومت بیشتری به تنش نشان می‌دهند، زیرا از نور دریافتی خورشید، حداکثر استفاده را می‌نمایند و کمتر آن را بازتاب و هدر می‌دهند (Sommer et al., 2023). همچنین پیرو نتایج حاصل از مطالعه حاضر، گزارش شده است که محلول پاشی روی و آهن با بهبود شرایط فتوسنتز و افزایش عملکرد گیاه موجب کاهش فلورسانس کمینه، فلورسانس بیشینه و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع در گندم شده است (Mannan et al., 2022).

رنج‌های فتوسنتزی (کلروفیل‌های a و b) در برگ‌ها کاهش می‌یابد. شرایط تنش خشکی گیاه، اثرات مهمی بر کلروفیل دارد و تنش خشکی از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های کلروفیل‌لاز و پراکسیداز در گیاهان منجر به تخریب کلروپلاست و کاهش محتوای کلروفیل می‌شود. کاهش میزان کلروفیل به دلیل تنش خشکی با افزایش رادیکال‌های اکسیژن در سلول‌ها مرتبط است (Askari et al., 2017). نتایج مطالعات سایر محققان نشان داد که تنش خشکی به طور قابل توجهی محتوای کلروفیل را کاهش داد و منجر به تولید اکسیژن فعال شد که با اجزای مختلف سلولی به ویژه لیپیدهای غشایی واکنش می‌دهد و به غشاهای فتوسنتزی آسیب می‌رساند و مهار نوری را تشدید می‌کند (Kruk & Szymbalska, 2021; Hlahla et al., 2024). عناصر ریزمغذی سبب افزایش کلروفیل شدند. آهن در سنتز کلروفیل نقش به سزایی دارد و می‌توان گفت که علت افزایش کلروفیل، نقش آهن در تولید و ساخت اجزای کلروپلاست و به ویژه انتقال الکترون است. آهن به عنوان جزئی از گروه کاتالیزوری بسیاری از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیا که در فتوسنتز، تنفس و تثبیت نیتروژن نقش دارند، اهمیت دارد (Adil et al., 2022). محتوای نسبی آب برگ، شاخص مناسبی برای بیان وضعیت آبی گیاه است و در واقع به عنوان شاخصی برای نشان دادن آسیب‌های ناشی از تنش خشکی معرفی شده است. محتوای نسبی آب بیشتر باعث افزایش میزان فتوسنتز و در نتیجه افزایش عملکرد در شرایط تنش می‌شود. حفظ محتوای آب نسبی برگ به معنای توانایی برگ در حفظ مقادیر بیشتری آب در شرایط تنش است که از طریق قابلیت تنظیم اسمزی و یا توانایی ریشه در جذب آب حاصل می‌شود (Cappelli et al., 2020). در پژوهش حاضر نیز در شرایط کمبود آب و قطع آبیاری، رطوبت نسبی برگ‌ها کاهش پیدا کرد. کاهش محتوای آب نسبی برگ و بسته شدن روزنه‌ها، اولین تأثیر تنش خشکی بوده که از طریق اختلال در سیستم ساخت مواد فتوسنتزی موجب کاهش میزان عملکرد می‌شود. تحت شرایط تنش خشکی، گیاه روزنه‌های خود را می‌بندد. در نتیجه، میزان دی‌اکسید کربن درون سلولی کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش میزان فشار آماس در اثر کاهش فتوسنتز در برگ می‌شود (Wasaya et al., 2021). گزارش شد که عناصر ریزمغذی آهن، روی و مس موجب افزایش رطوبت نسبی برگ و کلروفیل گندم شد که نتایج حاضر با پژوهش سایر محققان مطابقت داشت (Adil et al., 2022).

فلورسانس کمینه، بیشینه و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع

اثر منطقه و رژیم‌های آبیاری با احتمال خطای یک درصد، اثر عناصر ریزمغذی و سیتوکینین با احتمال خطای پنج درصد بر فلورسانس کمینه، بیشینه و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع معنی‌دار

فلورسانس پایدار و متغیر

اثر منطقه، آبیاری، عناصر ریزمغذی و اثر سیتوکینین با احتمال خطای یک درصد بر فلورسانس پایدار و متغیر معنی دار شد (جدول ۶). مطابق با نتایج مقایسه میانگین، فلورسانس پایدار و متغیر به ترتیب ۷/۳۳ درصد و ۱۰/۷۲ درصد در همدان بیشتر از کرج بود. با اعمال تنش خشکی، رطوبت فلورسانس پایدار و متغیر کاهش یافت. تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش فلورسانس پایدار ۲۶/۶۸ درصد و شاخص فلورسانس متغیر ۲۴/۷۸ درصد نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلیوم سبب بهبود فلورسانس پایدار ۲۶/۱۶ درصد و فلورسانس متغیر ۲۱/۴۸ درصد نسبت به شاهد شد. در محلول پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده افشانی + شیری شدن دانه، فلورسانس پایدار ۱۵/۳۴ درصد و فلورسانس متغیر ۲۰/۷۴ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۷). بهبود فتوسنتز به واسطه مصرف سیتوکینین و عناصر ریزمغذی تحت تنش ممکن است به دلیل اثر این مواد در حفظ کلروفیل برگ باشد. به نظر می رسد که سیتوکینین و عناصر ریزمغذی دارای اثرات بازدارنده ای بر کارکرد دستگاه فتوسنتز باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می توان چنین استنباط نمود که کاهش میزان عملکرد کوانتوم فتوسیستم II عمدتاً به خاطر وقوع آشفستگی در کلروپلاست بوده و کاهش کلروفیل نیز این موضوع را تأیید می کند، زیرا فلورسانس کلروفیل به طور مستقیم به فعالیت کلروفیل در واکنش فتوسیستم ها ارتباط داشته و می توان از آن به عنوان معیاری برای اندازه گیری کارایی فتوسیستم نام برد. در مطالعه حاضر با افزایش شدت تنش خشکی، مقدار فلورسانس متغیر (F_v) کاهش یافت. اصولاً هنگامی که پذیرنده الکترون (کوئینون) در حالت احیا باشد، مقدار فلورسانس کلروفیل زیاد است و به این علت مقدار F_v نیز در این حالت زیاد می شود؛ ولی زمانی که کوئینون در حالت اکسید است، مقدار فلورسانس کلروفیل a کم می شود؛ در نتیجه، میزان F_v کاهش می یابد. تنش های محیطی، مقدار F_v را به علت ممانعت از فتواکسیداسیون فتوسیستم II کاهش می دهد. از آنجاکه فلورسانس متغیر F_v نشان دهنده احیای کامل پذیرنده الکترون Q_A است؛ بنابراین نتیجه گیری می شود که تنش خشکی در انتقال الکترون به فتوسیستم I اختلال ایجاد کرده است (Katherine et al., 2023; Paknejad et al., 2007). در همین راستا، پژوهشگران اعلام کردند که تنش خشکی موجب کاهش فلورسانس پایدار و متغیر شد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت (Thakur et al., 2025).

کارایی کوانتومی فتوسیستم

اثر آبیاری، عناصر ریزمغذی و اثر سیتوکینین با احتمال خطای

یک درصد بر فلورسانس پایدار و متغیر معنی دار شد (جدول ۶). با اعمال تنش خشکی و افزایش شدت آن، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II، کاهش یافت. تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (۱۷/۱۰ درصد) نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلیوم موجب افزایش حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (۲۰/۸۳ درصد) نسبت به شاهد شد. در محلول پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده افشانی + شیری شدن دانه و همچنین تیمار مرحله شیری شدن سبب افزایش حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (۱۶ درصد) نسبت به شاهد و تیمار مرحله گل دهی شد (جدول ۷). علاوه بر این، نتایج بیانگر آن است که اعمال تنش خشکی و افزایش شدت آن سبب افزایش کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II و خاموشی غیرفتوشیمیایی نسبت به آبیاری نرمال شد. تیمار آبیاری نرمال تا گرده افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری سبب افزایش کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II (۴۸/۵۷ درصد)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II (۴۵/۸۴ درصد)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II (۵۳/۳۳ درصد) و خاموشی غیرفتوشیمیایی (۸۱/۲۵ درصد) نسبت به تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) شد. در بین تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، شاهد موجب افزایش کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II (۷۰/۹۶ درصد)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II (۳۴/۲۱ درصد)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II (۶۲/۵ درصد) و خاموشی غیرفتوشیمیایی (۶۴/۳۲ درصد) نسبت به تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلیوم شد. در بین تیمارهای سیتوکینین نیز تیمار شاهد موجب افزایش کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II (۷۲/۴۱ درصد)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II (۳۷/۱۴ درصد)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II (۵۶/۲۵ درصد) و خاموشی غیرفتوشیمیایی (۴۷/۵۶ درصد)، نسبت به تیمار محلول پاشی سیتوکینین گرده افشانی + شیری شدن دانه شد (جدول ۷). هرچه میزان ساخت کلروفیل کمتر باشد، برگ ها نسبت به بازدارندگی نوری آسیب پذیرتر هستند، با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر، تنش خشکی باعث کاهش کلروفیل شد و کاربرد سیتوکینین و همچنین عناصر ریزمغذی نانو، میزان کلروفیل گندم را افزایش داد که می توان بیان کرد که در تیمارهای فوق، برگ ها آسیب پذیری کمتری دارند و فتوسنتز بهتری رخ داده است (Zhang et al., 2025). در تیمارهای دارای تنش خشکی، یکی

واکنش را کاهش می‌دهد که نشان‌دهنده آن است که انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفته و کاهش یافته است. تنش خشکی باعث کاهش پایداری غشا، اما افزایش نشت یون شد. این نتایج نشان می‌دهد که تنش خشکی تأثیر نامطلوبی بر پایداری غشاء دارد و در نتیجه سلول‌ها به دلیل آسیب به غشاء، نشت یون بیشتری دارند (Sandoval et al., 2024; Thakur et al., 2025).

از دلایل کاهش فلورسانس و پتانسیل عملکرد کوانتوم (Fv/Fm)، افزایش بازدارندگی نوری به دلیل کاهش کلروفیل در این تیمارها است. تنش خشکی باعث افزایش F0 و کاهش نسبت کلروفیل فلورسانس، Fv/Fm و Fm شد. کاهش محتوای کلروفیل در تیمارهای دارای تنش نشان‌دهنده تغییرات احتمالی در PSII به عنوان پیامد سازوکار تطبیقی در کلروپلاست‌ها به دلیل قرار گرفتن در معرض تنش است. افزایش F0 و کاهش مقادیر Fv/Fm ممکن است نتیجه آسیب به مرکز واکنش PSII باشد که توانایی انتقال انرژی به مرکز

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس سایر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم

Table 6- Analysis variance results of other chlorophyll fluorescence parameters of wheat

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares						
		فلورسانس پایدار Ft	فلورسانس متغیر Fv	حد اکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II Fv/Fm	کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II Y (II)	کارایی کوانتومی غیر فتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II Y (NPQ)	کارایی کوانتومی غیر فتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II Y (NO)	خاموشی غیر فتوشیمیایی NPQ
منطقه Place (P)	1	946.83**	2251.8 ^{ns}	1.02 ^{ns}	0.94 ^{ns}	0.26 ^{ns}	0.15 ^{ns}	1.88**
تکرار در منطقه Replication in P	4	14.67	105.72	1.67	0.33	0.45	0.13	5.96
آبیاری Irrigation (I)	2	863.64**	3264.7**	8.35**	2.56**	0.73**	0.48*	16.23**
P × I	2	32.80 ^{ns}	137.82 ^{ns}	5.02 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.12 ^{ns}	3.17 ^{ns}
خطا Error	8	21.76	97.63	2.01	0.56	0.21	0.30	4.22
عناصر ریز مغذی Nano-micronutrients (B)	4	958.17**	1823.4**	3.90*	1.72*	1.18*	0.91*	10.73*
P × B	4	16.70 ^{ns}	110.79 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.34 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.027 ^{ns}	1.22 ^{ns}
سیتوکینین Cytokinin (C)	3	313.73**	2138.1**	4.98**	1.66**	0.97**	0.82*	9.75*
P × C	3	8.14 ^{ns}	111.35 ^{ns}	0.24 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.63 ^{ns}	0.92 ^{ns}
I × B	8	46.78 ^{ns}	91.70 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.006 ^{ns}	0.018 ^{ns}	1.01 ^{ns}
P × I × B	8	15.09 ^{ns}	126.18 ^{ns}	0.84 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.014 ^{ns}	1.07 ^{ns}
I × C	6	19.05 ^{ns}	97.32 ^{ns}	0.72 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.011 ^{ns}	1.24 ^{ns}
P × I × C	6	32.80 ^{ns}	84.15 ^{ns}	0.30 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.008 ^{ns}	1.18 ^{ns}
B × C	12	18.64 ^{ns}	114.97 ^{ns}	0.61 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	0.006 ^{ns}	1.02 ^{ns}
P × B × C	12	15.12 ^{ns}	101.74 ^{ns}	0.95 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.009 ^{ns}	0.97 ^{ns}
I × B × C	24	17.64 ^{ns}	95.63 ^{ns}	0.68 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.0006 ^{ns}	0.005 ^{ns}	1.25 ^{ns}
P × I × B × C	24	21.23 ^{ns}	89.04 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.009 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	0.007 ^{ns}	1.73 ^{ns}
خطا Error	228	16.84	91.67	1.18	0.42	0.10	0.16	2.34
C.V		8.4	10.8	9.0	5.3	7.2	6.2	7.5

** و *: به ترتیب معنی‌دار با احتمال خطای یک و پنج درصد، ns: فاقد اثر معنی‌دار.

* and **: significant at 5% and 1% levels of probability, respectively, ns: not significant.

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین سایر شاخص های کلروفیل گندم

Table 7- Results of comparison of other chlorophyll fluorescence parameters of wheat

تیمارها Treatments	فلورسانس پایدار Ft	فلورسانس متغیر Fv	حد اکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II Fv/Fm	کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II Y (II)	کارایی کوانتومی غیر فتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II Y(NPQ)	کارایی کوانتومی غیر فتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II Y (NO)	خاموشی غیر فتوشیمیایی NPQ
منطقه Place							
همدان Hamadan	487.65 ^{a*}	1958.43 ^a	0.86 ^a	0.42 ^a	0.34 ^a	0.16 ^a	2.26 ^a
کرج Karaj	454.31 ^b	1768.79 ^b	0.87 ^a	0.45 ^a	0.33 ^a	0.17 ^a	2.35 ^a
آبیاری Irrigation							
I ₁	542.71 ^a	2163.38 ^a	0.89 ^a	0.35 ^c	0.37 ^c	0.15 ^b	2.40 ^c
I ₂	497.26 ^b	1946.74 ^b	0.86 ^b	0.41 ^b	0.43 ^b	0.21 ^a	3.18 ^b
I ₃	428.39 ^c	1733.67 ^b	0.76 ^c	0.52 ^a	0.54 ^a	0.23 ^a	4.35 ^a
ریزمغذی Micronutrients							
روی + آهن + سلیوم Zinc+ iron+selenium	550.43 ^a	2179.84 ^a	0.87 ^a	0.31 ^c	0.38 ^c	0.16 ^c	1.85 ^c
روی Zinc	483.38 ^c	1963.04 ^b	0.81 ^b	0.42 ^b	0.43 ^b	0.21 ^b	2.41 ^b
آهن Iron	511.07 ^b	1942.55 ^b	0.82 ^b	0.39 ^c	0.44 ^b	0.22 ^b	2.34 ^b
سلیوم Selenium	467.81 ^d	1926.87 ^b	0.80 ^b	0.45 ^b	0.45 ^b	0.21 ^b	2.28 ^b
شاهد Control	436.28 ^e	1794.39 ^d	0.72 ^c	0.53 ^a	0.51 ^a	0.26 ^a	3.04 ^a
سیتوکینین Cytokinin							
گل دهی + شیری شدن Flowering stage + milking development	516.94 ^a	2123.64 ^a	0.87 ^a	0.29 ^d	0.35 ^b	0.16 ^b	2.48 ^b
مرحله شیری شدن Milking	492.35 ^a	2190.21 ^a	0.86 ^a	0.34 ^c	0.36 ^b	0.17 ^b	2.34 ^b
مرحله گل دهی Anthesis	456.28 ^b	1743.69 ^b	0.76 ^b	0.42 ^b	0.49 ^a	0.23 ^a	3.57 ^a
شاهد Control	448.17 ^b	1758.72 ^d	0.75 ^b	0.50 ^a	0.48 ^a	0.25 ^a	3.61 ^a

* در هر ستون و برای هر عامل میانگین های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی دار هستند (آزمون دانکن با احتمال خطای پنج درصد)

* Means with similar letters in each column and each factors are not significantly different at 5% probability level.

I₁: شاهد، I₂: آبیاری نرمال تا گرده افشانی و بعد از آن آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس، I₃: آبیاری نرمال تا گرده افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری

I₁: Normal irrigation, I₂: Normal irrigation from planting date to pollination stage and irrigation at 60% available moisture discharge afterward, I₃: Normal irrigation in from planting date to pollination stage then with holding cut off irrigation

در شرایط تنش خشکی، تجمع QB غیر احیاء افزایش می یابد که این امر نشان دهنده عدم انتقال الکترون از QA احیا به QB است. در

کوانتومی فتوسیستم II گیاه در شرایط تنش خشکی ممکن است به دلیل تخریب سیکل کالوین، به تأخیر افتادن احیای کوئینون‌ها و همچنین تخریب زنجیره انتقال الکترون غشای تیلاکوئید باشد (Tilahun & Sven, 2003).

همبستگی صفات

نتایج همبستگی صفات مورد مطالعه نشان داد که عملکرد دانه همبستگی منفی و معنی‌داری با صفات خاموشی غیرفتوشیمیایی (۰/۸۵-)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II (۰/۷۴-)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II (۰/۷۱-)، کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II (۰/۷۵-) داشت. علاوه بر این، عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفات شاخص کلروفیل (۰/۹۰)، رطوبت نسبی برگ (۰/۸۴) و عملکرد بیولوژیک (۰/۹۷) داشت. عملکرد دانه بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را با عملکرد بیولوژیک داشت (جدول ۸). همبستگی بین صفات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا میزان و نوع رابطه بین دو یا چند صفت را معین می‌کند و زمانی که برای صفتی گزینش در نظر گرفته می‌شود، باید به تأثیر آن صفت بر صفات دیگر توجه شود.

تنش خشکی شرایط تجمع QA نیز افزایش می‌یابد. علت این امر هنوز کاملاً مشخص نیست، ولی ممکن است کاهش آسیمیلایسون CO_2 در اثر بسته شدن روزنه‌ها در شرایط تنش خشکی منجر به مصرف نشدن محصولات حاصل از زنجیره انتقال الکترون (NADPH و ATP) شده و از این طریق میزان فرودوکسین یا احیاء افزایش یافت و به دنبال افزایش فرودوکسین احیاء شده، تولید رادیکال‌های فعال افزایش یافت و از این طریق، تغییر و یا تخریب پروتئین‌های غشاء تیلاکوئید صورت گیرد. بنابراین تخریب پروتئین‌های غشای تیلاکوئید، مانع انتقال الکترون از جایگاه پذیرنده فتوسیستم II می‌گردد و این امر موجب کاهش سرعت انتقال الکترون، افزایش فلورسانس کلروفیل و کاهش عملکرد فتوسیستم II می‌شود. تغییر میزان فعالیت فتوسیستم II و همچنین تخریب ساختمان پروتئین D1 موجود در فتوسیستم II، در نتیجه افزایش فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش خشکی است. نتایج حاصل از پژوهش‌ها نشان داد که کمپلکس آزادکننده اکسیژن فتوسیستم II و مراکز واکنش فتوسیستم II تحت تنش خشکی تخریب می‌شوند. اثر تخریبی تنش خشکی بر پروتئین‌های D1 که در ساختمان فتوسیستم II قرار دارد نیز گزارش شده است (Thakur et al., 2025; Katherine et al., 2023). کاهش سرعت انتقال الکترون و عملکرد

جدول ۸- همبستگی صفات مورد مطالعه

Table 8- Correlation of studied traits

	n=120													
	NPQ	Y (NO)	Y(NPQ)	Y (II)	Fv/Fm	F _t	F _v	F _m '	F _m	F ₀	Chl.I	RWC	BY	GY
NPQ	1	0.80**	0.82**	0.78**	-0.64**	-0.80**	-0.53*	-0.69*	-0.80**	-0.85**	-0.74**	-0.74**	-0.74**	-0.85**
Y (NO)		1	0.84**	0.81**	-0.71**	-0.63*	-0.41**	-0.65**	-0.75**	-0.58*	-0.68**	-0.68**	-0.68**	-0.74**
Y(NPQ)			1	0.85**	-0.80**	-0.75**	-0.62**	-0.70**	-0.77**	-0.71**	-0.73**	-0.73**	-0.73**	-0.71*
Y (II)				1	-0.69**	-0.66**	-0.61**	-0.68**	-0.60**	-0.69**	-0.77**	-0.77**	-0.77**	-0.75*
Fv/Fm					1	0.31	0.27	0.42	0.50	0.31	0.41	0.26	0.30	0.67*
F _t						1	0.35	0.35	0.47	0.27	0.34	0.28	0.44	0.52
F _v							1	0.34	0.31	0.30	0.40	0.30	0.35	0.43
F _m '								1	0.40	0.28	0.38	0.50	0.40	0.37
F _m									1	0.24	0.39	0.33	0.27	0.28
F ₀										1	0.42	0.28	0.39	0.40
Chl.I											1	0.88**	0.95**	0.90**
RWC												1	0.87**	0.84**
BY													1	0.97**
GY														1

*** و **: به ترتیب معنی‌دار با احتمال خطای یک و پنج درصد و اعداد بدون علامت: غیرمعنی‌دار می‌باشد.

* and **: significant at 5% and 1% levels of probability, respectively, Unsigned numbers: are not significant,

NPQ: خاموشی غیرفتوشیمیایی، Y (NO): کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II، Y (NPQ): کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II، Y (II): کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II، Fv/Fm: حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II، Fv: فلورسانس متغیر، Ft: فلورسانس پایدار، Fm': فلورسانس بیشینه در حالت اشباع، Fm: فلورسانس بیشینه، F0: فلورسانس کمینه، Chl.I: شاخص کلروفیل، RWC: رطوبت نسبی برگ، GY: عملکرد دانه، BY: عملکرد بیولوژیک.
NPQ: non-photochemical quenching, Y (NO): unregulated non-photochemical quantum efficiency of photosystem II, Y (NPQ): regulated non-photochemical quantum efficiency of photosystem II, Y (II): effective photochemical quantum efficiency of photosystem II, Fv/Fm: maximum quantum efficiency of photosystem II, Fv: variable fluorescence, Ft: steady-state fluorescence,

Fm: maximum fluorescence at saturation, Fm: maximum fluorescence, F0: minimum fluorescence, Chl.I: chlorophyll index, RWC: leaf relative humidity, GY: grain yield, BY: biological yield.

II، فلورسانس بیشینه (F_m) و سرعت فتوسنتز کاهش یافت. اما استفاده از هورمون سیتوکینین و کاربرد توأم عناصر ریزمغذی به طور معنی داری سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه ای، شدت تعرق، حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II، فلورسانس بیشینه (F_m)، فلورسانس کمینه (F_0)، رطوبت نسبی و محتوای کلروفیل را افزایش داد. شرایط آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش عملکرد گندم نسبت به سطوح تنش خشکی شد. به دلیل اینکه مرحله گل دهی گندم، حساس ترین مرحله رشدی به تنش خشکی است، لذا اعمال تنش خشکی در این مرحله توصیه نمی شود. کاربرد توأم عناصر ریزمغذی نانو (روی + آهن + سلیوم) منجر به افزایش عملکرد گندم نسبت به کاربرد تک تک آنها شد، لذا محلول پاشی توأم این سه عنصر برای افزایش عملکرد گندم توصیه می شود. محلول پاشی سیتوکینین در مرحله گرده افشانی + شیری دانه، عملکرد گندم را نسبت به مصرف در سایر مراحل افزایش داد، هرچند که منابع مختلف کاربرد عناصر تغذیه ای ریزمغذی نانو و محلول پاشی سیتوکینین را برای تحمل به تنش آبی مهم می دانند، اما نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در شرایط وجود تنش، این راهکارها برای کاهش اثرات منفی ناشی از تنش خشکی قابل توصیه نمی باشد.

همبستگی مثبت بین عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص کلروفیل و رطوبت نسبی برگ را می توان به این دلیل نسبت داد که این صفات به طور مستقیم بر بهره وری کلی گیاه تأثیر مثبت دارند و همچنین همبستگی منفی عملکرد دانه با صفات کارایی کوانتومی فتوسیستم ممکن است به این دلیل باشد که این صفات تأثیر منفی بر رشد گیاه داشته و موجب اختلال در سیستم فتوسنتز و رشد گیاه می شوند (Ibrahim, 2019). سایر محققان نیز همبستگی مثبت و معنی داری را بین عملکرد دانه گندم و عملکرد بیولوژیک، شاخص کلروفیل و رطوبت نسبی برگ بیان کردند که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر مطابقت داشت (Ibrahim, 2021; Ullah et al., 2019).

نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر می توان اظهار داشت که تنش خشکی، اثر بازدارندگی بر فعالیت های مختلف دستگاه فتوسنتزی به خصوص فعالیت فتوسیستم II در گندم دارد. در مطالعه حاضر مشخص شد که شاخص های فلورسانس کلروفیل به همراه محتوای کلروفیل، نقش ویژه ای در بررسی اثرات تنش خشکی بر سیستم های فتوسنتزی گیاه دارند. بنابراین با اعمال تنش خشکی، میزان تعرق، تبادلات گازی، حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم

References

- Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., Asghar, R. M. A., Alkahtani, J., Dwiningsih, Y., & Elshikh, M. S. (2022). Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress. *Front. Plant Science*, 13, 932861. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.932861>
- Agricultural Statistics. (2022-2023). *Ministry of Agriculture Jihad, Crops*, 1, 100.
- Ali, A., Ullah, Z., Sher, H. Abbas, Z., & Rasheed, A. (2023). Water stress effects on stay green and chlorophyll fluorescence with focus on yield characteristics of diverse bread wheat. *Planta*, 257, 104. <https://doi.org/10.1007/s00425-023-04140-0>
- Anwar, S., Khalilzadeh, R., Khan, S., Nisa, Z., Bashir, R., Pirzad, A., & Malik, A. (2021). Mitigation of drought stress and yield improvement in wheat by zinc foliar spray relates to enhanced water use efficiency and zinc contents. *International Journal of Plant Production*, 15, 377–389. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00136-6>
- Askari, A., Ardakani, M. R., Vazan, S., Palnejad, F., & Hosseini, Y. (2017). The effect of mycorrhizal symbiosis and seed priming on the amount of chlorophyll index and absorption of nutrients under drought stress in sesame plant under field conditions. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(1), 335-357. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1601_335357.
- Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55, 1607-1621. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz535>
- Bartlett, M. S. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. *Mathematical and Physical Sciences*, 160, 268-282. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109>
- Bhandari, R., Gnawali, S., Nyaupane, S., Kharel, S., Poudel, M., & Panth, P. (2021). Effect of drought and irrigated environmental condition on yield & yield attributing characteristic of bread wheat-A review. *Reviews in Food and Agriculture*, 2(2), 59–62. <http://doi.org/10.26480/rfna.02.2021.59.62>
- Castañeda-Murillo, C. C., Rojas-Ortiz, J. G., Sánchez-Reinoso, A. D., Chávez-Arias, C. C., & Restrepo-Díaz, H. (2022). Foliar brassinosteroid analogue (DI-31) sprays increase drought tolerance by improving plant growth and

- photosynthetic efficiency in lulo plants. *Heliyon*, 8(2), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08977>
10. Cappelli, A., Bettaccini, L., & Cini, E. (2020). The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. *Trends Food Science and Technology*, 104, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.008>
11. Dimkpa, C. O., & Bindraban, P. S. (2016). Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0346-6>
12. Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33, 331–349. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291>
13. Ferrat, I. L., & Loval, C. J. (1999). Relation between relative water content, nitrogen pools, and growth of *P. vulgaris* and *P. acutifolius* during water deficit. *Crop Science*, 39, 467-474. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200028x>
14. Guerrini, L., Napoli, M., Mancini, M., Masella, P., Cappelli, A., Parenti, A., & Orlandini, S. (2020). Wheat grain composition, dough rheology and bread quality as affected by nitrogen and sulfur fertilization and seeding density. *Agronomy*, 10, 233-250. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020233>
15. Hlahla, J. M., Mafa, M. S., van der Merwe, R., & Moloi, M. J. (2024). Exploring edamame survival mechanisms under combined drought and heat stress: Photosynthesis efficiency and carbohydrate accumulation, *Plant Stress*. 14, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100616>
16. Han, X., Han, S., Li, Y., Li, K., Yang, L., Ma, D., Fang, Z., Yin, J., Zhu, Y., & Gong, S. (2023). Double roles of light-harvesting chlorophyll a/b binding protein TaLhc2 in wheat stress tolerance and photosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(5), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127215>
17. Hayyawi W. A., Al-Juthery, E. A., Ali, H. M., Rafid, N., Al-Uburi, Q., NAl-Shami, M., Duraid K., & AL-Taey, A. (2020). Role of foliar application of nano NPK micro fertilizers and yeast extract on growth and yield of wheat. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 16(1), 1295-1300.
18. Hussain, A., & Jatoti, W. A. (2021). Drought tolerance indices of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under water deficit conditions. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 20, 1–19.
19. Ibrahim, A. U. (2019). Genetic variability, correlation and path analysis for yield and yield components in F6 generation of wheat (*Triticum aestivum* Em. Thell.). *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 12, 17–23.
20. Jameson, P. E., & Song, J. (2016). Cytokinin: A key driver of seed yield. *Journal of Experimental Botany*. 67, 593-606. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv461>
21. Kamal, T., Atiq, M., Khan, U., Khan, F. U., & Ahmed, S. (2020). Comparison among different stability models for yield in bread wheat. *Sarhad Journal of Agriculture*, 36, 282–290. <http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2020/36.1.282.290>
22. Katherine, A., Steven, M., Augustine, P., Goke, A., Jordan, R., Christopher, P., Kimberly, K., & Smith, D. (2023). At least it is a dry cold: the global distribution of freeze–thaw and drought stress and the traits that may impart poly-tolerance in conifers, *Tree Physiology*, 43(1), 1–15. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpac102>
23. Klughammer, C., & Schreiber, U. (2008). Complementary PS II quantum yields calculated from simple fluorescence parameters measured by PAM fluorometry and the Saturation Pulse method. *PAM Application Notes*, 1(2), 201-247.
24. Kruk, J., & Szymańska, R. (2021). Singlet oxygen oxidation products of carotenoids, fatty acids and phenolic prenyllipids. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 216, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112148>
25. Lai, H., Li, X., Chen, Y., & Liu, Z. (2024). Mitigating heat-induced yield loss in peanut: Insights into 24-epibrassinolide-mediated improvement in antioxidant capacity, photosynthesis, and kernel weight. *Field Crops Research*, 316, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109521>
26. Li, G., Wan, S., Zhou, J., Yang, Z., & Qin, P. (2010). Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. *Industrial Journal of Crops and Products*, 31(1), 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.015>
27. Li, Q., Chen, M., Li, X., Wang, Y., Zhu, Q., Gao, S., Wang, J., Wang, Y., Yu, F., Wang, X., Huo, K., & Zhang, L. (2022). Effects of foliar spraying of selenite at different time points on selenium concentration in wheat grains during grain filling period. *Grassland Science*, 68(4), 354-361. <https://doi.org/10.1111/grs.12376>
28. Mannan, M. A., Tithi, M. A., & Islam, M. R. (2022). Soil and foliar applications of zinc sulfate and iron sulfate alleviate the destructive impacts of drought stress in wheat. *Cereal Research Communications*, 50, 1279–1289. <https://doi.org/10.1007/s42976-022-00262-5>
29. Minolta, M. (1989). Manual for Chlorophyll Meter SPAD-502. Minolta Camera Co., Ltd., Japan.
30. Mohammed Al-Toki, M. A., & Halloul, R. (2021). The effect of chelated zinc and nano-zinc and interaction on growth traits of wheat (*Triticum aestivum* L.). Conference Series. *Earth Environment Science*, 923, 012072.

31. Paknejad, F., Nasri, M., Tohidi Moghadam, H. R., Zahedi, H., & Jami Alahmad, M. (2007). Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars. *International Journal of Biological Sciences*, 7(6), 841-847. <https://doi.org/10.3923/jbs.2007.841.847>
32. Pequeno, D. N. L., Hernández-Ochoa, I. M., Reynolds, M., Sonder, K., MoleroMilan, A., Robertson, R. D., Lopes, M. S., Xiong, W., Kropff, M., & Asseng, S. (2021). Climate impact and adaptation to heat and drought stress of regional and global wheat production. *Environmental Research Letters*, 16(5), 1-18. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd970>
33. Raza, M. A. S., Zaheer, M. S., Saleem, M. F., Khan, I. H., Ahmad, S., Aslam, M. U., & Iqbal, R. (2020). Drought ameliorating effect of exogenous applied cytokinin in wheat. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 57(3), 725-733.
34. Sandoval, Y., Tighe-Neira, R., Inostroza-Blancheteau, C., Soto-Cerda, B., & González-Villagra, J. (2024). Melatonin improves plant water status, photosynthetic performance, and antioxidant defense system in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plants subjected to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 323(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112528>
35. Saquee, F. S., Diakite, S., Kavhiza, N. J., Pakina, E., & Zargar, M. (2023). The efficacy of micronutrient fertilizers on the yield formulation and quality of wheat grains. *Agronomy*, 13(2), 566. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020566>
36. Seleiman, M. F., & Kheir, A. M. S. (2018). Saline soil properties, quality and productivity of wheat grown with bagasse ash and thiourea in different climatic zones. *Journal of Chemosphere*, 193, 538-546. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.053>
37. Si, Z. H., Zain, M., Mehmood, F., Wang, G., Gao, Y., & Duan, A. (2020) Effect of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain. *Journal of Agricultural Water Management*, 231, 106002. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106002>
38. Sommer, S. G., Han, E., Li, X., Rosenqvist, E., & Liu, F. (2023). The Chlorophyll fluorescence parameter Fv/Fm correlates with loss of grain yield after severe drought in three wheat genotypes grown at two CO₂ concentrations. *Plants*, 12, 436. <https://doi.org/10.3390/plants12030436>
39. Thakur, G., Singh, P., & Sharma, V. (2025). Phytohormonal crosstalk with flowering genes regulating drought stress response in citrus: A systematic review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 14, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00344-025-11838-w>.
40. Tilahun, A., & Sven, S. (2003). Mechanisms of drought resistance in grain: PSII stomatal regulation and root growth. *Ethiop Journal of Science Technology*, 26, 137-144.
41. Titov, A. F., Kaznina, N. M., Karapetyan, T. A., Dorshakova, N. V., & Tarasova, V. N. (2022). Role of selenium in plants, animals, and humans. *Biology Bulletin Reviews*, 12, 189-200. <https://doi.org/10.1134/S2079086422020104>.
42. Ullah, M. I., Mahpara, S., Bibi, R., Ullah Shah, R., Ullah, R., Abbas, S., Ullah, M. I., Hassan, A. M., El-Shehawi, A. M., Brestic, M., Zivcak, M., & Khan, M. I. (2021). Grain yield and correlated traits of bread wheat lines: Implications for yield improvement. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5714-5719. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.006>.
43. Wan, C., Dang, P., Gao, L., Wang, J., Tao, J., Qin, X., Feng, B., & Gao, J. (2022). How does the environment affect wheat yield and protein content response to drought? A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-18. 896985. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.896985>
44. Wasaya, A., Manzoor, S., Yasir, T. A., Sarwar, N., Mubeen, K., Ismail, I. A., Raza, A., Rehman, A., Hossain, A., & EL Sabagh, A. (2021). Evaluation of fourteen bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by observing gas exchange parameters, relative water and chlorophyll content, and yield attributes under drought stress. *Sustainability*, 13(9), 4799. <https://doi.org/10.3390/su13094799>
45. Yan, Z., Ma, T., Guo, S., Liu, R., & Li, M. (2021). Leaf anatomy, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of lettuce as influenced by arbuscular mycorrhizal fungi under high temperature stress. *Scientia Horticulturae*, 280, 109933. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109933>
46. Yang, D., Luo, Y., Kong, X., Haung, C., & Wang, Z. (2021). Interactions between exogenous cytokinin and nitrogen application regulate tiller bud growth via sucrose and nitrogen allocation in winter wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 329-341. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10106-3>
47. Zhang, Y., Li, Y., Liu, J., Suo, L., Li, D., He, L., Duan, J., Wang, Y., Feng, W., & Guo, T. (2025). Exogenous melatonin alleviates drought stress in wheat by enhancing photosynthesis and carbon metabolism to promote floret development and grain yield. *Plant Stress*, 16(4), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100885>

Contents

Research Articles

Induction of Salinity Tolerance in Maize (<i>Zea mays</i>) Using the Endophytic Fungus <i>Penicillium chrysogenum</i> Isolated from <i>Bassia scoparia</i> F. Ebrahimifar, F. Shahriari, M. Harati, A. Seifi	149
The Effect of Tillage Systems on Nutrient Concentrations, Root Traits and Forage Yield and in Forage Legumes N. Barati, M. Rafiee, M. Diyant, M. R. Ardakani, W. Weisany	163
Investigation of the Protective Effects of Sodium Hydrosulfide and Sodium Nitroprusside on the Toxicity of Silver Nanoparticles in Soybeans (<i>Glycine max</i> L.) S. Moayeri, M. Baradaran Firouzabadi, M. Parsaeian, A. Gholami, H. Makarian	183
Calibration, Evaluation, and Validation of the Most Appropriate Machine Learning Algorithms for Predicting Corn (<i>Zea mays</i> L.) Seed Yield under Biofertilizer Applications: An Interdisciplinary Approach M. Jahan	205
Evaluation of Yield and Agronomic Traits of Forage Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i> L.) Cultivars and Advanced Lines under Salinity Stress in the Sistan Region A. Ghasemi, M. R. Naroui Rad, M. Mohamadghasemi, H. Siasar	233
Effect of Medaxtop on Grain Yield, Seed Quality and Physiological Characteristics of Two Open-pollinated Forage Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench) Cultivars H. Alishahi, M. AghaAlikhani, F. Golzardi, F. Moradi	249
Calibration and Validation of SSM-iCrop2 Model for Simulating the Growth and Yield of Lentil (<i>Lens culinaris</i> Medik.) Z. Amani, F. Mondani, M. Ghobadi	263
Evaluation of Foliar Application of Cytokinin, Iron, Zinc and Selenium on Chlorophyll Fluorescence Parameters of Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) under Drought Stress A. Faridnia, F. Paknejad, M. Sadeghi Shoaee, M. N. Ilkaee, F. AghaYari	281

Iranian Journal of Field Crops Research

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

Vol. 24

No. 2

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.2

2026

Iranian Journal of Field Crops Research

ISSN:2008-1472

Contents

Research Articles

- Induction of Salinity Tolerance in Maize (*Zea mays*) Using the Endophytic Fungus *Penicillium chrysogenum* Isolated from *Bassia scoparia* 149**
F. Ebrahimifar, F. Shahriari, M. Harati, A. Seifi
- The Effect of Tillage Systems on Nutrient Concentrations, Root Traits and Forage Yield and in Forage Legumes 163**
N. Barati, M. Rafiee, M. Diyant, M. R. Ardakani, W. Weisany
- Investigation of the Protective Effects of Sodium Hydrosulfide and Sodium Nitroprusside on the Toxicity of Silver Nanoparticles in Soybeans (*Glycine max* L.) 183**
S. Moayeri, M. Baradaran Firouzabadi, M. Parsaeian, A. Gholami, H. Makarian
- Calibration, Evaluation, and Validation of the Most Appropriate Machine Learning Algorithms for Predicting Corn (*Zea mays* L.) Seed Yield under Biofertilizer Applications: An Interdisciplinary Approach..... 205**
M. Jahan
- Evaluation of Yield and Agronomic Traits of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Cultivars and Advanced Lines under Salinity Stress in the Sistan Region..... 233**
A. Ghasemi, M. R. Naroui Rad, M. Mohamadghasemi, H. Siasar
- Effect of Medaxtop on Grain Yield, Seed Quality and Physiological Characteristics of Two Open-pollinated Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Cultivars 249**
H. Alishahi, M. AghaAlikhani, F. Golzardi, F. Moradi
- Calibration and Validation of SSM-iCrop2 Model for Simulating the Growth and Yield of Lentil (*Lens culinaris* Medik.) 263**
Z. Amani, F. Mondani, M. Ghobadi
- Evaluation of Foliar Application of Cytokinin, Iron, Zinc and Selenium on Chlorophyll Fluorescence Parameters of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Drought Stress 281**
A. Faridnia, F. Paknejad, M. Sadeghi Shoaee, M. N. Ilkaee, F. AghaYari