



شماره ۴

جلد ۲۳

سال ۱۴۰۴

(شماره پیاپی: ۸۰)

نشریه علمی

پژوهشهای زراعی ایران

شاپا: ۱۴۷۲-۲۰۰۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

تأثیر محلول پاشی سیلیکون و کود نیتروژن در کاهش خسارت تنش خشکی بر رشد، عملکرد دانه و مراحل فنولوژی سیاه‌دانه
(*Nigella sativa* L.) ۳۷۷

فرشته کشکولی، مختار قبادی، سعید جلالی هنرمند

پارامتریایی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد، نمو فنولوژیک و عملکرد ذرت (*Zea mays* L.)
دانه‌ای در ایران ۴۰۱

نعیمه بیاتیان، افشین سلطانی، ابراهیم زینلی

بررسی تأثیر زهاب نیشکر (*Saccharum officinarum*)، کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها و اسیدسالیسیلیک
روی برخی از ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک ارقام کاملینا (*Camelina sativa* L.) ۴۱۹

حبیب نژاد قرباغی، پیمان حسینی، افراسیاب راهنما، دانیال کهریزی، علی منصفی

تأثیر نانو کود آهن بر عملکرد دانه و شاخص‌های ژنوتیپی و محیطی ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی
(*Vigna unguiculata* L.) ۴۴۱

علی اصغر قنبری، حسنعلی نقدی بادی، علی اکبر قنبری، امیر محمد ناجی

بررسی رابطه بین عملکرد دانه و چندین صفت زراعی لاین‌های بومی کنجد (*Sesamum indicum* L.)
با استفاده از روش تجزیه علیت و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ۴۶۳

بهرام مسعودی، محمد عباسعلی، احمد آئین، صابر سیف‌امیری

بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، عملکرد دانه و روغن آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)
با محلول پاشی براسینولید تحت رژیم‌های مختلف آبیاری ۴۸۱

مرضیه قاسمی، شاهرخ جهانبین، حجت‌اله لطیف‌منش، امین میرشکاری، حمید اله‌دادی

اثر اندازه ریزغده و کود زیستی فسفات بر رشد و عملکرد بذری سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) رقم سائنه ۴۹۹

نساء قره باغلی، علی سپهری

بهینه‌سازی و اعتبارسنجی دو الگوریتم یادگیری ماشین برای پیش‌بینی دقیق عملکرد گندم آبی
(*Triticum aestivum* L.) و تعیین عوامل مؤثر بر آن در استان خراسان رضوی ۵۱۳

محسن جهان

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 ۱۴۰۴

شماره ۴

جلد ۲۳

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 لابنیتز (زالف)، آلمان

اعظم لشکری

مرکز جان اینس، نورویچ، انگلیس

امیربهبزاد بذرگر

دانشکده علوم محیطی، دانشگاه گوتلف، کانادا

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیک: cesc@um.ac.ir

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

این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:

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

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

مقالات پژوهشی

- تأثیر محلول پاشی سیلیکون و کود نیتروژن در کاهش خسارت تنش خشکی بر رشد، عملکرد دانه و مراحل فنولوژی سیاه دانه (*Nigella* ۳۷۷ *sativa* L.)
فرشته کشکولی، مختار قبادی، سعید جلالی هنرمند
- پارامتریایی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش بینی رشد، نمو فنولوژیک و عملکرد ذرت (*Zea mays* L.) دانه ای در ایران ۴۰۱
نعیمه بیاتیان، افشین سلطانی، ابراهیم زینلی
- بررسی تأثیر زهاب نیشکر (*Saccharum officinarum*)، کاربرد شاخساره ای آمینواسیدها و اسیدسالیسیلیک روی برخی از ۴۱۹
ویژگی های مورفوفیز یولوژیک ارقام کاملینا (*Camelina sativa* L.)
حبیب نژاد قرباغی، پیمان حسیبی، افراسیاب راهنما، دانیال کهریزی، علی منصفی
- تأثیر نانو کود آهن بر عملکرد دانه و شاخص های ژنوتیپی و محیطی ژنوتیپ های لوییا چشم بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) ۴۴۱
علی اصغر قنبری، حسنعلی نقدی بادی، علی اکبر قنبری، امیر محمد ناجی
- بررسی رابطه بین عملکرد دانه و چندین صفت زراعی لاین های بومی کنجد (*Sesamum indicum* L.) با استفاده از روش تجزیه ۴۶۳
علیت و تجزیه به مؤلفه های اصلی
بهرام مسعودی، محمد عباسعلی، احمد آئین، صابر سیف امیری
- بهبود فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی، عملکرد دانه و روغن آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) با محلول پاشی براسینولید تحت ۴۸۱
رژیم های مختلف آبیاری
مرضیه قاسمی، شاهرخ جهانبین، حجت اله لطیف منش، امین میرشکاری، حمید اله دادی
- اثر اندازه ریزغده و کود زیستی فسفات بر رشد و عملکرد بذری سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) رقم سانه ۴۹۹
نساء قره باغلی، علی سپهری
- بهینه سازی و اعتبارسنجی دو الگوریتم یادگیری ماشین برای پیش بینی دقیق عملکرد گندم آبی (*Triticum aestivum* L.) و تعیین ۵۱۳
عوامل مؤثر بر آن در استان خراسان رضوی
محسن جهان



The Effect of Silicon Spraying and Nitrogen Fertilizer in Reducing the Drought Stress Damage on Growth, Grain Yield and Phenologic Stages of Black Cumin (*Nigella sativa* L.)

F. Kashkooli¹, M. Ghobadi^{1*}, S. Jalali Honarmand¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding author's Email: ghobadi.m@razi.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 22 November 2024

Revised: 09 February 2025

Accepted: 18 February 2025

Available Online: 13 April 2025

Kashkooli, F., Ghobadi, M., & Jalali Honarmand, S. (2025). The Effect of Silicon Spraying and Nitrogen Fertilizer in Reducing the Drought Stress Damage on Growth, Grain Yield and Phenologic Stages of Black Cumin (*Nigella sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 375-397. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.90916.1360>

Introduction

Black cumin (*Nigella sativa* L.) is a medicinal crop in the Ranunculaceae family, a dicotyledonous, herbaceous and annual plant. *Nigella sativa* is one of the eight species of this genus that can be cultivated naturally in different parts of Iran. Grains of nigella contains about 40% oil and 1.4% essential oil. The main fatty acids in nigella grain are oleic acid, linoleic acid and palmitic acid. In dry and semi-dry regions, such as west of Iran, water deficit is the most important factor that reduce the growth and production of crops. Plant's growth depends on the adequate amount of nutrients in the rhizosphere. Among nutrients, nitrogen has a particular importance. Because nitrogen plays a role in the formation of amino acids, proteins, nucleic acids and other cell compounds. Using the correct methods of mineral nutrition in plants reduces the effects of drought stress. Silicon is one of these elements. Although silicon is not an essential element for plant growth, it plays an important role in reducing the harmful effects of drought stress. The aim of this experiment was to investigate the effects of silicon foliar application and nitrogen fertilizer in modulating the negative impacts of drought stress on growth, grain yield and phonologic stages of nigella.

Materials and Methods

This experiment was carried out in the research farm of Razi University during two crop years, 2020-21 and 2021-22. The research was done in the form of two separate experiments, one under non-drought conditions and the other under drought stress conditions. Each experiment was laid out as a split plot in the form of a randomized complete blocks design (RCBD) in three replications. The main factor was the amount of nitrogen fertilizer in three levels (0, half, and equivalent to the recommended amount, respectively contain 0, 125 and 250 kg ha⁻¹ urea) and the sub-factor including silicon foliar spraying in four concentrations (0, 3, 6 and 9 mM). The measured traits were included grain yield, HI, biomass, capsules per plant, grains per capsule, 1000 grain weigh, grains per plant, days to flowering, days to physiologic ripening, grain filling period and grain filling rate. To analysis of variance of the data, the combined analysis model was used with SAS, 9.4 software. The Bartlett test was used to confirm the homogeneity of variances. In combined analysis, year was considered as a random effect and nitrogen and silicon as fixed effects. The means comparison was performed by LSD test at the probability level of 5%.



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.2025.90916.1360>

Results and Discussion

In normal moisture conditions and without silicon spraying, the application of 250 kg ha⁻¹ urea was more suitable for the investigated traits. So that the highest values of grain yield (1453 kg ha⁻¹), number of capsules per plant (33.6 capsules), number of grains per capsule (73.8 grains), number of grains per plant (2514 grains), days to physiological maturity (106.6 days) and grain filling rate (125.7 mg day⁻¹) were obtained at 250 kg ha⁻¹ urea. In the absence of nitrogen, silicon was not effective. But with nitrogen application, 6 and 9 mM silicon foliar spraying were effective. In general, under without drought stress conditions, the interaction effect of 250 kg ha⁻¹ urea × 6 mM silicon was found as the superior treatment. Under drought stress conditions and without silicon spraying, 125 kg ha⁻¹ urea was more suitable than 250 kg ha⁻¹ urea and also the no-nitrogen treatment. But in silicon spraying treatments, the use of 250 kg ha⁻¹ nitrogen achieved better results. At 125 kg ha⁻¹ nitrogen, foliar spraying of silicon 6 mM was more suitable. But at 250 kg ha⁻¹ nitrogen, foliar spraying of 9 mM silicon was better. According to the obtained results, under drought stress conditions, the consumption of 250 kg ha⁻¹ urea × silicon foliar application of 9 mM was determined as the best treatment.

Conclusion

In general, the results of this experiment showed that silicon foliar spraying was able to significantly reduce the negative effects of water deficiency in *nigella sativa*. Therefore, in order to increase the yield of *nigella*, along with the application of nitrogen fertilizer as much as the recommended amount, it is recommended to foliar spraying of 6 mM silicon under normal moisture conditions and 9 mM under drought stress conditions.

Keywords: Biologic yield, Fertilizer, Grain number, Urea

تأثیر محلول پاشی سیلیکون و کود نیتروژن در کاهش خسارت تنش خشکی بر رشد، عملکرد

دانه و مراحل فنولوژی سیاه دانه (*Nigella sativa* L.)فرشته کشکولی^{۱b}، مختار قبادی^{۱b*}، سعید جلالی هنرمند^{۱b}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

چکیده

کود نیتروژن، عملکرد دانه را افزایش می‌دهد، اما در شرایط تنش خشکی، حساسیت گیاه به خشکی را تشدید می‌نماید. این آزمایش برای ارزیابی محلول پاشی سیلیکون به همراه کود نیتروژن بر رشد و عملکرد دانه سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) انجام گرفت. این تحقیق در دانشگاه رازی طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۳۹۹ به صورت دو آزمایش جداگانه (در شرایط عدم تنش و در شرایط تنش خشکی) و هر آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی پیاده شد. عوامل آزمایشی شامل مقادیر نیتروژن به عنوان عامل اصلی (صفر، ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و محلول پاشی سیلیکون در چهار غلظت (صفر، سه، شش و نه میلی‌مولار) به عنوان عامل فرعی بودند. نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی، اثر ساده نیتروژن و سیلیکون بر صفات مورد بررسی معنی‌دار بود. اما در شرایط عدم تنش، سیلیکون بر صفات شاخص برداشت، وزن هزار دانه، روز تا گل‌دهی و طول دوره پر شدن دانه اثر معنی‌دار نداشت. اثر متقابل نیتروژن و سیلیکون در شرایط تنش بر اکثر صفات معنی‌دار شد. بالاترین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش، از تیمار اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره و محلول پاشی سیلیکون شش میلی‌مولار (۸/۶ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) به دست آمد. در حالی که در شرایط تنش خشکی، تیمار ۲۵۰ کیلوگرم اوره و محلول پاشی سیلیکون نه میلی‌مولار، از بالاترین عملکرد دانه (۱۹/۴۱ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) برخوردار بود. در شرایط تنش، کود اوره ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار برای صفت تعداد دانه در کپسول مناسب‌تر بود، اما با محلول پاشی سیلیکون، امکان افزایش مقدار کود اوره تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار وجود داشت. محلول پاشی سیلیکون با غلظت شش میلی‌مولار برای شرایط عدم تنش و نه میلی‌مولار برای شرایط تنش خشکی به همراه مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن برای سیاه دانه قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: اوره، تعداد دانه، عملکرد زیستی، کود

مقدمه

وجود دارد (Majnoon Hosseini & Davazdeh Imami, 2013). محققان برای سیاه دانه خواصی مانند ضد سرطان، ضد نفخ، ضد انگل، مسهل، ضد مالاریا، ضد ویروس، ضد صرع، ضد باکتری، مسکن، کاهش دهنده قند خون، شل کننده عضلات و محرک ایمنی را بر شمرده‌اند (Bassim Atta, 2003). از روغن فرار سیاه دانه موادی از جمله تیموکینون، دی تیموکینون و تیمول به دست می‌آید که بخش عمده‌ای از اثرات دارویی و خاصیت ضد سرطانی آن مربوط به ترکیبات تیموکینون است (Akhondian, Parsa, & Rakhshandeh, 2007).

جهان در چند دهه اخیر با چالش‌های متعدد و مهمی از جمله تغییر اقلیم و همچنین تنش‌های محیطی از جمله خشکی روبه‌رو بوده است (Tardieu, 2005). ایران به دلیل داشتن اقلیم خشک و نیمه خشک در معرض تنش خشکی شدیدتری قرار دارد

سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) یک گیاه دارویی از خانواده Ranunculaceae، گیاهی دولپه، علفی و یک ساله است. گونه *sativa* یکی از هشت گونه این جنس است که به طور طبیعی در نقاط مختلف ایران قابل کشت است (Heidari & Jahantighi, 2014). دانه‌های سیاه دانه حاوی حدود ۴۰ درصد روغن و ۱/۴ درصد اسانس است. اسیدهای چرب عمده روغن سیاه دانه، اسیدهای اولئیک، لینولئیک و پالمیتیک است. افزون بر آن، عناصر کانی در آن به وفور

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: ghobadi.m@razi.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.90916.1360>

(Cavins, & Marek, 2008). اگرچه سیلیکون عنصری ضروری برای رشد گیاهان زراعی نیست، اما تحقیقات اخیر نشان داده که برای رشد گیاهان در غلظت‌های کم، مفید بوده است. این مسأله در تنش‌های محیطی بارزتر است (Al-Aghabary, Zhu & Shi, 2005; Sanglard et al., 2014; Adrees et al., 2015; Kleiber, Calomme, & Borowiak, 2015). سازوکارهای مختلفی برای تحمل به خشکی توسط سیلیکون ارائه شده است. این موارد شامل جلوگیری از اتلاف آب از طریق تعرق (Agarie, 1998), فعال‌سازی سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاه (Gong, Zhu, Chen, Wang, & Zhang, 2005; Gunes, Pilbeam, Inal & Coban, 2008), حفظ تعادل مواد معدنی (Kaya, Tuna, & Higgs, 2006), افزایش جذب آب توسط ریشه‌ها (Sonobe et al., 2010; Liu et al., 2014), تحریک تجمع اسمولیت‌ها (Ming, Pei, Naeem, Gong, & Zhou, 2012), افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی (Chen, 2012) و تنظیم اسمزی (Zhu & Gong, 2014) است. این اثرات مفید به رسوب سیلیکون در دیواره سلولی، از طریق تغییرات آناتومیکی نسبت داده شده است (Ma & Takahashi, 2002).

تحقیقات پیشین نشان داده که مصرف کود نیتروژن سبب افزایش عملکرد محصول در گیاه سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی شده است. باین‌حال، در شرایط تنش خشکی، کود نیتروژن باید کمتر از شرایط نرمال رطوبتی مصرف شود، زیرا حساسیت گیاه به تنش خشکی را تشدید می‌نماید. لذا آزمایش حاضر با هدف مطالعه تأثیر محلول‌پاشی سیلیکون در کاهش خسارت تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد سیاهدانه انجام شد. همچنین امکان مصرف کود نیتروژن در شرایط تنش خشکی در حد و اندازه شرایط نرمال رطوبتی، با وجود محلول‌پاشی سیلیکون، هدف دیگر این تحقیق بود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی واقع در شهر کرمانشاه اجرا شد. مکان مورد نظر دارای مختصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی، و ۱۳۱۹ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. وضعیت بارندگی و دما در زمان آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. قبل از انجام آزمایش، از خاک مربوطه در چند نقطه نمونه خاک به صورت تصادفی تهیه شد. نمونه‌های خاک با هم ترکیب شدند و یک نمونه خاک مرکب به آزمایشگاه خاک‌شناسی منتقل شد. نتایج آزمون خاک در جدول ۲ ارائه شده است. تحقیق به صورت دو آزمایش جداگانه، یکی برای شرایط عدم تنش و دیگری برای تنش خشکی بود. هر آزمایش به صورت

(Moradzadeh et al., 2021). بروز تنش کم‌آبی طی مراحل مختلف رشد، به خصوص در مرحله رشد زایشی، به دلیل کاهش طول دوره فتوسنتزی و انتقال مواد حاصل از فتوسنتز جاری به دانه و کاهش میزان انتقال مجدد مواد ذخیره‌شده در ساقه به دانه باعث کاهش عملکرد دانه می‌گردد (Göksoy, Demir, Turan, & Dağüstü, 2004). وقوع تنش خشکی باعث فعال شدن فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی در گیاهان می‌شود که توانایی آن‌ها را برای مقابله با کم‌آبی افزایش می‌دهد. برخی پژوهشگران، تحمل نسبی سیاهدانه نسبت به کم‌آبی را گزارش نموده‌اند و نیاز آبی سیاهدانه در طول فصل رشد را به طور متوسط ۷۲۴ میلی‌متر گزارش کرده و اعلام داشته‌اند که بسیاری از خصوصیات گیاهی تحت تأثیر کم‌آبی قرار نگرفته است (Ghamarnia, Khosravy, & Sepehri, 2010; Ghamarnia, Miri, Jafarizadeh, & Ghobadi, 2013). چپانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh, Seyyedi, Ebrahimian, Moghaddam, & Damalas, 2018) در پژوهشی روی گیاه سیاهدانه، کاهش ۵۵/۵ و ۳۴/۶ درصدی ارتفاع بوته به ترتیب در تنش شدید و ملایم خشکی را در مقایسه با شاهد (بدون تنش) گزارش کردند. رشد و عملکرد سیاهدانه در شرایط تنش خشکی به دلیل تخریب مسیرهای متابولیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Haj Seyed Hadi, Darzi, & Riazi, 2016). در پژوهش انجام‌شده روی سیاهدانه در شرایط تنش خشکی مشخص گردید که میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و اسمولیت‌های محافظتی افزایش یافته است (Hayati, Rahimi, Kelidari, & Hosseini, 2021).

گیاهان برای رشد به میزان مناسبی از عناصر غذایی در محیط ریشه وابسته هستند. در بین عناصر غذایی، نیتروژن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نیتروژن در تشکیل آمینواسیدها، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و دیگر ترکیبات سلولی نقش دارد (Salas, Hickman, Huber, & Schreiber, 1997). در شرایط کم‌آبی، تنظیم مصرف نیتروژن با توجه به تأثیری که در توسعه رشد رویشی دارد با اهمیت است (Heidari & Jahantighi, 2014). اغلب خاک‌های کشاورزی دارای کمبود نیتروژن هستند. از بین عناصر ضروری برای گیاهان، نیتروژن بیشترین تأثیر را بر فیزیولوژی و رشد گیاه زراعی دارد (Ali, Hasan, & Islam, 2015). در گیاهان، تمام فرآیندهای اساسی به پروتئین نیاز دارند که نیتروژن بخشی جدایی‌ناپذیر از آن است. بنابراین برای بهبود تولید، استفاده از نیتروژن بسیار مهم بوده و کاربرد مناسب آن باعث افزایش رشد رویشی، عملکرد و کیفیت دانه می‌شود (İzgi, 2020).

یکی از راهکارهای کاهش اثرات زیان‌بار تنش خشکی، استفاده از روش‌های صحیح تغذیه معدنی گیاهان است. در همین رابطه، نقش برخی عناصر مانند سیلیکون مورد توجه محققان قرار گرفته است (Torabi, Majd, Enteshari, & Irian, 2013; Kamenidou,

اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار پیاده شد. عوامل آزمایشی شامل مقادیر کود نیتروژن به عنوان عامل اصلی در سه سطح (عدم کاربرد، نصف مقدار توصیه شده و معادل مقدار توصیه شده به ترتیب معادل صفر، ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره) و عامل فرعی شامل چهار مقدار سیلیکون (صفر، سه، شش و نه میلی مولار) بودند. در آزمایش مربوط به شرایط نرمال رطوبتی، آبیاری براساس نیاز گیاه انجام شد. در طی مدت انجام تحقیق، داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه به صورت روزانه دریافت و سپس تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن-مانیت-فائو محاسبه گردید (Sabzevari, Nasrollahi, 2022).

جدول ۱- بارندگی و متوسط درجه حرارت طی دوره اجرای آزمایش
Table 1- Rainfall and mean temperature during the experiment period

اطلاعات هواشناسی Weather information	سال Year	اسفند March	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد Jun	تیر July	مرداد August
بارندگی Rainfall (mm)	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2021	21.7	3.8	8	0	0	0
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2022	60.9	10.4	81.5	0	0	0
متوسط دما Mean temperature (°C)	۱۳۹۹-۱۴۰۰ 2021	8.5	14.3	21.3	25.9	30.4	29.5
	۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2022	8.7	14.6	17.5	25.9	29.9	31.1

جدول ۲- تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی متر)

Table 2- Physical and chemical analysis of the soil (0-30 cm)

مس Cu (mg kg ⁻¹)	روی Zn (mg kg ⁻¹)	آهن Fe (mg kg ⁻¹)	منگنز Mn (mg kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg kg ⁻¹)	فسفر P (mg kg ⁻¹)	نیتروژن N (%)	کربن آلی Organic C (%)	اسیدیته PH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	کلسیم کربنات CaCO ₃ (%)	بافت Texture
1.6	0.39	4.2	13	340	15	0.09	0.93	7.7	1.77	28	رسی سیلتی Silty clay

مولکولی سیلیکون (Na₂SiO₃)، مقدار مورد نظر توزین و در مقدار کمی آب حل شد و سپس به حجم نهایی رسیده و غلظت مورد نظر تهیه گردید. مراقبت‌های لازم از گیاه برای کاهش خسارت آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز در مزرعه انجام گرفت. آفت و بیماری در مزرعه مشاهده نگردید. لذا سموم شیمیایی مصرف نشد. برای مبارزه با علف‌های هرز، از وجین دستی در تمام طول دوره رشد (قبل از ساقه رفتن، اواسط رشد طولی ساقه و گل‌دهی) استفاده گردید. در هر دو آزمایش، صفات گیاهی مربوط به عملکرد دانه، اجزای عملکرد دانه و صفات فنولوژیک به شرح زیر اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری عملکرد دانه، اجزای عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت به صورت زیر انجام شد: عملیات برداشت به هنگام زرد شدن بوته‌ها و قبل از شکاف برداشتن کپسول‌ها انجام شد. پس از حذف اثر حاشیه، یک مترمربع از هر کرت برداشت شد و تمام ماده خشک اندام هوایی

آماده‌سازی اولیه زمین شامل شخم، دیسک و تسطیح قبل از کشت انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف کاشت به طول پنج متر بود. بذر سیاه‌دانه (توده سمیرم) از شرکت هالیکوک کرمانشاه تهیه شد. کشت در مزرعه در اولین زمان مناسب در اسفند ماه و از طریق کاشت بذر در زمین اصلی و با تراکم ۲۰۰ بوته در مترمربع انجام گرفت. نیتروژن از منبع کود اوره (حاوی ۴۶ درصد نیتروژن) تأمین شد. کود نیتروژن به صورت خاک‌کاربرد و در فاصله حدود دو تا پنج سانتی‌متری بوته‌ها و براساس تیمار مربوطه در سه نوبت (زمان کاشت، مرحله چهار برگگی و مرحله ابتدای رشد ساقه) در اختیار گیاه قرار گرفت. تیمار سیلیکون در طی سه مرحله (ابتدای رشد طولی ساقه، ابتدای گل‌دهی و ابتدای پر شدن دانه) اعمال شد. سیلیکون از منبع سدیم سیلیکات (ساخت شرکت سیگما، آمریکا) تأمین شد. برای تهیه محلول سیلیکون با غلظت‌های تعیین شده، ابتدا با توجه به وزن

گیاه توزین و به عنوان عملکرد بیولوژیک لحاظ شد. سپس دانه‌ها جدا شد و عملکرد دانه به دست آمد. شاخص برداشت با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (Mahdavi, Esmaeili, Falah, & Pirdashti, 2006).

$$HI = (GY/BY) \times 100 \quad (1)$$

که در آن، HI: شاخص برداشت، GY: عملکرد دانه و BY: عملکرد بیولوژیکی است.

تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، تعداد دانه در گیاه، وزن هزار دانه: بعد از رسیدگی فیزیولوژیک دانه، تعداد ۱۰ بوته از هر کرت برداشت شد. ابتدا تعداد کپسول‌ها شمارش گردید. سپس دانه از کپسول‌ها جدا شد و تعداد دانه‌ها شمارش و همچنین توزین شد. با تقسیم تعداد دانه بر تعداد کپسول، تعداد دانه در کپسول محاسبه گردید. همچنین با تقسیم وزن دانه‌ها بر تعداد آن‌ها و تعمیم آن‌ها به هزار، وزن هزار دانه به دست آمد. همچنین با ورود ۵۰ درصد گیاهان هر کرت به هر یک از مراحل فنولوژی مدنظر از جمله (روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) مرحله نموی برای تیمار مورد بررسی ثبت شد. پس از حصول اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها، برای تجزیه واریانس داده‌ها از مدل آماری طرح تجزیه مرکب در دو سال با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده گردید. همچنین نرم‌افزار Excel 2016 برای رسم نمودارها به کار گرفته شد. جهت اطمینان از یکنواخت بودن واریانس‌ها از آزمون بارلت استفاده گردید. در تجزیه واریانس مرکب، سال به عنوان اثر تصادفی و نیتروژن و سیلیکون به عنوان اثرهای ثابت در نظر گرفته شدند. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد دانه

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که هم در شرایط نرمال رطوبتی و هم در شرایط تنش خشکی، اثرهای ساده سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر عملکرد دانه معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بالاترین عملکرد دانه در شرایط رطوبتی نرمال و شرایط تنش خشکی (به ترتیب معادل ۱۴۵۳ و ۸۸۰ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب با مصرف ۲۵۰ و ۱۲۵ کیلوگرم اوره در هکتار به دست آمد (شکل ۱). این نتیجه حاکی از آن است که در شرایط تنش خشکی، مصرف نیتروژن باید کمتر از شرایط نرمال رطوبتی باشد و مصرف نیتروژن به مقدار بیشتر سبب کاهش عملکرد دانه می‌گردد. در شرایط مطلوب رطوبتی و عدم مصرف کود نیتروژن، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مصرف و عدم کاربرد سیلیکون از نظر عملکرد دانه وجود نداشت، اما با مصرف کود

نیتروژن، عملکرد دانه به محلول‌پاشی سیلیکون واکنش نشان داد، به طوری که با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار، محلول‌پاشی سیلیکون شش میلی‌مولار بیشترین عملکرد دانه (۸/۶ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) را تولید نمود. این مطلب نشان می‌دهد که در شرایط رطوبتی نرمال، تأثیر نیتروژن بیشتر از سیلیکون بوده است و در صورت تأمین نیتروژن، عملکرد دانه به محلول‌پاشی سیلیکون پاسخ مثبت نشان داده است (شکل ۱A).

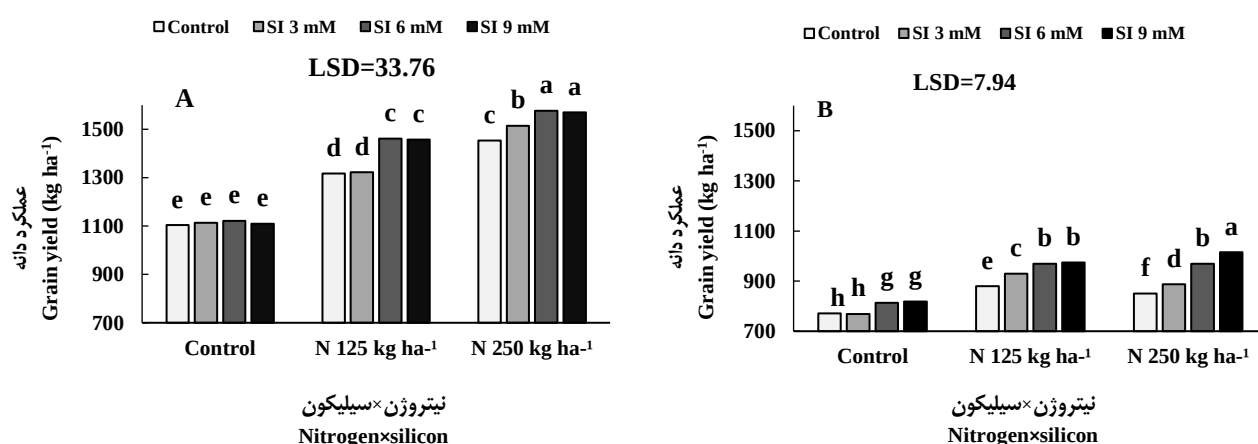
در شرایط تنش خشکی و بدون مصرف نیتروژن، محلول‌پاشی سیلیکون سه میلی‌مولار تأثیری در افزایش عملکرد دانه نداشت، اما محلول‌پاشی سیلیکون شش و نه میلی‌مولار (بدون اختلاف معنی‌دار با هم) سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شدند. در شرایط تنش خشکی و مصرف نیتروژن، افزایش غلظت سیلیکون سبب افزایش عملکرد دانه گردید، هرچند که به هنگام مصرف ۱۲۵ کیلوگرم اوره، تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد دانه بین محلول‌پاشی سیلیکون شش و نه میلی‌مولار وجود نداشت. این در حالی بود که به هنگام مصرف ۲۵۰ کیلوگرم اوره، افزایش غلظت سیلیکون در افزایش عملکرد دانه مؤثر بود و سیلیکون نه میلی‌مولار از عملکرد دانه (۱۰۱۵ کیلوگرم در هکتار) بالاتری (۴/۷ بیشتر) نسبت به سیلیکون شش میلی‌مولار (۹۶۹ کیلوگرم در هکتار) برخوردار بود (شکل ۱B). بنابراین در شرایط تنش خشکی می‌توان از مقدار معادل نیتروژن توصیه‌شده به همراه محلول‌پاشی سیلیکون نه میلی‌مولار به منظور افزایش عملکرد دانه استفاده کرد. عملکرد دانه در سیاه‌دانه حاصل برهم‌کنش اجزایی است که در مراحل مختلف رویشی و زایشی شکل می‌گیرند. وزن هزار دانه، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول از مهم‌ترین اجزای عملکرد دانه در گیاه سیاه‌دانه به شمار می‌آیند (Misra & Srivastava, 2000). تنش خشکی سبب کاهش طول دوره رویشی و تسریع ورود به فاز زایشی می‌شود که در نهایت با تأثیر بر اجزای عملکرد دانه سبب کاهش عملکرد می‌گردد (Mozaffari, Ghorbanli, Babai, & Sepehr, 2000). وقوع یک توالی از اتفاقات از جمله کاهش محتوای نسبی آب برگ، تجزیه کلروفیل در شرایط تنش خشکی منجر به کاهش فتوسنتز می‌گردد که در نهایت سبب کاهش رشد و عملکرد می‌شود (Kiami, Khalesro, Sharifi, & Mokhtassi-Bidgoli, 2024). نتایج آزمایش نشان داد که کاربرد سیلیکون در شرایط تنش خشکی توانسته اثر منفی ناشی از تنش خشکی را تعدیل کند و از شدت کاهش عملکرد در شرایط تنش جلوگیری کند. براساس نتایج حاصل از تحقیقی که توسط امیری و همکاران (Amiri, Bagheri, Khajeh, Najafabadipour & Yadalhi, 2013) صورت گرفت، مشخص شد که کاربرد دو میلی‌مولار سیلیکون باعث افزایش ۸/۳ درصدی عملکرد دانه در گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) شده است. نتایج حاصل از این گزارش با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت داشت.

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب اثرهای سال، نیتروژن، سیلیکون و اثرهای متقابل آنها از نظر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی

Table 3- Combined analysis of variance for the effects of year, nitrogen, silicon and their interactions in terms of grain yield, biological yield, and harvest index under normal moisture and drought stress conditions

میانگین مربعات Mean of squares									
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	تنش خشکی Drought stress				عدم تنش خشکی No drought stress			
		عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت HI	زیست توده Biomass	درصد نیتروژن دانه Grain nitrogen percentage	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت HI	زیست توده Biomass	درصد نیتروژن دانه Grain nitrogen percentage
سال (Y) Year	1	87640.8**	23.977**	262691 ^{ns}	0.004 ^{ns}	106.68**	44.048*	25117 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
بلوک (سال) Block (Y)	4	1840.7	8.763	215987	0.016	845	3.965	51153	0.010
نیتروژن Nitrogen (N)	2	161074.5**	21.235**	3483218**	1.286**	1078411**	0/429 ^{ns}	10009732**	1.002**
Y×N	2	61.4 ^{ns}	0.112 ^{ns}	1031 ^{ns}	0.009 ^{ns}	1982 ^{ns}	0.823 ^{ns}	12453 ^{ns}	0.001 ^{ns}
خطا ۱ Error 1	8	11069.8	2.899	153609	0.018	26349	5.325	389152	0.012
سیلیکون Silicon (S)	3	40292.5**	9.815**	1224730**	0.104**	39030**	0.634 ^{ns}	257026**	0.011**
Y×S	3	113.1 ^{ns}	0.330 ^{ns}	4251 ^{ns}	0.001 ^{ns}	1282 ^{ns}	0.304 ^{ns}	4208 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
N×S	6	4442.5**	1.364 ^{ns}	38226**	0.031**	9887**	0.383 ^{ns}	73151*	0.003**
N×S×Y	6	31.3 ^{ns}	0.391 ^{ns}	3970 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	571 ^{ns}	1.285 ^{ns}	9991 ^{ns}	0.0001 ^{ns}
خطا ۲ Error 2	36	6473.2	2.737	136323	0.007	15318	3.889	236870	0.009
ضریب تغییرات CV (%)		9.1	6.2	11.1	4.1	9.2	6.18	11.5	5.6

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



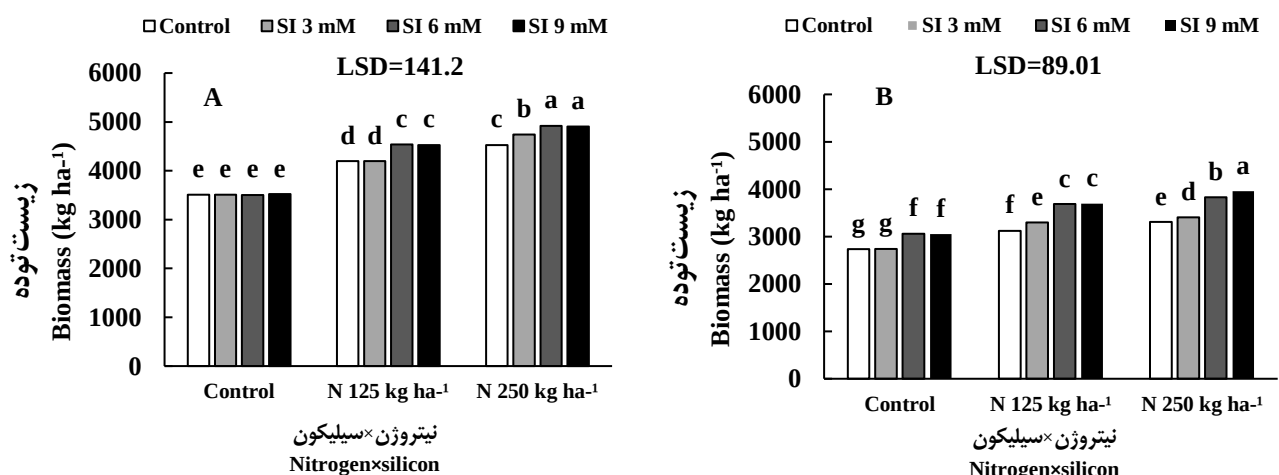
شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن×سیلیکون از نظر عملکرد دانه سیاه دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 1- Means comparison of nitrogen×Silicon interaction in terms of the grain yield in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

تعدیل کند. با مصرف نیتروژن تا سطح معادل توصیه شده و افزایش غلظت سیلیکون، روند افزایشی در عملکرد زیست توده مشاهده گردید که بهترین عملکرد به مقدار ۳۹۷۵ کیلوگرم در هکتار از غلظت نه میلی مولار سیلیکون به دست آمد که ۱۹/۶۱ درصد افزایش را نسبت به شاهد نشان داد (شکل ۲B). محققان، کاهش زیست توده در گیاه رازیانه (*Foeniculum vulgare* L.) در شرایط تنش خشکی را گزارش کردند (Jamshidi, Ghalavand, Sefidkon & Goltaph, 2013). در بررسی برهم کنش رژیم آبیاری × سیلیکون و همچنین برهم کنش رژیم آبیاری × نیتروژن در گیاه تریتیکاله (*Triticale* sp) مشخص شد که تنش آبی سبب کاهش عملکرد زیست توده در گیاه تریتیکاله شده، اما این کاهش در شرایط مصرف سیلیکون در مقایسه با عدم مصرف سیلیکون کمتر بود. این در حالی است که بیشترین عملکرد زیست توده در شرایط بدون تنش خشکی و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (به میزان ۱۷۲۲۸ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (Barati & Bijanzadeh, 2020). افزایش زیست توده گیاه در حضور سیلیکون، از طریق افزایش ظرفیت فتوسنتزی و همچنین توانایی مکانیکی ساقه و برگ برای جذب بهتر نور گزارش شده است (Loggini, Scartazza, Brugnoli & Navari-Izzo, 1999) در تحقیقی دیگر، کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در سیاه دانه سبب افزایش زیست توده گردید (Abdul-Zadeh, Vali-Pour Chahardeh Cheriki, & Qadrifar, 2017). به نظر می رسد که کاربرد نیتروژن با افزایش سطح برگ و سطح سبز، افزایش فتوسنتز و تولید آسیمیلات بیشتر سبب افزایش تولید ماده خشک و زیست توده شده است.

استفاده از سیلیکون باعث افزایش پایداری غشاء سلولی می شود. در اثر محلول پاشی سیلیکون، افزایش شاخص سطح برگ، دوام سطح برگ و افزایش جذب عناصر سبب بهبود فتوسنتز می گردد که در نهایت به افزایش تعداد دانه، افزایش وزن هزار دانه و عملکرد دانه منتهی می شود (Epstein, 1994).

عملکرد بیولوژیک (زیست توده)

در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی، اثرهای ساده نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر زیست توده سیاه دانه معنی دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون (شکل ۲) نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بالاترین زیست توده در شرایط رطوبتی نرمال (۴۵۲۸ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۳۳۰۸ کیلوگرم در هکتار) با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره به دست آمد. در شرایط مطلوب رطوبتی و عدم مصرف نیتروژن، تفاوت معنی داری بین مصرف و عدم مصرف سیلیکون مشاهده نشد. اما با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره در شرایط مطلوب رطوبتی، بالاترین عملکرد زیست توده به میزان ۴۹۱۷ کیلوگرم در هکتار از محلول پاشی شش میلی مولار سیلیکون (بدون تفاوت معنی دار با محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون) به دست آمد که نشان دهنده تأثیر مثبت مصرف اوره بر این صفت است (شکل ۲A). مقایسه میانگین همچنین نشان می دهد که در شرایط تنش خشکی و عدم مصرف نیتروژن، محلول پاشی شش میلی مولار سیلیکون به میزان ۳۰۵۹ کیلوگرم در هکتار تفاوت معنی داری با دو سطح عدم کاربرد (شاهد) و ۳ میلی مولار سیلیکون داشت که این شرایط نشان می دهد افزایش غلظت سیلیکون توانسته شرایط تنش رطوبتی را تا حدی



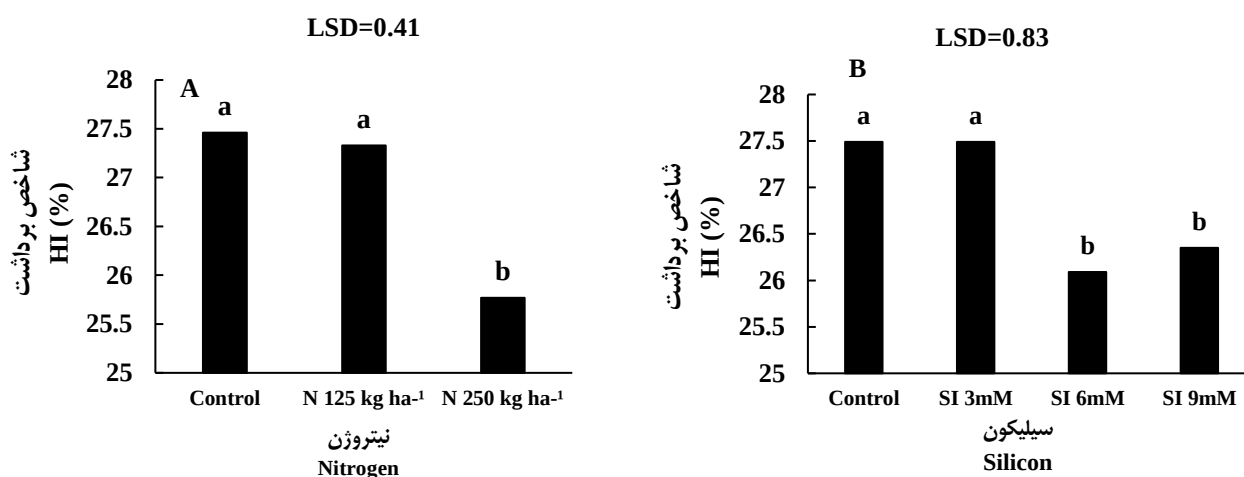
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر زیست توده سیاه دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)

Figure 2- Means comparison of nitrogen concentrations × silicon interaction in terms of the biomass under normal moisture (A) conditions and drought stress (B), (LSD 0.05)

شاخص برداشت

مواد فتوسنتزی به دانه است که نسبت بین عملکرد اقتصادی به عملکرد بیولوژیک را بیان می‌کند. طی بررسی عبدالزاده و همکاران (Abdul-Zadeh *et al.*, 2017)، شاخص برداشت در گیاه سیاه‌دانه با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره معنی‌دار شد. قمرنیا و همکاران (Ghamarnia *et al.*, 2010) کاهش شاخص برداشت در گیاه سیاه‌دانه را در شرایط تنش رطوبتی گزارش کردند. باین‌حال، یافته‌های پژوهش رضاییگی و همکاران (Rezabeigi, Bijanzadeh, Behpouri, & Barati, 2020) روی گندم (*Triticum aestivum*) نشان داد که کاربرد سه میلی‌مولار سیلیکون، شاخص برداشت را به میزان ۱۲/۲ درصد افزایش داد. محمدی و همکاران (Mohammadi, Sepehri, Abutalebian, & Hamzai, 2011) همچنین گزارش کردند که استفاده از سیلیکون در گندم سبب افزایش شاخص برداشت گردید.

در تجزیه مرکب مشخص شد که در شرایط نرمال رطوبتی، به غیر از اثر سال، سایر اثرهای ساده و متقابل بر شاخص برداشت معنی‌دار نبودند (جدول ۳). در شرایط تنش خشکی، اثرهای ساده سال، نیتروژن و سیلیکون از نظر شاخص برداشت معنی‌دار شدند ($p \leq 0.01$)، اما اثرهای متقابل آن‌ها معنی‌دار نبودند. مقایسه میانگین سطوح نیتروژن در شرایط تنش خشکی نشان داد که ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار از شاخص برداشت پایین‌تری در مقایسه با ۱۲۵ کیلوگرم اوره و همچنین شاهد (بدون کود نیتروژن) برخوردار بود (شکل ۳A). مقایسه میانگین سطوح سیلیکون از نظر شاخص برداشت دانه در شرایط تنش خشکی نشان داد که بالاترین شاخص برداشت مربوط به شاهد (بدون سیلیکون) و سیلیکون سه میلی‌مولار بود (شکل ۳B). این نتیجه نشان می‌دهد که تأثیر سیلیکون بر بخش رویشی گیاه بیشتر از بخش زایشی (دانه) بوده است. شاخص برداشت، معیاری از کارایی توزیع



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات ساده نیتروژن (A) و سیلیکون (B) از نظر شاخص برداشت سیاه‌دانه در شرایط تنش خشکی

Figure 3- Means comparison of simple effects of nitrogen (A) and silicon (B) in nigella in terms of harvest index under drought stress. (LSD 0.05)

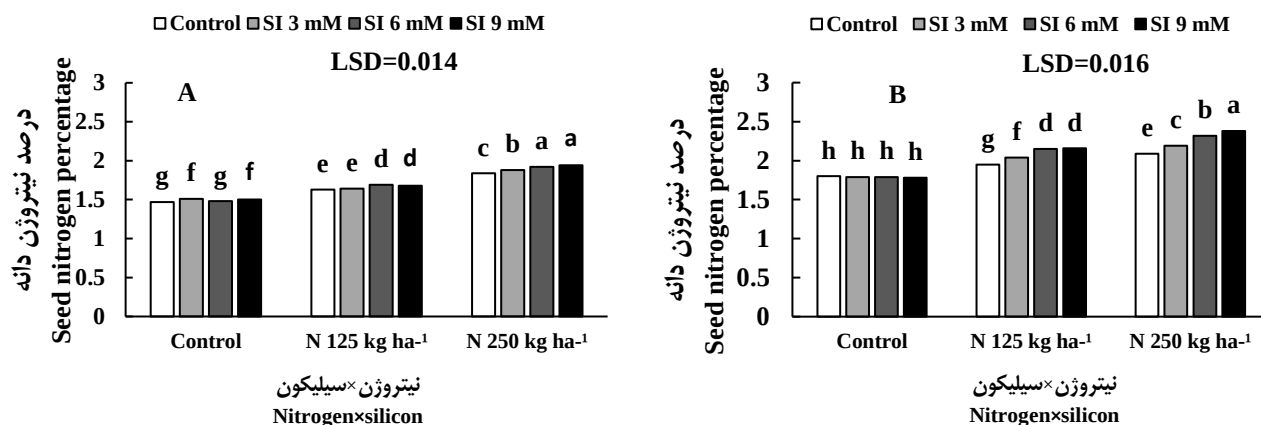
درصد نیتروژن دانه

هم در شرایط تنش خشکی، محلول پاشی سیلیکون تأثیر چندانی در افزایش درصد نیتروژن دانه نداشت، اما با افزایش مصرف کود نیتروژن، تأثیر محلول پاشی سیلیکون بیشتر شد. مقایسه میانگین نشان داد که در شرایط مطلوب رطوبتی، بیشترین درصد نیتروژن دانه (به ترتیب با ۱/۹۲ و ۱/۹۴ درصد) در شرایط کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، از غلظت‌های شش و نه میلی‌مولار سیلیکون به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشتند (شکل ۴A). در شرایط تنش رطوبتی، با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره، بالاترین درصد نیتروژن دانه به میزان ۲/۳۸ درصد از محلول پاشی نه میلی‌مولار سیلیکون به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری داشت.

تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات ساده نیتروژن و سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر درصد نیتروژن دانه در شرایط مطلوب رطوبتی و همچنین در شرایط تنش خشکی معنی‌دار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون (شکل ۴، A و B) نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بالاترین درصد نیتروژن دانه در شرایط رطوبتی نرمال (۱/۸۴ درصد) و تنش خشکی (۲/۰۹ درصد) با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره به دست آمد. بدون مصرف کود نیتروژن هم در شرایط نرمال رطوبتی و

خاک را افزایش می‌دهد و از این طریق بر مراحل فنولوژی گیاه اثر می‌گذارد (Lin, Sattelmacher, Kutzmutz, Mühling, & Dittert, 2004). ظرفیت جذب نیتروژن و همچنین فعالیت آنزیم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در شرایط تنش خشکی کاهش می‌یابد (Araya, Habtu, Hadgu, Kebede, & Dejene, 2010). در تحقیق انجام‌شده توسط دیرن (Deren, 1997)، مشخص گردید که میزان نیتروژن در بافت‌های مختلف گیاه با مصرف سیلیکون افزایش یافت.

(شکل ۴B). یکی از عوامل کاهش عملکرد در شرایط تنش خشکی، عدم دسترسی کافی به نیتروژن است (Bista, Heckathorn, Jayawardena, Mishra, & Boldt, 2018). نیتروژن به دلیل نقش مهمی که در ساختار پروتئین‌ها، آنزیم‌ها، کوآنزیم‌ها و اسیدهای نوکلئیک دارد از اهمیت خاصی در ساختار گیاه برخوردار است (Hassegawa et al., 2008). نیتروژن از طریق تغییر در ترکیبات شیمیایی گیاه و خاک، توانایی جذب مواد آلی و غیرآلی از محلول



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر درصد نیتروژن دانه سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 4- Means comparison of nitrogen × silicon interaction in terms of the seed nitrogen percentage in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

سیلیکون تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۵A).

در شرایط تنش خشکی و عدم مصرف نیتروژن، با افزایش غلظت سیلیکون، تعداد دانه در کپسول افزایش یافت، به طوری که بیشترین تعداد کپسول در بوته از محلول‌پاشی ۸ میلی‌مولار سیلیکون به دست آمد که با بقیه سطوح سیلیکون به جز شش میلی‌مولار تفاوت معنی‌دار داشت. با مصرف نیتروژن در شرایط تنش رطوبتی، روند افزایشی در تعداد کپسول در بوته مشاهده شد و بیشترین تعداد کپسول در بوته از محلول‌پاشی ۸ میلی‌مولار سیلیکون (۲۴/۸۱ کپسول در بوته) به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۵B). تنش خشکی از طریق تغییر در ویژگی‌های فیزیولوژیکی از جمله کاهش ظرفیت فتوسنتزی، بسته شدن روزنه، کاهش مقدار کربوهیدرات و اختلال در تقسیم ماده خشک به اندام‌های زایشی و رویشی سبب کاهش تعداد کپسول در بوته در گیاه سیاهدانه و در نهایت عملکرد می‌شود (Ozer, Coban, Sahin, & Ors, 2020). رانا و همکاران (Rana, Singh, Naruka, & Rathore, 2012) نیز افزایش تعداد کپسول در بوته در گیاه سیاهدانه با کاربرد نیتروژن را گزارش کردند. این در حالی است که در تحقیق سلطانی و همکاران (Soltanieh, Talei, & Nejatkah, 2023)، کاربرد نیتروژن سبب کاهش تعداد کپسول در بوته شد که با نتایج این پژوهش مغایرت داشت.

تعداد کپسول در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که هم در شرایط نرمال رطوبتی و هم در شرایط تنش خشکی، اثرات ساده سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد کپسول در بوته معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون (شکل ۵) در صفت تعداد کپسول در دانه نشان داد که در شرایط نرمال رطوبتی و عدم مصرف سیلیکون، بیشترین تعداد کپسول در بوته از مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره (۳۳/۶ کپسول در بوته) و در شرایط تنش خشکی از کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود اوره (۲۱/۱۶ کپسول در بوته) به دست آمد. این نتیجه نشان داد که مصرف کود اوره بیشتر از ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار سبب کاهش در این صفت گردید، اما با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه محلول‌پاشی ۸ میلی‌مولار سیلیکون حداکثر تعداد دانه در کپسول (۲۴/۸۱) به دست آمد. در شرایط مطلوب و عدم مصرف نیتروژن، بین مصرف و عدم مصرف سیلیکون تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. مقایسه میانگین همچنین در شرایط مطلوب و مصرف نیتروژن نشان داد که بیشترین تعداد کپسول در بوته در شرایط کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، از غلظت شش میلی‌مولار سیلیکون (۳۵/۵ کپسول در بوته) به دست آمد که با سایر تیمارها به جز غلظت ۸ میلی‌مولار

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب اثرات سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل آن‌ها از نظر تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه و تعداد دانه در گیاه در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی

Table 4- Combined analysis of variance for the effects of year, nitrogen, silicon and their interactions in terms of the number of capsules per plant, the number of seeds per capsule, 1000-grain weight, and the number of grains per plant under normal moisture and drought stress

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares							
		تنش خشکی Drought stress				عدم تنش خشکی No drought stress			
		تعداد کپسول در بوته Capsules per plant	تعداد دانه در کپسول Grains per capsule	وزن هزار دانه 1000-grain weight	تعداد دانه در گیاه grains per plant	تعداد کپسول در بوته Capsules per plant	تعداد دانه در کپسول Grains per capsule	وزن هزار دانه 1000-grain weight	تعداد دانه در گیاه Grains per plant
سال (Y) Year	1	165.31*	760.50**	0.562**	2039896**	1202.95**	1760.22**	1.55**	1463138**
بلوک (سال) Block (Y)	4	8.50	3.77	0.008	36427	1.72	9.55	0.24	24595
نیتروژن Nitrogen (N)	2	93.63**	416.09*	0.083*	1104987**	504.70*	1053.43*	0.348*	6767143*
Y×N	2	0.144 ^{ns}	15.87 ^{ns}	0.001 ^{ns}	3475 ^{ns}	13.60 ^{ns}	126.09*	0.008 ^{ns}	263553 ^{ns}
خطا ۱ Error 1	8	3.16	10.23	0.008	26147	4.49	25.66	0.011	79406
سیلیکون Silicon (S)	3	22.32**	77.09**	0.034**	255049**	13.40**	27.37**	0.006 ^{ns}	198080*
Y×S	3	0.482 ^{ns}	0.056 ^{ns}	0.001 ^{ns}	5137 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.63 ^{ns}	0.001 ^{ns}	12509 ^{ns}
N×S	6	3.43**	5.46**	0.005**	28603**	4.80*	4.80*	0.002 ^{ns}	46497*
N×S×Y	6	0.119 ^{ns}	0.319 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	1226 ^{ns}	0.65 ^{ns}	0.94 ^{ns}	0.001 ^{ns}	5738 ^{ns}
خطا ۲ Error 2	36	2.88	8.56	0.006	20233	6.12	19.23	0.010	50615
ضریب تغییرات CV (%)		7.8	4.5	4.4	10.0	8.1	6.2	5.2	10.2

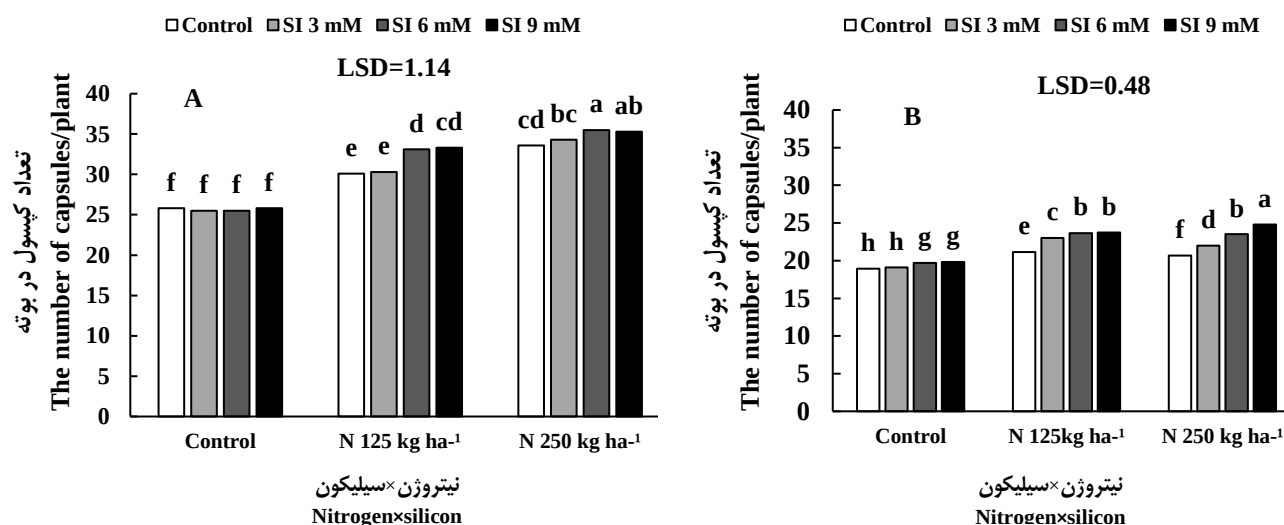
ns, * و **: به ترتیب بدون اختلاف معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

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

تعداد دانه در کپسول

تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات ساده سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر تعداد دانه در کپسول در شرایط مطلوب رطوبتی و همچنین در شرایط تنش خشکی معنی‌دار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون نشان داد که در شرایط عدم حضور نیتروژن، افزایش غلظت سیلیکون در شرایط مطلوب رطوبتی نتوانست بر تعداد دانه در کپسول مؤثر باشد. با کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم اوره در هکتار، روند افزایشی در تعداد دانه در کپسول مشاهده شد. بهترین تیمار در شرایط مطلوب رطوبتی از کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار × محلول پاشی سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار به تعداد ۷۷/۸ دانه در کپسول به دست آمد که افزایش

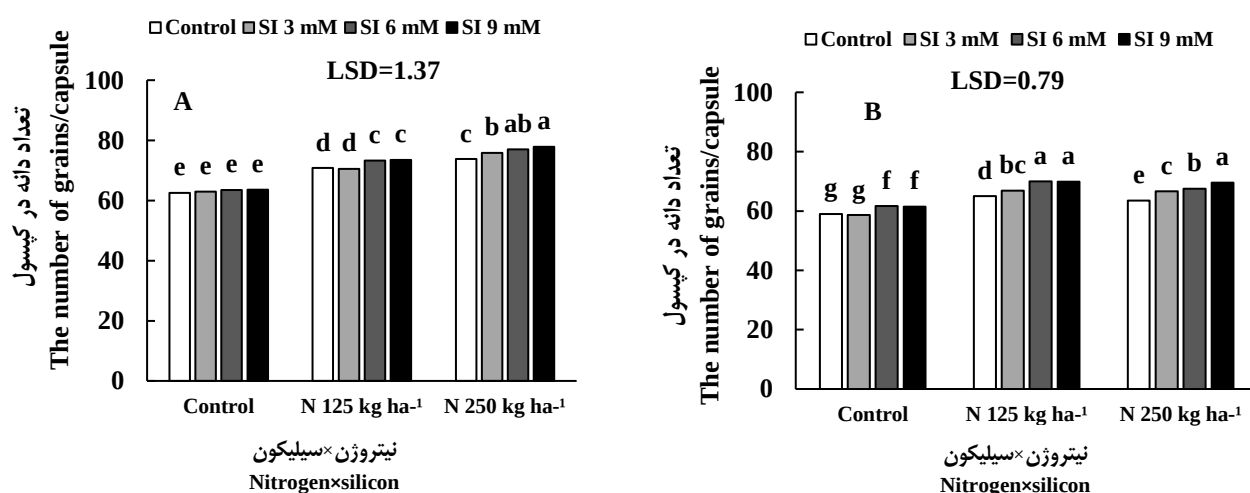
۲۴/۴۸ درصدی را نسبت به شاهد (بدون نیتروژن و سیلیکون) نشان داد (شکل ۶A). در مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون در شرایط تنش خشکی مشخص شد که در کلیه سطوح نیتروژن مورد مطالعه افزایش غلظت سیلیکون، روند افزایشی در تعداد دانه در کپسول را نشان داد. در شرایط تنش خشکی، بیشترین تعداد دانه در کپسول از تیمار اثر متقابل ۱۲۵ کیلوگرم اوره × شش میلی‌مولار سیلیکون با ۷۰/۰۰ دانه در کپسول (افزایش ۱۸/۶۴ درصدی نسبت به شاهد) به دست آمد که با تیمارهای ۱۲۵ کیلوگرم اوره × محلول پاشی سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار و همچنین اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره × محلول پاشی سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار (به ترتیب با ۶۹/۸۳ و ۶۹/۵۰ دانه در کپسول) تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۶B).



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد کپسول در بوته سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 5- Means comparison of nitrogen × silicon interaction in terms of the capsules per plant in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

(Ali, 2019). گزارش شده است که افزایش تعداد دانه در کپسول در گیاه سیاهدانه (Rana et al., 2012) و جو بهاره (Hordeum vulgare L., Tariq Alislami, Zarghami, MashhadiAkbar) ناشی از افزایش در محتوای کلروفیل، افزایش سرعت رشد محصول و شاخص سطح برگ بود. در تحقیق رضاییگی و همکاران (Rezabeigi et al., 2020) مشخص شد که تعداد دانه در سنبله گندم با کاربرد دو میلی-مولار برگی سیلیکون، ۲۵/۴ درصد نسبت به زمان عدم مصرف سیلیکون افزایش یافت.

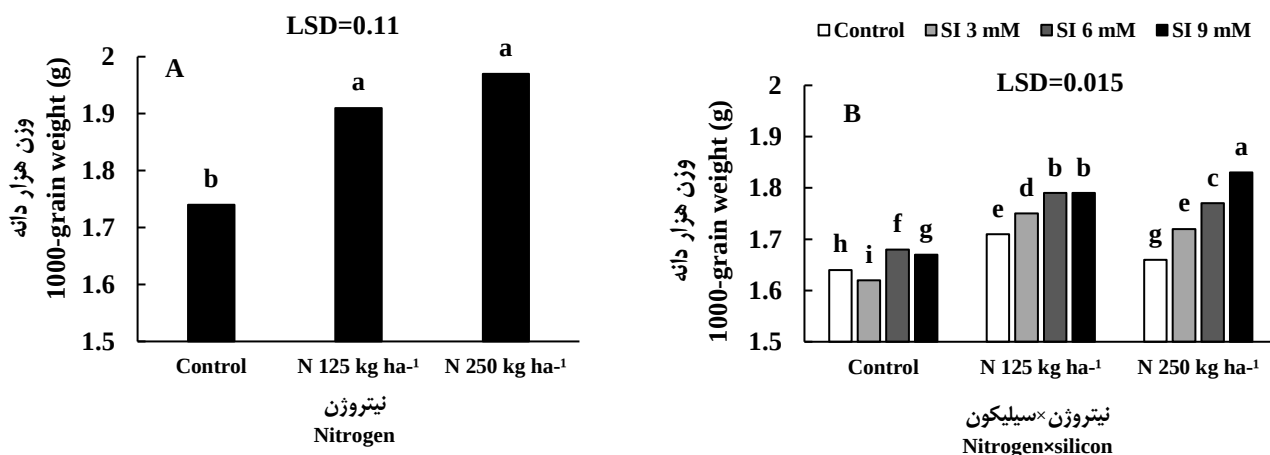
براساس نتایج حاصل از پژوهشی که توسط عبدالزاده و همکاران (Abdul-Zadeh et al., 2017) روی سیاهدانه انجام شد، مشخص گردید که کاربرد کود نیتروژن بر صفت تعداد دانه در کپسول اثر معنی‌دار داشت. دیتا و همکاران (Datta, Rai, & Ashutosh, 2022) در پژوهشی که روی سیاهدانه انجام دادند، بیان کردند که با مصرف ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بیشترین تعداد دانه در کپسول در مقایسه با شاهد (عدم مصرف نیتروژن) به دست آمد که با نتایج تحقیق حاضر در رابطه با افزایش تعداد دانه در کپسول با افزایش میزان نیتروژن مطابقت داشت (El-Leithy, Abdallah, &)



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد دانه در کپسول سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 6- Means comparison of nitrogen × silicon interaction in terms of the number of grains per capsule in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

وزن هزار دانه

مطابق با نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها، در شرایط رطوبتی نرمال فقط سال و نیتروژن بر وزن هزار دانه اثر معنی‌دار داشتند. در شرایط تنش خشکی، اثرهای سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون بر وزن هزار دانه معنی‌دار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن در شرایط نرمال رطوبتی نشان داد که وزن هزار دانه با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن ۱۳/۲۱ درصد افزایش نسبت به شاهد (عدم مصرف نیتروژن) داشت، اما تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن نداشت (شکل ۷A). در شرایط تنش خشکی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، افزودن کود نیتروژن سبب افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه شد. باین‌حال، کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم اوره از وزن هزار دانه بالاتری نسبت به ۲۵۰ کیلوگرم اوره برخوردار بود. هنگامی که ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار اوره مصرف شد، غلظت‌های سه، شش و نه میلی‌مولار سیلیکون، وزن هزار دانه را افزایش دادند، هر چند که غلظت‌های شش و نه میلی‌مولار تفاوت آماری معنی‌دار با هم نداشتند. با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم اوره، غلظت نه میلی‌مولار سیلیکون، بالاترین وزن هزار دانه (۱/۸۳ گرم) را تولید نمود (شکل ۷B). تنش خشکی با سرعت بخشیدن به پیری برگ،



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن از نظر وزن هزار دانه سیاه‌دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون از نظر وزن هزار دانه سیاه‌دانه در شرایط تنش خشکی (B)

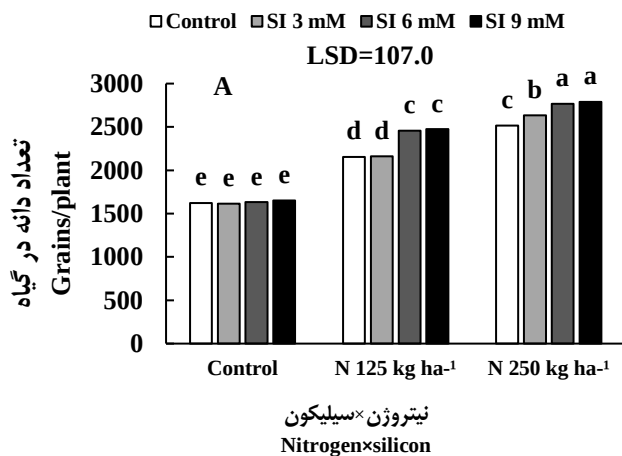
Figure 7- Means comparison of nitrogen $\times$ silicon interaction in nigella in terms of the 1000-grain weight under drought stress (B) and Means comparison of simple effect of nitrogen in terms of the 1000-grain weight in nigella under normal moisture (A), (LSD 0.05)

شرایط نرمال رطوبتی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون نشان داد هنگامی که از سیلیکون استفاده نشد، افزودن کود نیتروژن سبب افزایش معنی‌دار تعداد دانه در گیاه شد. در نبود نیتروژن، بین غلظت‌های سیلیکون و شاهد تفاوت آماری معنی‌دار مشاهده نگردید.

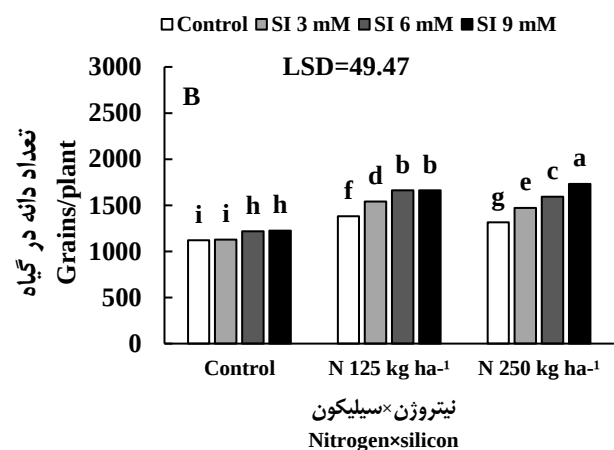
تعداد دانه در گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تعداد دانه در گیاه در شرایط تنش و عدم تنش خشکی، تحت تأثیر اثرات ساده سال، سیلیکون و نیتروژن و اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون معنی‌دار شد (جدول ۴). در

سیلیکون تفاوت معنی‌دار وجود داشت و بیشترین تعداد دانه در گیاه با محلول پاشی سیلیکون نه میلی‌مولار (به تعداد ۱۷۳۱ دانه) به دست آمد که نسبت به شاهد مربوطه (۲۵۰ کیلوگرم اوره × بدون مصرف سیلیکون) ۳۱/۶ درصد افزایش یافت (شکل ۸B). اثرات ناشی از تنش خشکی در مرحله گل‌دهی، گرده‌افشانی و پر شدن دانه سبب کاهش تعداد دانه در کپسول و تعداد دانه در گیاه می‌گردد و این روند کاهش مداوم در تعداد دانه در گیاه، با افزایش شدت تنش خشکی سبب کاهش بیشتر تعداد دانه در کپسول می‌شود (Ozer et al., 2020).



بیشترین تعداد دانه در گیاه از تیمار اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره × سیلیکون شش میلی‌مولار و همچنین اثر متقابل ۲۵۰ کیلوگرم اوره × سیلیکون نه میلی‌مولار (به ترتیب به تعداد ۲۷۶۷ و ۲۷۸۹ دانه) به دست آمد (شکل ۸A). در شرایط تنش خشکی، سیلیکون سبب افزایش تعداد دانه در گیاه شد. به هنگام عدم کاربرد نیتروژن و همچنین ۱۲۵ کیلوگرم اوره، غلظت‌های شش و نه میلی‌مولار از تعداد دانه در بوته بیشتری برخوردار بودند، هر چند نسبت به هم تفاوت آماری معنی‌دار نداشتند. با کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم اوره، بین غلظت‌های



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد دانه در گیاه سیاه‌دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 8- Means comparison of nitrogen×silicon interaction in terms of the number of grains per capsule in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05).

تحقیق حاضر مطابقت داشت. در گیاه نرگس (*Narsicuss tazetta*) (L)، با افزایش شدت تنش خشکی، فاصله زمانی بین کاشت تا گل‌دهی افزایش یافت و بیشترین تعداد روز تا گل‌دهی در تنش خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد (Naseri, Moghadam, Bayat, Aminifard, & Moradinezhad, 2019).

روز تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه

در تجزیه مرکب داده‌های مربوط به صفت روز تا رسیدگی فیزیولوژیک مشخص شد که در شرایط نرمال رطوبتی، اثرهای ساده نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون معنی‌دار شد. در شرایط تنش خشکی، علاوه بر اثرات ذکر شده، اثر سال نیز معنی‌دار شد (جدول ۵). در شرایط مطلوب رطوبتی و تنش خشکی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون نشان داد که بدون مصرف سیلیکون، بیشترین تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (به ترتیب معادل ۱۰۶/۶ و ۹۴/۱۶ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به دست آمد (شکل ۱۰، A و B).

روز تا گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر نیتروژن روی صفت روز تا گل‌دهی در هر دو شرایط تنش و عدم تنش رطوبتی معنی‌دار (۰/۰۵ < p) شد، اما اثر سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون معنی‌دار نبود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن در شرایط نرمال رطوبتی نشان داد که کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن سبب افزایش تعداد روز تا گل‌دهی (۶۸ روز) شد که با شاهد (عدم مصرف نیتروژن) تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۹A). در شرایط تنش خشکی، بین تیمارهای ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (۶۲/۰۴ روز تا گل‌دهی) با شاهد تفاوت معنی‌دار وجود داشت (شکل ۹B). با افزایش مصرف کود نیتروژن در مرحله گل‌دهی، سرعت پیری برگ کاهش پیدا می‌کند و باعث افزایش انتقال مجدد مواد فتوسنتزی، افزایش سرعت پر شدن دانه و در نهایت عملکرد دانه می‌گردد (Luo, Li, Mo, & Liao, 2021). براساس تحقیقی که توسط سرداری و همکاران (Sardari, Asghari Zakaria, Zare, Ghafarzadeh, Namazi, & Moghaddasadeh, 2020) صورت گرفت، تعداد روز تا گل‌دهی در سیاه‌دانه تحت تنش خشکی کاهش یافت که با نتایج

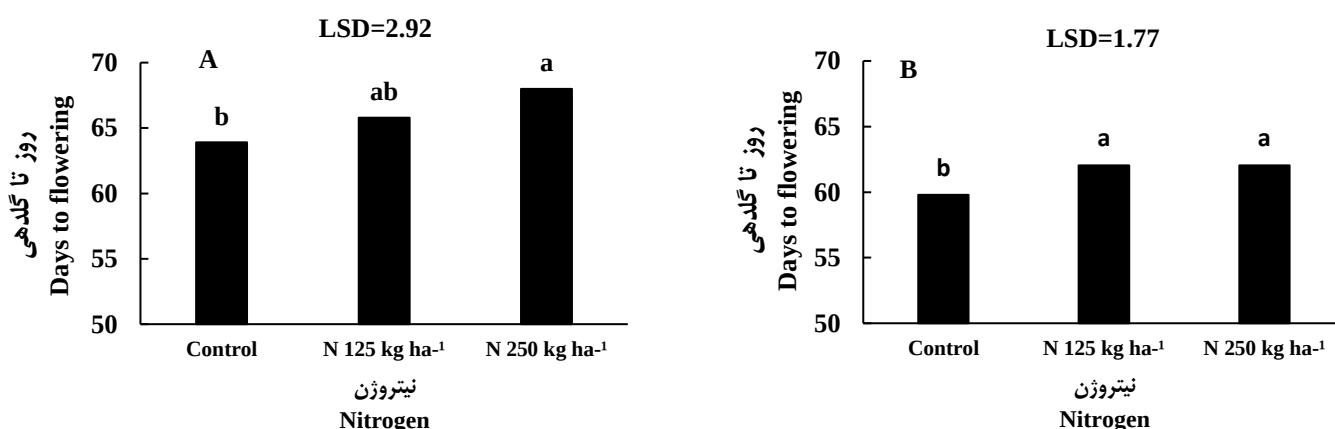
جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب اثرات سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل آن‌ها از نظر روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، طول دوره پر شدن دانه و سرعت پر شدن دانه در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی

Table 5- Combined analysis of variance for the effects of year, nitrogen, silicon and their interactions in terms of days to flowering, days to physiological ripening, grain filling period and grain filling rate under normal moisture and drought stress

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares							
		تنش خشکی Drought stress				عدم تنش خشکی No drought stress			
		روز تا گل‌دهی Days to flowering	روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological ripening	طول دوره پر شدن دانه Grain filling period	سرعت پر شدن دانه Grain filling rate	روز تا گل‌دهی Days to flowering	روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to physiological ripening	طول دوره پر شدن دانه Grain filling period	سرعت پر شدن دانه Grain filling rate
سال (Y) Year	1	11.68**	80.22 ^{ns}	30.68**	8982.20**	91.12**	122.72**	6.12 ^{ns}	62502.9**
بلوک (سال) Block (Y)	4	23.81	29.88	1.18	98.45	2.33	0.61	1.40	183.5
نیتروژن Nitrogen (N)	2	40.50*	218.38*	77.38*	2666.86**	104.29*	753.87**	302.59*	12815.7*
Y×N	2	2.05 ^{ns}	7.72 ^{ns}	2.38*	22.32 ^{ns}	5.54 ^{ns}	7.76 ^{ns}	18.04*	449.8 ^{ns}
خطا ۱ Error 1	8	3.38	5.97	0.51	79.44	2.12	8.13	3.59	159.5
سیلیکون Silicon (S)	3	1.34 ^{ns}	26.22**	16.60*		3.01 ^{ns}	21.37*	10.49 ^{ns}	262.5**
Y×S	3	0.45 ^{ns}	0.66 ^{ns}	0.79 ^{ns}	18.60 ^{ns}	0.60 ^{ns}	0.98 ^{ns}	1.68 ^{ns}	6.7 ^{ns}
N×S	6	1.61 ^{ns}	7.22*	2.75	63.88**	1.29 ^{ns}	8.02*	3.80**	90.6*
N×S×Y	6	0.61 ^{ns}	1.11 ^{ns}	0.54 ^{ns}	2.62 ^{ns}	1.46 ^{ns}	2.46 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.31 ^{ns}
خطا ۲ Error 2	36	1.41	4.64	0.38	64.88	1.84	5.95	1.63	96.4
ضریب تغییرات CV (%)		1.9	2.3	1.9	10.9	2.1	2.3	3.3	9.0

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

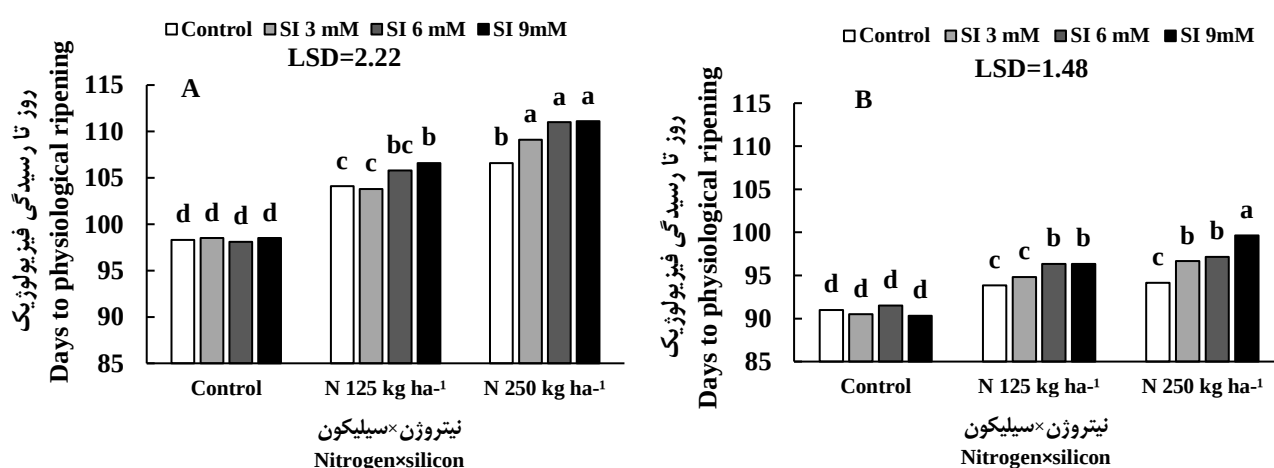
ns: no significant; **, *: Significant at 1 and 5% probability levels, respectively.



شکل ۹- مقایسه میانگین اثر ساده نیتروژن از نظر تعداد روز از سبز شدن گیاهچه تا گل‌دهی سیاهدانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 9- Means comparison of simple effect of nitrogen in terms of days to flowering under normal moisture (A) and drought stress (B) in nigella, (LSD 0.05)

شرایط تنش خشکی و مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک نسبت به شاهد سیلیکون ۵/۸ درصد افزایش یافت. در مراحل پایانی رشد، گیاه با کمبود آب مواجه می شود، بنابراین مصرف سیلیکون با تعدیل شرایط ناشی از تنش تا حدی از فرآیند اجتناب (فرار) گیاه جلوگیری کرد و مانع از کاهش طول دوره رسیدگی دانه شد. در پژوهش انجام شده روی لاین های امیدبخش جو (*Hordeum vulgare* L.) در شرایط تنش آخر فصل مشخص شد که تنش خشکی منجر به کاهش تعداد روز تا رسیدگی دانه گردید (Qhavidel et al., 2023). تنش خشکی آخر فصل، صفت تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک را در کلزای زمستانه (*Brassica napus* L.) نیز کاهش داد (Shadan, Najafi Zarini, Alizadeh, Kiani, & Ranjbar, 2023).

در شرایط عدم مصرف نیتروژن در هر دو شرایط مطلوب رطوبتی و تنش خشکی، بین تیمارهای سیلیکون تفاوت معنی داری مشاهده نشد. این در حالی است که در شرایط مطلوب رطوبتی و با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، بیشترین تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک از محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون (۱۱۱/۱ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) حاصل شد که با تمامی تیمارها به جز تیمارهای مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و سه و شش میلی مولار سیلیکون از نظر آماری تفاوت معنی دار داشت (شکل A ۱۰). در شرایط تنش خشکی، مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون (۹۹/۶۶ روز تا رسیدگی فیزیولوژیک) تفاوت معنی داری با سایر تیمارها ایجاد کرد (شکل B ۱۰). در شرایط تنش خشکی، گیاهان به منظور فرار از شرایط تنش، سیکل زندگی خود را سریع تر تکمیل می کنند و همین امر سبب کاهش عملکرد دانه می شود. نتایج این پژوهش نشان می دهد که در



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر تعداد روز از سبز شدن گیاهچه تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)

Figure 10- Means comparison of nitrogen x silicon interaction in terms of days to physiological ripening under normal moisture (A) and drought stress (B) in nigella, (LSD 0.05)

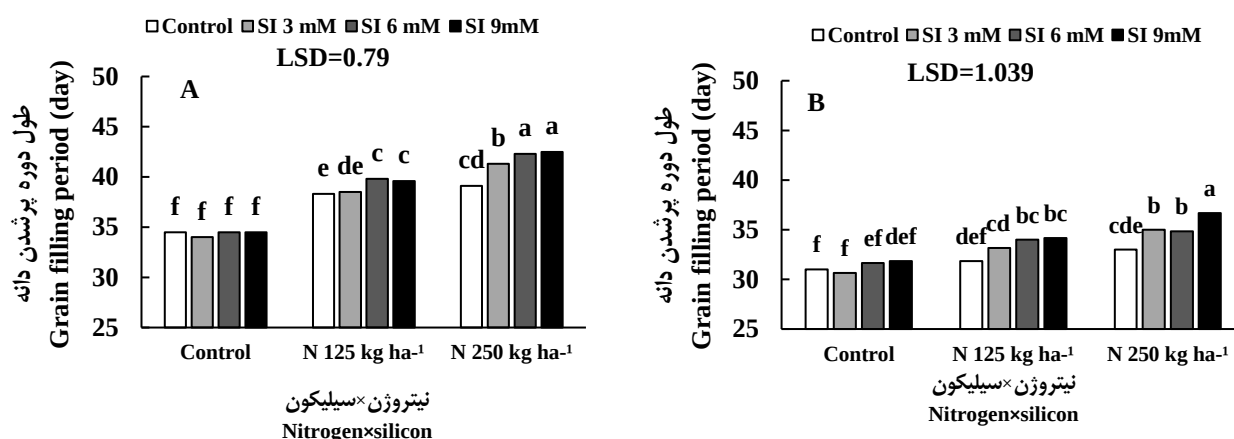
شدن دانه شد. بیشترین طول دوره پر شدن دانه در هر دو شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی، از مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار دوره (به ترتیب معادل ۴۲/۵ و ۳۶/۶۶ روز) به دست آمد (شکل A ۱۱ و B). همچنین به هنگام عدم مصرف نیتروژن، بین هیچ یک از تیمارهای سیلیکون در هردو شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی تفاوتی از نظر آماری وجود نداشت. با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در شرایط مطلوب رطوبتی، محلول پاشی نه میلی مولار سیلیکون (۴۲/۵ روز) بیشترین طول دوره پر شدن دانه را به خود اختصاص داد که با محلول پاشی شش میلی مولار سیلیکون تفاوت

طول دوره پر شدن دانه

براساس نتایج تجزیه واریانس، در شرایط تنش رطوبتی، اثرات سال، نیتروژن، سیلیکون و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر طول دوره پر شدن دانه معنی دار شدند. در شرایط عدم تنش خشکی، اثر نیتروژن و اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون بر این صفت معنی دار شد (جدول ۵). در شرایط نرمال رطوبتی و تنش خشکی، مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون نشان داد هنگامی که از سیلیکون استفاده نشد، افزایش نیتروژن سبب افزایش معنی دار طول دوره پر

این در شرایطی است که با افزایش مصرف نیتروژن (کاربرد ۱۴۰ درصد نیاز نیتروژن) رسیدگی فیزیولوژیک دیرتر حادث شد (Ghobadi, Ghobadi, Mondani, Jalali Honarmand & Farhadi Bansooleh, 2017). محدودیت آبی سبب کوتاه شدن طول دوره پر شدن دانه می شود و به طور معنی داری وزن دانه و مؤلفه های پر شدن دانه را کاهش می دهد (Nouraldin & Sharifi, Siadat, & Khalilzadeh, 2021). به نظر می رسد که محدودیت آبی تعادل تغذیه ای در گیاه را به هم می ریزد، بنابراین محلول پاشی عناصر ریزمغذی می تواند به سهولت این کمبود را جبران کند و با بهبود فتوسنتز و کارایی آن به واسطه افزایش طول دوره پر شدن دانه، میزان انتقال مواد به سمت دانه را بهبود بخشد (Babaei, Seyedsharifi, & Pirzad, 2018). محلول پاشی سیلیکون با افزایش شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و هدایت روزنه ای سبب بهبود در طول دوره پر شدن دانه می گردد (Seyed Sharifi, Seifamiri, & Narimani, 2023). در بررسی انجام شده روی آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) مشخص شد که مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن از طریق افزایش طول دوره رشد و دوره مؤثر پر شدن دانه منجر به افزایش عملکرد دانه شده است (Sharifi & Abassi, 2014).

معنی دار نداشت (شکل ۱۱A). در شرایط تنش خشکی، با مصرف ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن روند افزایشی با مصرف سیلیکون مشاهده شد، با این حال بیشترین طول دوره پر شدن دانه با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن $\times$ محلول پاشی ۱ میلی مولار سیلیکون (۳۶/۶۶ روز) به دست آمد که با سایر تیمارها از نظر آماری تفاوت معنی دار نداشت (شکل ۱۱B). طول دوره پر شدن دانه، فاصله بین شروع گل دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه است که می تواند تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله تنش خشکی تغییر کند. از بین صفات فنولوژیکی، طول دوره پر شدن دانه نقش مهمی در حفظ وزن دانه دارد (Qhavidel et al., 2023). طبق نتایج طباطبایی و همکاران (Tabatabaei, Shakeri, & Shahedi, 2013)، تنش خشکی منجر به تسریع در رسیدگی دانه می گردد، زیرا گیاه برای تکمیل سیکل رسیدگی خود از سازوکار فرار استفاده می کند که در نهایت کاهش عملکرد دانه را به دنبال دارد. کاهش زمان تا رسیدگی فیزیولوژیک بر طول دوره پر شدن دانه تأثیر داشته و منجر به کوتاهی این دوره می گردد که با نتایج جباری و همکاران (Jabari, Daneshian, & Aliabadi Farahani, 2011) مطابقت دارد. در ذرت (*Zea mays* L.) نتایج مشابهی به دست آمده است که نشان می دهد در شرایط کم آبی، رسیدگی فیزیولوژیک زودتر اتفاق می افتد و طول پر شدن دانه (فاصله گرده افشانی تا رسیدگی فیزیولوژیک دانه) کوتاه شده است.



شکل ۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون از نظر طول دوره پر شدن دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 11- Means comparison of nitrogen $\times$ silicon interaction in terms grain filling period in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

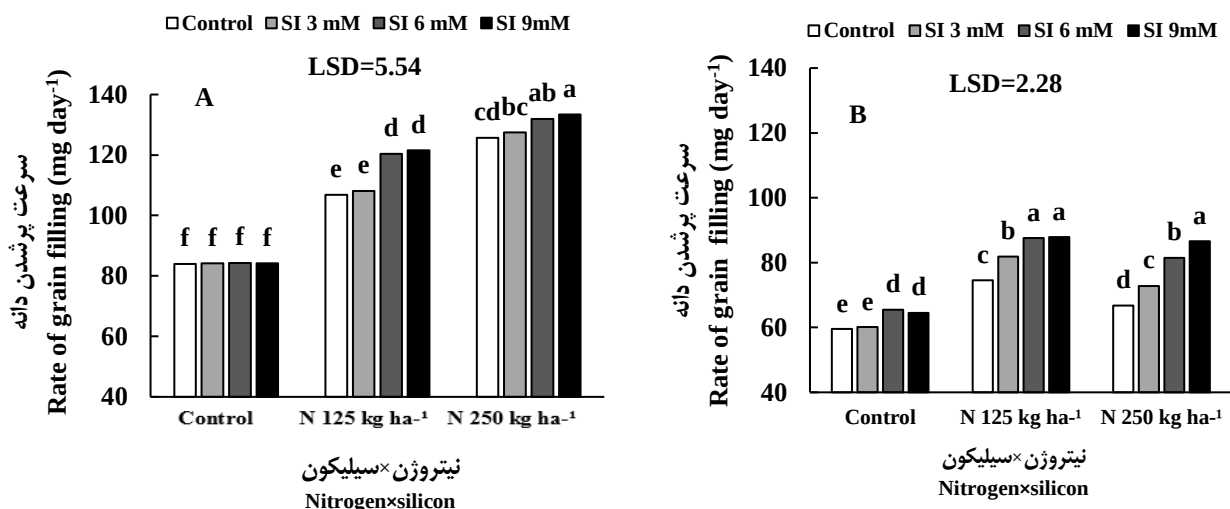
سیلیکون نشان داد که با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بالاترین سرعت پر شدن دانه (۱۲۵/۷ میلی گرم در روز) حاصل شد (شکل ۱۲A). این در حالی است که در شرایط تنش خشکی و عدم مصرف سیلیکون، با مصرف ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بیشترین سرعت پر شدن دانه (۷۴/۵۱ میلی گرم در روز) به دست آمد (شکل ۱۲B). در شرایط مطلوب و عدم استفاده از نیتروژن، تفاوت معنی داری

سرعت پر شدن دانه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده ها در شرایط مطلوب رطوبتی و تنش خشکی، نشان دهنده اثر معنی دار سال، نیتروژن، سیلیکون و همچنین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون بر سرعت پر شدن دانه بود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن $\times$ سیلیکون بر سرعت پر شدن دانه در شرایط مطلوب و عدم مصرف

همکاران (Forooghi, Biyabani, Rahemi Karizaki, & Rassam, 2017) در تحقیقی گزارش کردند که در تعیین وزن دانه، سرعت پر شدن دانه از طول دوره پر شدن دانه مهم‌تر است و با کاهش طول دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه افزایش می‌یابد. بررسی اثر برهم‌کنش آبیاری و سطوح مختلف نیتروژن بر روی آفتابگردان نشان داد که افزایش شدت تنش خشکی، سرعت پر شدن دانه را بیشتر کرده است. این در حالی است که با افزایش مصرف نیتروژن، سرعت پر شدن دانه کاهش پیدا کرد و مصرف ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص در مقایسه با مصرف ۱۶۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، سرعت پر شدن دانه را به ترتیب هشت و پنج درصد کاهش داد. بنابراین نیتروژن با افزایش ساخت پروتئین، افزایش تجمع نیتروژن در دانه و افزایش طول دوره پر شدن دانه سبب کاهش سرعت پر شدن دانه گردید (Gholinezhad et al., 2012). در پژوهش انجام شده توسط دستور و همکاران (Dastoor & Asghari-Zakaria, 2014) روی گندم مشخص شد که سرعت پر شدن دانه تحت شرایط خشکی کاهش یافت، به‌طوری‌که در شرایط تنش خشکی با ۹۱/۰ میلی‌گرم در روز کمترین و در شرایط عدم تنش (۱/۳۳ میلی‌گرم در روز) بیشترین سرعت پر شدن دانه حاصل شد.

بین سطوح مختلف سیلیکون از نظر سرعت پر شدن دانه وجود نداشت، اما در شرایط تنش خشکی در عدم حضور نیتروژن، محلول‌پاشی شش و نه میلی‌مولار سیلیکون سبب افزایش سرعت پر شدن دانه شدند که با شاهد (عدم مصرف سیلیکون) و سه میلی‌مولار سیلیکون تفاوت معنی‌دار داشتند. همچنین مقایسه میانگین‌ها در شرایط مطلوب رطوبتی با مصرف نیتروژن نشان داد که مصرف ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن روند افزایشی در سرعت پر شدن دانه داشت، به‌طوری‌که بیشترین سرعت پر شدن دانه به هنگام مصرف ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن × محلول‌پاشی نه میلی‌مولار سیلیکون (۱۲۳/۴ میلی‌گرم در روز) به دست آمد. در شرایط تنش خشکی و مصرف نیتروژن، افزایش غلظت سیلیکون تا شش میلی‌مولار برای ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن و تا نه میلی‌مولار برای ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن سبب افزایش سرعت پر شدن دانه شد. پر شدن دانه تحت تأثیر دو عامل سرعت و طول دوره پر شدن قرار دارد (Brdar, Kraljevic, Balalic, & Kobiljski, 2008). عوامل محیطی از جمله دما، آب و نیتروژن و همچنین عوامل گیاهی (رابطه بین منبع و مخزن) بر سرعت پر شدن دانه مؤثر هستند (Samarzadeh Vazhdehfar, Paknejad, Shirani Rad, & Ebrahimi, 2022) و



شکل ۱۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن × سیلیکون از نظر سرعت پر شدن دانه در شرایط نرمال رطوبتی (A) و تنش خشکی (B)
Figure 12- Means comparison of nitrogen×silicon interaction in terms days to grain filling rate in nigella under normal moisture (A) and drought stress (B), (LSD 0.05)

کپسول)، تعداد دانه در کپسول (۷۳/۸ دانه)، تعداد دانه در گیاه (۲۵۱۴ دانه)، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (۱۰۶/۶ روز) و سرعت پر شدن دانه (۱۲۵/۷ میلی‌گرم در روز) در این سطح از نیتروژن به دست آمد. در صورت عدم مصرف نیتروژن، سیلیکون مؤثر نبود، اما با مصرف نیتروژن، محلول‌پاشی سیلیکون شش و نه میلی‌مولار، به‌طور مشابهی مؤثر واقع شدند. به‌طور کلی، در شرایط بدون تنش خشکی، اثر متقابل

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در شرایط نرمال رطوبتی و بدون مصرف سیلیکون، کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بر صفات مورد بررسی مناسب‌تر بود، به‌طوری‌که بیشترین مقادیر عملکرد دانه (۱۴۵۳ کیلوگرم در هکتار)، تعداد کپسول در بوته (۳۳/۶)

۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن × محلول پاشی ۱۰ میلی مولار سیلیکون به عنوان بهترین تیمار تعیین شد. به طور کلی، نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که محلول پاشی سیلیکون قادر بود که آثار منفی ناشی از کمبود آب در گیاه سیاه دانه را تا حد قابل توجهی کاهش دهد. لذا در زراعت سیاه دانه به همراه مصرف کود نیتروژن به مقدار توصیه شده، محلول پاشی سیلیکون شش میلی مولار برای شرایط بدون تنش خشکی، و محلول پاشی سیلیکون ۱۰ میلی مولار برای شرایط تنش خشکی پیشنهاد می گردد.

۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن × سیلیکون شش میلی مولار تیمار برتر مشخص شد. در شرایط تنش خشکی و بدون مصرف سیلیکون، مصرف ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن مناسب تر از ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و همچنین عدم مصرف نیتروژن بود، اما با مصرف سیلیکون، مصرف ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن نتایج بهتری را حاصل نمود. در شرایط مصرف ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن، محلول پاشی سیلیکون شش و ۱۰ میلی مولار به طور مشابهی مناسب تر بودند، اما در شرایط مصرف ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن، محلول پاشی سیلیکون ۱۰ میلی مولار بهتر عمل نمود. با توجه به نتایج به دست آمده، در شرایط تنش خشکی، مصرف

References

- Abdul-Zadeh, A., Vali-Pour Chahardahcheriki, Y., & Ghadrifar, F. (2017). The effects of nitrogen source and amount on growth, chlorophyll, oil, and essence contents of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Plant Environmental Physiology*, 12(45), 68-80. (In Persian)
- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-Ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., & Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>
- Agarie, S., Uchida, H., Agata, W., Kubota, F., & Kaufman, P. B. (1998). Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 1(2), 89-95. <https://doi.org/10.1626/pp.1.89>
- Akhondian, J., Parsa, A., & Rakhshandeh, H. (2007). The effect of *Nigella sativa* (black cumin seed) on intractable pediatric seizures. *Medical of Science Monit*, 13, 555-559.
- Al-aghaby, K., Zhu, Z. J., Shi, Q. H. (2005). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 27, 2101-2115. <https://doi.org/10.1081/PLN-200034641>
- Ali, M. M. K., Hasan, M. A., & Islam, M. R. (2015). Influence of fertilizer levels on the growth and yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). *The Agriculturists*, 13(2), 97-104.
- Amiri, A., Bagheri, A. A., Khajeh, M., Najafabadipour, F., & Yadollahi, P. (2013). Effect of silicon foliar application on yield and antioxidant enzymes activity of safflower under deficit irrigation conditions. *Journal of Crop Production Research*, 5(4), 361-372.
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., & Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838-1846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.021>
- Babaei, Kh., Seyedsharifi, R., & Pirzad, A. R. (2018). Effect of bio fertilizers and foliar application of nano zinc oxide on chlorophyll content, grain filling period and grain yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water limitation. *Journal of Plant Ecophysiology*, 9(31), 68-75.
- Barati, V., & Bijanzadeh, E. (2020). Grain yield and its components of triticale as affected by silicon foliar application, nitrogen fertilizer and water stress in reproductive phase. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(4), 435-449. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2020.88386>
- Bassim Atta, A. (2003). Some characteristics of nigella *Withania somnifera*. *Plant Omics Journal*, 2(2), 85-90.
- Bista, D. R., Heckathorn, S. A., Jayawardena, D. M., Mishra, S., & Boldt, J. K. (2018). Effects of drought on nutrient uptake and the levels of nutrient-uptake proteins in roots of drought-sensitive and-tolerant grasses. *Plants*, 7(2), 28. <https://doi.org/10.3390/plants7020028>
- Brdar, M. D., Kraljevic-Balalic, M. M., & Kobiljski, B. (2008). The parameters of grain filling and yield components in common wheat (*Triticum aestivum* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum* L. Var. Durum.). *Central European Journal of Biology*, 3(1), 75-82. <https://doi.org/10.2478/s11535-007-0050-x>
- Dastoor, A., & Asghari-Zakaria, R. (2014). Evaluation of wheat genotypes for yield and grain-filling rate of wheat genotypes under non stress and post anthesis drought stress conditions. *Journal of Agroecology*, 6(3), 561-570. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAG.V6I3.23874>
- Datta, S., Rai, U., & Ashutosh, S. (2022). Effect of nitrogen and phosphorus on growth and yield of cumin black (*Nigella sativa* L.) under Terai zone of West Bengal. *Journal of Environment and Ecology*, 40(3D), 1811-1816.
- Deren, C. W. (1997). Changes in nitrogen and phosphorus concentrations of silicon-fertilized rice grown on organic soil. *Journal of Plant Nutrition*, 20(6), 765-771. <https://doi.org/10.1080/01904169709365292>
- El-Leithy, A. S., Abdallah, S. A., & Ali, M. A. (2019). Effect of soil application with nitrogen levels and

- potassium silicate foliar spray on growth and yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Sinai Journal of Applied Sciences*, 8(2), 185-198. <https://doi.org/10.21608/sinjas.2019.79096>
18. Emam, Y., Ranjbar, A. M., & Bahrani, M. J. (2007). Evaluation of yield and yield components in wheat genotypes under post-anthesis drought stress. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 11(1), 317-328.
 19. Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Science*, 91, 11-17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
 20. Forooghi, A., Biyabani, A., Rahemi Karizaki, A., & Rassam, G. (2017). Relationships of phenology and physiological traits with the yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) in northern Khorasan. *Journal of Crop Ecophysiology*, 10(4), 1007-1024. (In Persian with English abstract).
 21. Ghamarnia, H., Khosravy, H., & Sepehri, S. (2010). Yield and water use efficiency of (*Nigella sativa* L.) under different irrigation treatments in a semi-arid region in the West of Iran. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4(16), 1612-1616.
 22. Ghamarnia, H., Miri, E., Jafarizadeh, M., & Ghobadi, M. (2013). Determination of *Nigella sativa* L. water requirement by lysimetric method in an arid and semi-arid climate. *Scientific Journal of Agriculture*, 35(4), 75-82. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25885952.1391.35.4.8.8>
 23. Ghobadi, R., Ghobadi, M., Mondani, F., Jalali Honarmand, S., & Farhadi Bansooleh, B. (2017). Effect of irrigation and nitrogen interactions on phenologic characteristics and growth indices of seed corn. *Journal of Plant Process and Function*, 6(21), 349-368. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222727.1396.6.21.13.5>
 24. Gholinezhad, E., Aynaband, A., Hassanzade Ghorthapeh, A., Noormohamadi, G., & Bernousi, I. (2012). Effects of drought stress, nitrogen amounts and plant densities on grain yield, rapidity and period of grain filing in sunflower. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 22(2), 129-143.
 25. Göksoy, A. T., Demir, A. O., Turan, Z. M., & Dağüstü, N. (2004). Responses of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to full and limited irrigation at different growth stages. *Field Crops Research*, 87(2-3), 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.11.004>
 26. Gong, H. J., & Chen, K. M. (2012). The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 1589-1594.
 27. Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., & Zhang, C. (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 169(2), 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023>
 28. Gunes, A., Pilbeam, D. J., Inal, A., & Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(13-14), 1885-1903. <https://doi.org/10.1080/00103620802134651>
 29. Haj Seyed Hadi, M. R., Darzi, M. T., & Riazi, G. (2016). Black cumin yield affected by irrigation and plant growth promoting bacteria. *Journal of Medicinal Plants and By-product*, 5(2), 125-133. <https://doi.org/10.22092/jmpb.2016.109388>
 30. Hassegawa, R. H., Fonseca, H., Fancelli, A. L., da Silva, V. N., Schammass, E. A., Reis, T. A., & Corrêa, B. (2008). Influence of macro-and micronutrient fertilization on fungal contamination and fumonisin production in corn grains. *Food Control*, 19(1), 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2007.01.006>
 31. Hayati, A., Rahimi, M. M., Kelidari, A., & Hosseini, S. M. (2021). Effects of humic acid and iron nanochelate on osmolytes content of black cumin (*Nigella sativa* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 37(5), 809-821. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.354715.2995>
 32. Heidari, M., & Jahantighi, H. (2014). Evaluate effect of water stress and different amounts of nitrogen fertilizer on seed quality of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Field Crops Research*, 11(4), 640-647. <https://doi.org/10.22067/gsc.v11i4.32892>
 33. İzgi, M. N. (2020). Effects of different nitrogen dose applications on black cumin (*Nigella sativa* L.): Some vegetative parameters and oil ratio. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, 37(1), 38-43.
 34. Jabari, H., Daneshian, J., & Aliabadi Farahani, H. (2011). The use of productivity effort, quantity and quality features for recognizing of drought tolerance in sunflower hybrids. *Journal of Crop Ecophysiology*, 3(1), 9-23. (In Persian)
 35. Jamshidi, E., Ghalavand, A., Sefidkon, F., & Goltaph, E. (2013). Effects of different nutrition systems on quantity characteristics of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill) under different irrigation regimes. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 97, 47-54. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2012.3048>
 36. Kamenidou, S., Cavins, T. J., & Marek, S. (2008). Silicon supplements affect horticultural traits of greenhouse-produced ornamental sunflowers. *HortScience*, 43(1), 236-239. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.1.236>
 37. Kaya, C., Tuna, L., & Higgs, D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29(8), 1469-1480. <https://doi.org/10.1080/01904160600837238>
 38. Khodabandehloo, S., Sepehri, A., Ahmadvand, G., & Keshtkar, A. H. (2014). The effect of silicon application on

- grain yield of millet and water use efficiency under drought stress. *Journal of Crops Improvement*, 16(2), 399-416. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2014.53051>
39. Kiami, H., Khalesro, S., Sharifi, Z., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2024). Morphological and physiological responses of black cumin to biochar and different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 17(1), 73-86. <https://doi.org/10.22077/escs.2023.5430.2148>
40. Kleiber, T., Calomme, M., & Borowiak, K. (2015). The effect of choline-stabilized orthosilicic acid on microelements and silicon concentration, photosynthesis activity and yield of tomato grown under Mn stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.033>
41. Lin, S., Sattelmacher, B., Kutzmutz, E., Mühling, K. H., & Dittert, K. (2004). Influence of nitrogen nutrition on tuber quality of potato with special reference to the pathway of nitrate transport into tubers. *Journal of Plant Nutrition*, 27(2), 341-350. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027658>
42. Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., & Zhang, S. (2014). Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4747-4756. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru220>
43. Loggini, B., Scartazza, A., Brugnoli, E., & Navari-Izzo, F. (1999). Antioxidative defense system, pigment composition, and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought. *Plant Physiology*, 119(3), 1091-1100. <https://doi.org/10.1104/pp.119.3.1091>
44. Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier Science. 275 pp.
45. Mahdavi, F., Esmaeili, M. A., Falah, E. Y., & Pirdashti, H. A. (2006). Study of morphological characteristics, physiological indices, grain yield and its components in rice (*Oryza sativa* L.) landraces and improved cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 7(4), 280-297. (In Persian with English abstract).
46. Majnoon Hosseini, N., & Davazdeh Imami, S. (2013). Cultivation and Production of some Medicinal and Spice Crops. Tehran University Press, Tehran, Iran. 310 pp.
47. Ming, D. F., Pei, Z. F., Naeem, M. S., Gong, H. J., & Zhou, W. J. (2012). Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(1), 14-26. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x>
48. Misra, A., & Srivastava, N.K. (2000). Influence of water stress on Japanese mint. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 7(1), 51-58. https://doi.org/10.1300/J044v07n01_07
49. Mohammadi, P., Sepehri, A., Abutalebian, M., & Hamzai, C. (2011). *Effect of silicon on wheat yield under drought stress conditions*. The 6th National Conference on New Ideas in Agriculture, 11th and 12th March 2011, Islamic Azad University, Khorasgan Branch. 1, 17-119. (In Persian)
50. Moradzadeh, S., Siavash Moghaddam, S., Rahimi, A., Pourakbar, L., El Enshasy, H. A., & Sayyed, R. Z. (2021). Bio-chemical fertilizer improves the oil yield, fatty acid compositions, and macro-nutrient contents in *Nigella sativa* L. *Horticulturae*, 7(10), 345. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100345>
51. Mozaffari, F. S., Ghorbanli, M., Babai, A., & Sepehr, M. F. (2000). The effect of water stress on the seed oil of *Nigella sativa* L. *Journal of Essential Oil Research*, 12(1), 36-38. <https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9712036>
52. Naseri Moghadam, A., Bayat, H., Aminifard, M. H., & Moradinezhad, F. (2019). Effect of drought and salinity stress on growth, flowering and biochemical characteristics of *Narsicuss tazetta* L. *Journal of Horticultural Science*, 33(3), 451-466. (in Persian with Engilsh abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.76772>
53. Nouraldinvand, F. A., Sharifi, R. S., Siadat, S. A., & Khalilzadeh, R. (2021). Effects of nano silicon concentrations and bio-fertilizer on yield and grain filling components of wheat in different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(1), 91-105. <https://doi.org/10.22067/jcsc.2021.67258.0>
54. Ozer, H., Coban, F., Sahin, U., & Ors, S. (2020). Response of black cumin (*Nigella sativa* L.) to deficit irrigation in a semi-arid region: Growth, yield, quality, and water productivity. *Industrial Crops and Products*, 144, 112048. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112048>
55. Paknejad, F., Mjid, E., Nourmohamadi, G., & Vazan, S. (2007). Evaluation of drought Stress on effective traits ataccumulative assimilate of grain in different cultivars of wheat. *Journal of Agricultural Science, Islamic Azad University*, 13(1), 1-12. (In Persian with English Summary)
56. Qhavidel, S., Mostafavi, K., & Pour-Aboughadareh, A. (2023). Investigation of terminal season drought stress effects on grain yield and some agronomic and physiological traits in promising barley (*Hordeum Vulgare* L.) genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 15(46), 93-103. <http://doi.org/10.61186/jcb.15.46.93>
57. Rana, S., Singh, P. P., Naruka, I. S., & Rathore, S. S. (2012). Effect of nitrogen and phosphorus on growth, yield and quality of black cumin (*Nigella sativa* L.). *International Journal of Seed Spices*, 2(2), 5-8.
58. Rezabeigi, S., Bijanzadeh, E., Behpouri, A., & Barati, V. (2020). Effect of foliar application of silicone on biochemical traits and yield of two wheat cultivars under late season drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(3), 829-843. (in Persian with Engilsh abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2251.1572>
59. Rezaei-Chiyaneh, E., Seyyedi, S. M., Ebrahimian, E., Moghaddam, S. S., & Damalas, C. A. (2018). Exogenous application of gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates the effect of water deficit stress in black cumin

- (*Nigella sativa* L.). *Industrial Crops and Products*, 112, 741-748. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.067>
60. Rezavani-Bidokhti, Sh., Dashtiyani, A., Snjani, S., & Anvrkhvav, S. (2010). Influence of low irrigation and plant density on yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa*) as a medicinal plant in Damghan conditions. Proceeding of the First National Conference of Environmental Stress in Agricultural Sciences, 28-29 June 2010. The University of Birjand, Birjand, Iran.
 61. Sabzevari, Y., Nasrollahi, A., Sharifipour, M., & Shahinejad, B. (2022). Application of multivariate regression and gene expression programming in modeling reference evapotranspiration (case study: Khorramabad station). *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(1), 35-48. <https://doi.org/10.22055/jise.2020.31583.1890>
 62. Salas, M. L., Hickman, M. V., Huber, D. M., & Schreiber, M. M. (1997). Influence of nitrate and ammonium nutrition on the growth of giant foxtail (*Setaria faberi*). *Weed Science*, 45(5), 664-669.
 63. Samarzadeh Vazhdehfar, T., Paknejad, F., Shirani Rad, A. H., & Ebrahimi, H. (2022). Relationship between duration and rate of seed filling of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes at three layers of upper, middle and bottom of plant affected by fall and winter sowing dates. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(4), 63-76. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2021.333028.654871>
 64. Sanglard, L. M., Martins, S. C., Detmann, K. C., Silva, P. E., Lavinsky, A. O., Silva, M. M., Detmann, E., Wagner, L. A., & DaMatta, F. M. (2014). Silicon nutrition alleviates the negative impacts of arsenic on the photosynthetic apparatus of rice leaves: An analysis of the key limitations of photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, 152(2), 355-366. <https://doi.org/10.1111/ppl.12178>
 65. Sardari, H., Asghari Zakaria, R., Zare, N., Ghafarzadeh Namazi, L., & Moghaddaszadeh, M. (2020). Evaluation of black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes under drought stress conditions at flowering stage. *Journal Crop Breed.* 12(34), 138-150. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jcb.12.34.138>
 66. Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K. H., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R. K., Hanumantha Rao, B., Vara Prasad, P. V & Nayyar, H. (2018). Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1705. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>
 67. Seyed Sharifi, R., Seifamiri, S., & Narimani, H. (2023). Effects of nanoparticles foliar application (iron and silicon) on yield, grain filling components and some physiological traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under rainfed and supplementary irrigation conditions. *Journal of Crop Physiology*, 14(55), 75-91.
 68. Shadan, E., Najafi Zarini, H., Alizadeh, B., Kiani, G., & Ranjbar, G. (2023). Evaluation of the effects of terminal drought stress on yield and some traits of winter oilseed rape genotypes. *Applied Field Crops Research*, 35(3), 66-46. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/aj.2023.355332.1555>
 69. Sharifi, R., & Abassi, H. (2014). Study of various levels of nitrogen fertilizer and plant density on grain yield, rate and effective grain filling period sunflower (*Helianthus annus* L.) cultivars in Ardabil region. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 27(2), 228-242. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1393.27.2.7.7>
 70. Soltanieh, M., Talei, D., & Nejatkhah, P. (2023). Evaluation of growth, yield and yield components responses of black cumin (*Nigella sativa* L.) to nitrogen and methanol under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(3), 587-601. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2023.4822.2077>
 71. Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A. E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka, K., & Inanaga, S. (2010). Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *Journal of Plant Nutrition*, 34(1), 71-82. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.531360>
 72. Tabatabaei, S. A., Shakeri, E., & Shahedi, M. (2013). Investigation of yield, yield components changes and some physiological characteristics of barley genotypes under irrigation tension conditions. *Crop Physiology Journal*, 5(18), 101-114.
 73. Tardieu, F. (2005). Plant tolerance to water deficit: Physical limits and possibilities for progress. *Comptes rendus. Géoscience*, 337(1-2), 57-67.
 74. Tariq Alislami, M., Zarghami, R., MashhadiAkbar Bojar, M., & Oveysi, M. (2012). The effect of drought stress and nitrogen fertilizer amounts on physiological parameters of grain corn. *Journal of Agriculture and Plant Breeding*, 8, 161-174. (In Persian with English Summary)
 75. Torabi, F., Majd, A., Enteshari, S., & Irian, S. (2013). Study of effect of silicon on some anatomical and physiological characteristics of borage (*Borago officinalis* L.) in hydroponic conditions. *Journal of Cell and Tissue*, 4(3), 275-285. (in Persian). <https://sid.ir/paper/189030/en>
 76. Zhu, Y., & Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 455-472. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>



The Effect of Silicon Spraying and Nitrogen Fertilizer in Reducing the Drought Stress Damage on Growth, Grain Yield and Phenologic Stages of Black Cumin (*Nigella sativa* L.)

F. Kashkooli¹, M. Ghobadi^{1*}, S. Jalali Honarmand¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding author's Email: ghobadi.m@razi.ac.ir)

Received: 22 November 2024 Revised: 09 February 2025 Accepted: 18 February 2025 Available Online: 13 April 2025	How to cite this article: Kashkooli, F., Ghobadi, M., & Jalali Honarmand, S. (2025). The Effect of Silicon Spraying and Nitrogen Fertilizer in Reducing the Drought Stress Damage on Growth, Grain Yield and Phenologic Stages of Black Cumin (<i>Nigella sativa</i> L.). <i>Iranian Journal of Field Crops Research</i> , 23(4), 375-397. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.90916.1360
--	---

Introduction

Black cumin (*Nigella sativa* L.) is a medicinal crop in the Ranunculaceae family, a dicotyledonous, herbaceous and annual plant. *Nigella sativa* is one of the eight species of this genus that can be cultivated naturally in different parts of Iran. Grains of nigella contains about 40% oil and 1.4% essential oil. The main fatty acids in nigella grain are oleic acid, linoleic acid and palmitic acid. In dry and semi-dry regions, such as west of Iran, water deficit is the most important factor that reduce the growth and production of crops. Plant's growth depends on the adequate amount of nutrients in the rhizosphere. Among nutrients, nitrogen has a particular importance. Because nitrogen plays a role in the formation of amino acids, proteins, nucleic acids and other cell compounds. Using the correct methods of mineral nutrition in plants reduces the effects of drought stress. Silicon is one of these elements. Although silicon is not an essential element for plant growth, it plays an important role in reducing the harmful effects of drought stress. The aim of this experiment was to investigate the effects of silicon foliar application and nitrogen fertilizer in modulating the negative impacts of drought stress on growth, grain yield and phenologic stages of nigella.

Materials and Methods

This experiment was carried out in the research farm of Razi University during two crop years, 2020-21 and 2021-22. The research was done in the form of two separate experiments, one under non-drought conditions and the other under drought stress conditions. Each experiment was laid out as a split plot in the form of a randomized complete blocks design (RCBD) in three replications. The main factor was the amount of nitrogen fertilizer in three levels (0, half, and equivalent to the recommended amount, respectively contain 0, 125 and 250 kg ha⁻¹ urea) and the sub-factor including silicon foliar spraying in four concentrations (0, 3, 6 and 9 mM). The measured traits were included grain yield, HI, biomass, capsules per plant, grains per capsule, 1000 grain weigh, grains per plant, days to flowering, days to physiologic ripening, grain filling period and grain filling rate. To analysis of variance of the data, the combined analysis model was used with SAS, 9.4 software. The Bartlett test was used to confirm the homogeneity of variances. In combined analysis, year was considered as a random effect and nitrogen and silicon as fixed effects. The means comparison was performed by LSD test at the probability level of 5%.



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.2025.90916.1360>



Research Article

Vol. 23, No. 4, Winter 2025, p. 399-415

Parameterization and Evaluation of the SSM-iCrop Model for Predicting Growth, Phenological Development, and Yield of Grain Maize (*Zea mays* L.) in Iran

N. Bayatian^{1*}, A. Soltani^{1*}, E. Zeinali¹

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

(*- Corresponding author's Email: afshin.soltani@gmail.com, Naeimeh.Bayatian@gmail.com)

Received: 26 November 2024
Revised: 06 May 2025
Accepted: 14 May 2025
Available Online: 14 May 2025

How to cite this article:

Bayatian, N., Soltani, A., & Zeinali, E. (2025). Parameterization and Evaluation of the SSM-iCrop Model for Predicting Growth, Phenological Development, and Yield of Grain Maize (*Zea mays* L.) in Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 399-415. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.90531.1362>

Introduction

The nation's substantial maize (*Zea mays* L.) requirements are currently met through imports. Given the scarcity of arable land and water resources, enhancing yield per unit area is the only viable solution to augment domestic production. Significant progress can be made toward this goal by optimizing production management to narrow the yield gap. Utilizing a reliable simulation model can play a pivotal role in reducing the yield gap and achieving optimal yields through evaluating various management practices. Effective management strategies are essential to optimize maize production and ensure food security. While field experiments can provide valuable insights, they can be resource-intensive, time-consuming, and even impractical due to complex interactions between environmental and management factors. Crop simulation models offer a powerful alternative, enabling the exploration of various scenarios and the identification of optimal management practices. These models simulate plant growth and development in response to climate variables, soil conditions, management inputs, and genetic traits, providing valuable information for decision-making. Accurate parameterization is crucial for reliable crop model predictions. This study aims to parameterize and evaluate the SSM-iCrop model for predicting grain maize yield and nitrogen dynamics in Iran.

Materials and Methods

Simple Simulation Models (SSM), were initially developed for soybean yield prediction in 1986. The model has since been refined to simulate various crops, including maize. SSM-iCrop simulates daily plant growth and development processes, such as phenology, leaf area development, dry matter production, yield formation, and water and nitrogen dynamics. The model has been successfully used in various studies for different plants. Moreover, comparisons of this model with other crop models have shown its effectiveness in simulating yield. The SSM-iCrop model requires input data on weather parameters (minimum and maximum temperature, precipitation, and solar radiation), soil properties, cultivar-specific parameters, and management practices (planting date, plant density, irrigation, and nitrogen fertilization). The SSM-iCrop model was parameterized and calibrated in this study using data from various studies conducted in Iran between 2001 and 2022. The calibration process involved adjusting plant parameters within a reasonable range, as determined by scientific literature, to minimize the difference between simulated and observed data. The parameters that yielded the best fit were selected as the final estimates. Lastly, the model was evaluated using different studies.



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.2025.90531.1362>

Results and Discussion

The SSM-iCrop model accurately simulated key maize growth stages, including emergence, tasseling, silking, and physiological maturity (RMSE = 13.22, CV = 17.4, $r = 0.97$). The model also accurately predicted leaf area index (RMSE = 0.4, CV = 6.2, $r = 0.98$), biological yield (RMSE = 431.3, CV = 23.9, $r = 0.66$), and grain yield (RMSE = 161.9, CV = 16.9, $r = 0.81$). Compared to previous studies, such as Zeinali *et al.* (2016), the current study demonstrated superior performance in grain yield prediction. While Zeinali *et al.* (2016) did not explicitly simulate nitrogen dynamics, the current study considered nitrogen processes. Manschadi *et al.* (2021) reported high accuracy in simulating grain maize yield in Austrian conditions. The difference in accuracy between the two studies may be attributed to the quality of the observed data, as accurate parameterization is crucial for model performance. Although this study incorporated nitrogen fertilization treatments and examined the impact of nitrogen-related parameters on yield, dry matter production, and leaf area, specific nitrogen-related traits were not evaluated. This is because existing research has primarily focused on the overall effects of nitrogen fertilization on yield and yield components, often neglecting the measurement of nitrogen content in critical plant tissues such as leaves and grains.

Conclusion

The performance of the SSM-iCrop model for simulating key maize growth stages, leaf area index, and biological and grain yield was suitable. This model is a valuable tool for simulating maize yield and optimizing management practices in Iran. By simulating the impact of different environmental factors and management strategies, the model can help farmers and policymakers make informed decisions to improve maize production and ensure food security.

Keywords: Grain yield, Plant modeling, Simulation

پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد، نمو فنولوژیک و عملکرد ذرت (*Zea mays* L.) دانه‌ای در ایران

نعیمه بیاتیان^{۱*}، افشین سلطانی^{۱*}، ابراهیم زینلی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

چکیده

بخش عمده نیاز کشور به ذرت (*Zea mays* L.) از طریق واردات تأمین می‌شود. با توجه به کمبود اراضی قابل کشت و محدودیت منابع آب قابل دسترس، افزایش عملکرد در واحد سطح تنها راهحل موجود برای افزایش تولید است. کاهش خلأ عملکرد از طریق بهینه‌سازی مدیریت تولید، رویکردی مؤثر برای حصول این هدف است. استفاده از یک مدل شبیه‌سازی قابل اعتماد می‌تواند با ارزیابی شیوه‌های مدیریتی، نقش قابل توجهی در کاهش خلأ عملکرد و دستیابی به عملکرد بهینه ایفا نماید. یکی از منابع عدم قطعیت در پیش‌بینی مدل‌های گیاهی، تخمین مقادیر پارامترهای ورودی مدل است. این مطالعه با هدف پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای ذرت دانه‌ای در ایران انجام شد. به این منظور، ابتدا پارامترهای گیاهی مدل با استفاده از نتایج مطالعاتی که در بازه سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ در کشور انجام گرفته بود، تخمین زده شد، به‌طوری‌که اختلاف بین نتایج مشاهده‌شده در آزمایشات مزرعه‌ای و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل به حداقل رسید. سپس مدل با استفاده از بخش دیگری از مطالعات ارزیابی گردید. براساس نتایج، مدل به‌خوبی توانست مراحل نمو فنولوژیک شامل روز بیولوژیک تا سبز شدن، تاسل‌دهی، ابریشم‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک ($RMSE = 13.22$, $CV = 17.4$, $r = 0.97$)، شاخص سطح برگ ($RMSE = 0.4$, $CV = 6.2$, $r = 0.98$)، عملکرد بیولوژیک ($RMSE = 431.3$, $CV = 23.9$, $r = 0.66$) و عملکرد دانه ($RMSE = 161.9$, $CV = 16.9$, $r = 0.81$) را پیش‌بینی نماید. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل SSM-iCrop می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قابل اعتماد در ارزیابی و بهینه‌سازی شیوه‌های مدیریت تولید ذرت در شرایط کشور مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، عملکرد دانه، مدل‌سازی گیاهی

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از غلات مهم و اصلی مناطق گرمسیر و معتدل جهان است که در تأمین غذای بیش از ۹۰ درصد جمعیت جهان به‌طور مستقیم و غیرمستقیم نقش دارد (Ochieng', 2021). این غله همواره نقش فزاینده و متنوعی در سیستم‌های کشاورزی و غذایی جهانی ایفا کرده است. به‌دلیل افزایش تقاضای طی چند دهه گذشته سطح زیرکشت و تولید جهانی ذرت افزایش یافته و به بیش از یک میلیارد تن در سال رسیده است (García-Lara & Serna-Saldivar, 2019). در حال حاضر، ذرت از نظر سطح زیرکشت پس از گندم (*Triticum aestivum* L.) در جایگاه دوم

جهانی و از نظر حجم تولید در ردیف اول قرار دارد (FAOSTAT, 2021). براساس آمارنامه جهاد کشاورزی (۱۴۰۲)، در حال حاضر سطح زیرکشت ذرت دانه‌ای در کشور حدود ۱۶۰ هزار هکتار، عملکرد دانه ۷۱۲۹ کیلوگرم در هکتار و میزان تولید حدود ۱۱۳۶۰۰۰ تن برآورد شده است (Unknown, 2023). حدود ۸۵ درصد از ذرت دانه‌ای کشور در استان‌های خوزستان (۲۶ درصد)، کرمان (۲۳ درصد)، کرمانشاه (۲۰ درصد) و فارس (۱۵ درصد) تولید می‌شود (شکل ۱). بررسی پتانسیل عملکرد، شناسایی عوامل محدودکننده عملکرد و بهینه‌سازی سیستم مدیریت کشت برای دستیابی به عملکرد مطلوب ضروری می‌باشد (Ochieng' et al., 2021). سالانه پژوهش‌های متعددی برای بهینه‌سازی مدیریت کشت ذرت (شامل انتخاب تاریخ و تراکم کاشت، زمان مناسب آبیاری، میزان و زمان مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه کود نیتروژن) در کشور انجام می‌شود (Madadzadeh Amiri, Kambouzia, & Soufizadeh, 2023; Madadzadeh, Kambouzia, & Soufizadeh, 2017). اما شناسایی سیستم مدیریت بهینه کشت با استفاده از آزمایش‌های مزرعه‌ای، به‌دلیل اثرات متقابل محیط و اقدامات مدیریتی پرهزینه،

۱- گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

گرگان، گرگان، ایران

(*) نویسنده مسئول:

Email: afshin.soltani@gmail.com,

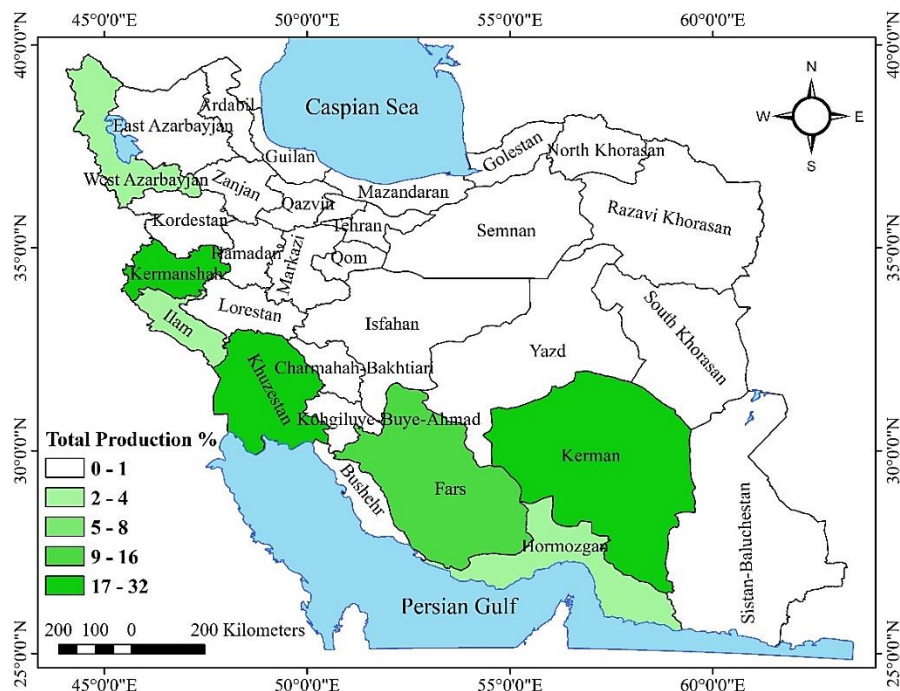
Naeimeh.Bayatian@gmail.com

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.90531.1362>

زمان بر و گاهی در عمل غیرممکن است (Hammer Messina, Wu, & Cooper, 2019).

مدل‌های گیاهی، ابزار مهم و قدرتمندی برای شبیه‌سازی تعاملات بین ژنوتیپ، عوامل محیطی و شیوه‌های مدیریتی محسوب می‌شوند (Guiguitant et al., 2017; Hammer et al., 2019; Jing et al., 2024; Soltani & Hoogenboom, 2007). این مدل‌ها رشدونمو گیاه را در پاسخ به متغیرهای آب‌وهوایی، شرایط خاک، عوامل مدیریتی و ویژگی‌های ژنتیکی رقم برای سال‌های متمادی در مکان‌های متعدد شبیه‌سازی می‌کنند (Manschadi et al., 2021). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی در مطالعات مختلفی همچون بهینه‌سازی مصرف کودها (Tang et al., 2018)، بهینه‌سازی تاریخ و تراکم کاشت (Ali et al., 2022; Saddique et al., 2019; Shen, Xu, Zhao, Xing, & Ma, 2020)، الگوی آبیاری (Rugira, Ma, Zheng, Wu, & Liu, 2021)، صفات مطلوب گیاهی برای افزایش عملکرد محصول (Abidi, Soltani, & Zeinali, 2024; Haghshenas, Soltani, Ghanbari Malidarreh, Ajam Norouzi, & Dastan, 2020; Messina et al., 2015; Kimball et al., 2023; Nehbandani, Barani, Soltani, Torabi, & Sharifian Bahraman, 2023) و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد (Chisanga, Moombe, & Elijah, 2022; Kafaie Ghaeini, 2023) استفاده قرار گرفته‌اند.

عملکرد مدل‌های گیاهی در شبیه‌سازی پاسخ گیاه به عوامل اقلیمی، خاکی، ژنتیکی و مدیریتی تا حد زیادی به داده‌های ورودی و کیفیت پارامتریابی بستگی دارد (Manschadi et al., 2021). بنابراین پارامتریابی دقیق مدل به‌منظور تخمین مناسب پارامترهای حاکم بر فنولوژی و فرآیندهای رشد محصول، برای کاهش عدم قطعیت و بهبود دقت شبیه‌سازی مدل ضروری است (Salo et al., 2016). منشادی و همکاران (Manschadi et al., 2021)، تأثیر کیفیت پارامتریابی بر دقت نتایج شبیه‌سازی دو مدل APSIM و SSM-iCrop را مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه کیفیت پارامتریابی عملکرد مدل ساده SSM-iCrop را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما پارامتریابی کامل مدل، کارایی هر دو مدل را بهبود می‌بخشد. در این حالت، عملکرد مدل ساده SSM-iCrop برابر و یا حتی بیش‌تر از مدل APSIM برآورد شد. با توجه به سادگی آزمون، کاربرد و تفسیر نتایج مدل SSM-iCrop در مقایسه با سایر مدل‌های پیچیده (Soltani & Sinclair, 2015) و تأیید نتایج ارزیابی مدل در مطالعات مختلف (Manschadi et al., 2021)، هدف از مطالعه حاضر پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد و عملکرد ذرت دانه‌ای در کشور بود.



شکل ۱- میزان تولید ذرت دانه‌ای در استان‌های مختلف کشور

Figure 1- Grain maize production share in different provinces of Iran

شامل سبز شدن (EMR)، پایان تولید آغازی برگ (EJU)، آغاز تاسل‌دهی (TSI)، ظهور تاسل (TSE)، ابریشم‌دهی (SIL)، شروع رشد دانه (BSG)، پایان رشد دانه (TSG)، رسیدگی فیزیولوژیک (PM) و رسیدگی برداشت (HM) را شبیه‌سازی می‌کند. مراحل نمو فنولوژیکی با استفاده از مفهوم روز بیولوژیک و براساس سرعت نسبی نمو در دما و طول روز نسبت به شرایط مطلوب محاسبه می‌گردد. نمو از EJU تا TSI به دما و دوره نوری حساس است، درحالی‌که سایر مراحل تنها تحت تأثیر دما قرار دارند (Soltani & Sinclair, 2012). واکنش سرعت نسبی نمو به دمای روزانه با یک تابع دندان‌مانند با پارامترهای دمای پایه، دمای مطلوب تحتانی و فوقانی و دمای سقف توصیف می‌شود. واکنش به فتوپریود نیز با یک تابع دو تکه‌ای شامل فتوپریود بحرانی (۱۲/۵ ساعت) و ضریب حساسیت به فتوپریود کمی‌سازی می‌گردد. در فتوپریودهای کمتر یا مساوی فتوپریود بحرانی، مقدار تابع فتوپریود برابر با یک در نظر گرفته می‌شود (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012). مقادیر

عددی پارامترهای فنولوژی در جدول ۱ ارائه شده است.

گسترش و زوال سطح برگ: مدل SSM-iCrop گسترش سطح برگ را در دو مرحله شبیه‌سازی می‌کند. ابتدا تعداد گره‌های ساقه اصلی براساس تجمع دما محاسبه شده و با معکوس کردن سرعت ظهور برگ، مقدار فیلوکرون به دست می‌آید. در این مرحله، تعداد برگ‌ها به‌طور خطی با افزایش واحد دمایی افزایش می‌یابد تا زمانی که به حداکثر تعداد برگ در ساقه اصلی (TLM) برسد. سپس سطح برگ بالقوه روزانه به‌عنوان تابعی از تعداد گره‌ها یا برگ‌های موجود محاسبه می‌شود (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012). در مرحله بعد، از TLM تا رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ، افزایش شاخص سطح برگ براساس میزان ماده خشک تخصیص‌یافته به برگ (GLF) برحسب گرم در مترمربع در روز) و سطح برگ (SLA) بر حسب مترمربع در گرم) محاسبه می‌گردد. با شروع پر شدن دانه (BSG)، تولید برگ متوقف و فرآیند زوال برگ آغاز می‌شود. کاهش روزانه سطح برگ (DLAI) براساس سرعت کاهش نیتروژن برگ‌ها (XNLF) برحسب گرم در مترمربع در روز) و نیتروژن ویژه برگ در برگ‌های سبز (SLNG) برحسب گرم نیتروژن در مترمربع) و برگ‌های زرد (SLNS) برحسب گرم نیتروژن در مترمربع) تعیین می‌شود. در نهایت، شاخص سطح برگ (LAI) با تلفیق افزایش (GLAI) و کاهش (DLAI) روزانه طبق رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

$$DLAI = XNLF / (SLNG - SLNS) \quad (1)$$

$$LAI_t = LAI_{t-1} + GLAI - \quad (2)$$

تولید ماده خشک: تولید ماده خشک روزانه (DBP) براساس تشعشع فعال فتوسنتزی (IPAR) مگاژول در مترمربع بر روز، کسری

اگرچه مدل SSM-iCrop پیش از این برای ذرت مورد ارزیابی قرار گرفته، اما در مطالعه زینلی و همکاران (Zeinali, Soltani, & Khadempir, 2016) این مدل در شرایط گرگان و صرفاً براساس داده‌های هواشناسی سال ۲۰۱۵ پارامتریابی و ارزیابی شده است. به‌علاوه در مطالعه آنها فرض بر عدم محدودیت نیتروژن بوده و پویایی این عنصر در خاک و گیاه بررسی نشده است. حال آن‌که مطالعه حاضر با بررسی دقیق پژوهش‌های انجام‌شده در نقاط مختلف کشور، حال آن‌که مطالعه‌حاضر با بررسی دقیق پژوهش‌های انجام‌شده در نقاط مختلف کشور، شبیه‌سازی را در سال‌ها و مکان‌های متعدد و با در نظر گرفتن پویایی نیتروژن در خاک و گیاه انجام داده است. به همین سبب، پارامترهای برآوردشده در این مطالعه، دقت شبیه‌سازی مدل را افزایش داد.

مواد و روش‌ها

مدل ساده SSM-Maize، در سال ۱۹۹۰ توسط Muchow و همکاران در ابتدا با هدف ارزیابی اثر تابش خورشیدی و دما بر عملکرد پتانسیل ذرت در نقاط مختلف طراحی شد (Muchow, Sinclair, & Bennett, 1990). این مدل در سال‌های آتی، نخست برای شبیه‌سازی اثرات کمبود آب بر پتانسیل عملکرد (Muchow & Sinclair, 1991) و سپس شبیه‌سازی اثر نیتروژن بر پتانسیل عملکرد ذرت توسعه یافت (Sinclair & Muchow, 1995) و در نهایت با افزودن جزئیات بیشتر سیستم کشت، از جمله مدل لایه‌ای خاک تکمیل گردید (Soltani, Maddah, & Sinclair, 2013).

مدل SSM-iCrop با استفاده از داده‌های حداقل و حداکثر دما، بارش و تابش خورشیدی، پارامترهای خاک، پارامترهای ژنتیکی ویژه رقم و اطلاعات مدیریتی (شامل تاریخ کاشت، تراکم، آبیاری، میزان و الگوی مصرف کود نیتروژن)، قادر به شبیه‌سازی روزانه مراحل فنولوژی، گسترش و پیری برگ، تولید و توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد، موازنه آب و نیتروژن در گیاه و خاک است. لازم به ذکر است که این مدل محدودیت‌های ناشی از آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز را در نظر نمی‌گیرد.

مدل SSM-iCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت، به ۵۳ پارامتر نیاز دارد که در هفت گروه دسته‌بندی می‌شوند: فنولوژی (۱۱) پارامتر، توسعه و زوال سطح برگ (هشت پارامتر)، تجمع و توزیع ماده خشک (شش پارامتر برای هر کدام)، تشکیل عملکرد (سه پارامتر)، روابط آبی (نه پارامتر) و موازنه نیتروژن در گیاه (۱۰ پارامتر). پارامترهای مورد بررسی در فرآیند پارامتریابی و ارزیابی مدل در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

فنولوژی: مدل فرعی فنولوژی در SSM-iCrop براساس رویکرد کینیری (Kiniry, 1991) است و مراحل کلیدی نمو ذرت

(RUE) با استفاده از RUE در شرایط مطلوب (IRUE) و یک ضریب تعدیل دما (TCFRUE) مطابق رابطه (۴) تعیین می‌گردد. مقدار IRUE برای ذرت ۳/۵ گرم بر مگاژول در نظر گرفته شده و با توجه به دمای روزانه تعدیل می‌شود. کل ماده خشک تولیدی با جمع مقادیر روزانه محاسبه می‌گردد (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani *et al.*, 2013).

$$RUE = IRUE \times TCFRUE \quad (4)$$

از تشعشع دریافتی که صرف تولید ماده خشک در گیاه می‌شود (FINT)، کارایی مصرف نور (RUE گرم بر مگاژول) و ضریب اصلاحی تنش خشکی برای رشد مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani *et al.*, 2013).

$$DBP = IPAR \times FINT \times RUE \times WSFG \quad (3)$$

مقدار KPAR برای تمام فصل رشد ثابت و برابر ۰/۶۵ در نظر گرفته می‌شود. مقدار ماده خشک تولیدشده در هر روز از حاصل ضرب PAR دریافت‌شده در RUE به دست می‌آید. کارایی مصرف نور

جدول ۱- پارامترهای گیاهی ذرت در مدل SSM-iCrop
Table 1- Plants parameters for maize in SSM-iCrop

نماد Symbol	پارامتر Parameters	واحد Unit	مقدار Value	منبع References
فنولوژی Phenology				
TBD	دمای پایه Base temperature for development	°C	8	Soltani & Sinclair 2012
TP1D	دمای مطلوب تحتانی Optimum temperature for development	°C	34	Soltani & Sinclair 2012
TP2D	دمای مطلوب فوقانی Optimum temperature for development	°C	37	Soltani & Sinclair 2012
TCD	دمای سقف Ceiling temperature for development	°C	45	Soltani & Sinclair 2012
CPp	فتوپریود بحرانی Critical photoperiod	h	12.5	Soltani & Sinclair 2012
Ppsen	ضریب حساسیت به دوره نوری Photoperiod sensitivity coefficient	-	0.52	Soltani & Sinclair 2012
bdSOWEMR	روز بیولوژیک از کاشت تا سبز شدن Biological days from sowing to emergence	bd	3	Soltani & Sinclair 2012
bdEMREJU	روزبیولوژیک از سبز شدن تا پایان تولید آغازی‌های برگ Biological days from emergence to juvenile	bd	9	Current study مطالعه حاضر
bdSILPM	روزبیولوژیک از ابریشم‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک Biological days from silking to physiological maturity	bd	34.2	Current study مطالعه حاضر
گسترش و پیری سطح برگ Leaf area development and senescence				
Phyl	فیلوکرون Phyllochron, the accumulated thermal time required for the successive leaves' appearance in the main stem	°C leaf ⁻¹	38.9	مطالعه حاضر Current study
PLACON	ضریب ثابت معادله برای محاسبه سطح برگ A coefficient (constant) in the power relationship between plant leaf area and mainstem node number	-	1	Soltani & Sinclair 2012
PLAPOW	توان رابطه بین سطح برگ و تعداد گره A coefficient (exponent) in the power relationship between plant leaf area and main stem node number (For 300 plants m ⁻²)	-	2.78	Current study مطالعه حاضر
a_plapow_d	ضریب ثابت در رابطه بین PLAPOW و تراکم گیاه A coefficient (constant) in the relationship between PLAPOW and plant density	-	1.0378	Soltani & Sinclair 2012
b_plapow_d	ضریب ثابت در رابطه بین PLAPOW و تراکم گیاه A coefficient (constant) in the relationship between PLAPOW and plant density	-	0.0047	Soltani & Sinclair 2012
SLA	سطح برگ ویژه Specific leaf area	m ² g ⁻¹	0.022	Soltani & Sinclair 2012

FrzTh	دمای بحرانی یخندان برگ Low temperature/freezing threshold for leaf death	°C	8	Soltani & Sinclair 2012
FrzLDR	ضریب تخریب برگ در دماهای پایین‌تر از دمای بحرانی یخندان Fraction leaf destruction below the critical by each degree centigrade	$m^2 m^{-2}$	0.01	Soltani & Sinclair 2012
HeatTH	دمای بحرانی تنش دمای بالا Heat threshold temperature for leaf senescence	°C	37	Soltani & Sinclair 2012
HtLDR	ضریب تخریب برگ در دماهای بالاتر از دمای بحرانی Relative increase in leaf senescence rate per each degree above heat threshold	$m^2 m^{-2}$	0.1	Soltani & Sinclair 2012
تجمع ماده خشک Dry mass accumulation				
TBRUE	دمای پایه برای تولید ماده خشک Base temperature for dry matter production	°C	6.2	Soltani & Sinclair 2012
TP1RUE	دمای مطلوب تحتانی برای تولید ماده خشک Lower optimum temperature for dry matter production	°C	16.5	Soltani & Sinclair 2012
TP2RUE	دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک Upper optimum temperature for dry matter production	°C	33	Soltani & Sinclair 2012
TCRUE	دمای سقف برای تولید ماده خشک Ceiling temperature for dry matter production	°C	44	Soltani & Sinclair 2012
KPAR	ضریب خاموشی نور Extinction coefficient for photosynthetically active radiation	–	0.6	Soltani & Sinclair 2012
IRUE	کارایی استفاده از تشعشع Radiation use efficiency under optimal growth conditions	$g MJ^{-1}$	3.5	Soltani & Sinclair 2012
CO2RES	ضریب حساسیت RUE به دی‌اکسیدکربن A coefficient that describes RUE response to CO ₂ in a curvilinear response.	–	0.35	Soltani & Sinclair 2012
توزیع ماده خشک Dry mass partitioning				
FLF1A	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ در سطوح پایین ماده خشک بخش هوایی Partitioning coefficient to leaves during the main phase of leaf area development at lower levels of total crop mass	$g g^{-1}$	0.8	Current study مطالعه حاضر
FLF1B	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ در سطوح بالاتر ماده خشک بخش هوایی Total crop mass ($g g^{-1}$) FLF1A 0.6 0.6 Partitioning coefficient to leaves during the main phase of leaf area development at higher levels of total crop mass	$g g^{-1}$	0.15	Current study مطالعه حاضر
WTOPL	ماده خشک بخش هوایی Total crop mass when leaf partitioning coefficient turns from FLF1A to FLF1B	$g g^{-1}$	210	Soltani & Sinclair 2012
FLF2	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ از مرحله پایان تولید برگ تا آغاز پر شدن دانه Partitioning coefficient to leaves from termination leaf growth on mainstem to beginning seed growth	$g g^{-1}$	0.05	Soltani & Sinclair 2012
تشکیل عملکرد Yield formation				
FRTRL	کسر ماده خشک تاج قابل انتقال مجدد در شروع رشد دانه Fraction crop mass at the beginning of seed growth which is translocatable to grains	$g g^{-1}$	0.22	Soltani & Sinclair 2012
GCF	ضریب تبدیل دانه Grain conversion coefficient	$g g^{-1}$	1	Soltani & Sinclair 2012
PDHI	حداکثر مقدار شیب افزایش شاخص برداشت The rate of linear increase in harvest index during effective grain filling period	$g g^{-1} d^{-1}$	0.014	Soltani & Sinclair 2012
WDHI1	مقدار بحرانی ماده خشک در آغاز پر شدن دانه A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling	$g m^{-2}$	0	Soltani & Sinclair 2012
WDHI2	مقدار بحرانی ماده خشک در آغاز پر شدن دانه A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling	$g m^{-2}$	0	Soltani & Sinclair 2012

WDHI3	مقدار بحرانی ماده خشک در آغاز پر شدن دانه A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling	g m^{-2}	9999	Soltani & Sinclair 2012
WDHI4	مقدار بحرانی ماده خشک در آغاز پر شدن دانه A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling	g m^{-2}	9999	Soltani & Sinclair 2012
روابط آب Water relations				
iDEPORT	عمق ریشه در زمان سبز شدن Initial depth of roots at emergence or beginning leaf growth	mm	150	Soltani & Sinclair 2012
MEED	حداکثر عمق مؤثر ریشه Maximum effective depth of water extraction from soil	mm	1100	Soltani & Sinclair 2012
GRTDP	حداکثر سرعت افزایش عمق ریشه در شرایط مطلوب Potential daily increase (growth) in root depth	mm d^{-1}	33	Soltani & Sinclair 2012
TEC	ضریب کارایی تعرق Transpiration efficiency coefficient	Pa	9	Soltani & Sinclair 2012
WSSG	مقدار آستانه کسر آب قابل تعرق برای کاهش تولید ماده خشک FTSW* threshold when dry matter production starts to decline	-	0.25	Soltani & Sinclair 2012
WSSL	مقدار آستانه کسر آب قابل تعرق برای کاهش توسعه سطح برگ FTSW threshold when leaf area development starts to decline	-	0.35	Soltani & Sinclair 2012
WSSD	مقدار آستانه کسر آب قابل تعرق برای تاخیر در مراحل فنولوژیک A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit	-	0	Soltani & Sinclair 2012
FLDKL	تعداد تلفات سیل متوالی Killing number of consecutive flooding	day	50	Soltani & Sinclair 2012
بودجه نیتروژن در گیاه Plant nitrogen budget				
SLNG	محتوای نیتروژن در برگ‌های سبز Specific leaf nitrogen in green leaves (target)	g N m^{-2}	1.95	Current study مطالعه حاضر
SLNS	محتوای نیتروژن در برگ‌های پیر (زرد) Specific leaf nitrogen in senesced leaves (minimum)	g N m^{-2}	0.4	Current study مطالعه حاضر
SNCG	محتوای نیتروژن در ساقه سبز Stem nitrogen concentration in green stems (target)	g g^{-1}	0.033	Current study مطالعه حاضر
SNCS1	حداقل محتوای نیتروژن در ساقه زرد Stem nitrogen concentration in senesced stems before beginning of seed growth (minimum)	g g^{-1}	0.005	Current study مطالعه حاضر
SNCS2	حداکثر محتوای نیتروژن در ساقه زرد Stem nitrogen concentration in senesced stems after beginning of seed growth (minimum)	g g^{-1}	0.0025	Current study مطالعه حاضر
GNC min	حداقل محتوای نیتروژن دانه Grain nitrogen concentration (minimum)	g g^{-1}	0.009	Current study مطالعه حاضر
GNC max	حداکثر محتوای نیتروژن دانه Grain nitrogen concentration (maximum)	g g^{-1}	0.025	Current study مطالعه حاضر
MXNUP	حداکثر سرعت جذب روزانه نیتروژن Maximum rate of nitrogen uptake	$\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	0.45	Current study مطالعه حاضر

(FLF1A). در مراحل بعدی و با افزایش وزن خشک و در شرایط مطلوب رشد رویشی، سهم تخصیص به ساقه افزایش می‌یابد (۰/۱۵ = FLF1B و ۰/۰۵ = FLF2). تخصیص ماده خشک به برگ برای روزهای بیولوژیک قبل از سبز شدن و بعد از پایان رشد برگ صفر و مقدار ماده خشک تجمعی (WTOTPL) ۲۱۰ گرم در مترمربع در نظر

توزیع ماده خشک: توزیع ماده خشک تولیدشده روزانه به اندام‌های مختلف گیاه با استفاده از ضرایب تخصیص ماده خشک صورت می‌گیرد. تخصیص ماده خشک بین برگ و ساقه با یک الگوی دو قسمتی توصیف می‌شود. در مراحل اولیه رشد و در مقادیر کم وزن خشک کل، بخش عمده ماده خشک به برگ اختصاص می‌یابد (۰/۸ =

سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ در سطح کشور روی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ انجام شده بود، بهره گرفته شد. این آزمایش‌ها به بررسی تأثیر عوامل مختلف زراعی شامل تراکم بوته، زمان و میزان مصرف کود نیتروژن و الگوی آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت پرداخته بودند. برای انجام پارامتریابی، اطلاعات ورودی مورد نیاز مدل شامل جزئیات مدیریت زراعی (سال و تاریخ کاشت، تراکم، زمان و مقدار آبیاری و کود نیتروژن) و ویژگی‌های خاک منطقه اجرای هر آزمایش از مقالات علمی مندرج در **جدول ۲** استخراج گردید. داده‌های هواشناسی روزانه (حداقل و حداکثر دما، ساعات آفتابی و میزان بارش) برای سال‌های اجرای آزمایش‌ها از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. به‌منظور تکمیل داده‌های هواشناسی، داده‌های گم‌شده با استفاده از افزونه Weatherman در مدل زراعی DSSAT برآورد گردید (Pickering et al., 1994). همچنین میزان تشعشع خورشیدی روزانه با استفاده از رابطه آنگستروم و براساس ساعات آفتابی محاسبه شد.

پارامترهای خاک مورد نیاز مدل، با استناد به اطلاعات موجود در مقالات و با استفاده از داده‌های بانک اطلاعات خاک HC27 تکمیل گردید (Koo & Dimes, 2013). لازم به ذکر است که اعتبار این بانک اطلاعات خاک پیش‌تر در شرایط اقلیمی ایران مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته بود (Nehbandani, Soltani, Nourbakhsh, & Dadrasi, 2020). در نهایت، مدل برای سناریوهای مختلف آزمایش اجرا شد. جزئیات منابع مورد استفاده، تیمارهای آزمایش، سال و مکان اجرای آن‌ها در **جدول ۲** ارائه شده است.

با توجه به سوابق پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای ذرت (Manschadi et al., 2021; Zeinali et al., 2016)، فرآیند برآورد پارامترهای گیاهی به‌صورت مرحله‌ای انجام شد. در گام نخست، پارامترهای مرتبط با فنولوژی کالیبره شدند. پس از تعیین این پارامترها، تنظیم پارامترهای مربوط به توسعه سطح برگ صورت گرفت. در مرحله پایانی، پارامترهای شبیه‌سازی جذب و تخصیص نیتروژن، تولید ماده خشک و عملکرد مورد برآورد قرار گرفتند. در این مطالعه، پارامتریابی مدل با استفاده از روش کالیبراسیون دستی انجام شد. به این منظور، مقادیر پارامترهای گیاهی مؤثر در معادلات مدل، در محدوده‌های منطقی استخراج‌شده از مطالعات پیشین و گزارش‌های معتبر تغییر داده شدند و خروجی مدل با داده‌های واقعی مقایسه گردید. مقادیری از پارامترها که منجر به حداقل اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده گردید، به‌عنوان مقادیر نهایی پارامترها انتخاب شدند.

ارزیابی مدل: ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV) و ضریب همبستگی (r) انجام شد. علاوه بر این، برای ارزیابی میزان

گرفته می‌شود (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012).

تشکیل عملکرد: تشکیل عملکرد در مدل با توجه به کل ماده خشک تولیدشده در دوره پر شدن دانه و ضریب تخصیص ماده خشک به دانه شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌سازی سرعت رشد دانه و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت صورت می‌گیرد (Soltani & Sinclair, 2012). سرعت رشد واقعی دانه به تولید روزانه ماده خشک و ماده خشک حاصل از انتقال مجدد محدود می‌شود. مقدار ماده خشک قابل انتقال به دانه از حاصل ضرب کسر قابل انتقال ماده خشک تاج‌پوشش در شروع رشد دانه در مقدار ماده خشک تاج‌پوشش در شروع رشد دانه حاصل می‌شود. تفاضل سرعت رشد دانه و مقدار ماده خشک تولیدی روزانه، سهم انتقال مجدد روزانه را طی دوره پر شدن دانه تعیین می‌نماید.

موازنه آب: موازنه آب با در نظر گرفتن میزان بارندگی و آبیاری تا ۱۰ لایه از خاک شبیه‌سازی می‌شود و اثرات کمبود یا بیش‌بود آب بر رشدونمو گیاه ارزیابی می‌گردد. تعرق روزانه گیاه (TR) با استفاده از تولید ماده خشک روزانه (DDMP)، کمبود فشار بخار (VPD) و ضریب کارایی تعرق (TEC) محاسبه می‌گردد (Soltani & Sinclair, 2012).

$$TR = (DDMP \times VPD) / TEC \quad (5)$$

جذب و تخصیص نیتروژن: تقاضای روزانه نیتروژن قبل از رشد دانه براساس افزایش روزانه شاخص سطح برگ سبز (GLAI)، افزایش روزانه ماده خشک ساقه (GST)، غلظت نیتروژن در واحد سطح برگ سبز (SLNG) و غلظت نیتروژن ساقه سبز (SNCG) تعیین می‌شود. در صورت کمبود نیتروژن جذب‌شده، ابتدا غلظت نیتروژن ساقه کاهش یافته و در مراحل شدیدتر، نیتروژن از برگ به ساقه منتقل می‌شود.

پس از شروع رشد دانه، تقاضای روزانه نیتروژن دانه از حاصل ضرب سرعت رشد دانه در غلظت نیتروژن دانه محاسبه می‌گردد. در صورت محدودیت جذب نیتروژن، نیاز دانه از انتقال نیتروژن برگ و ساقه تأمین می‌شود. میزان نیتروژن قابل انتقال روزانه از برگ و ساقه براساس شاخص سطح برگ، وزن خشک ساقه و اختلاف غلظت نیتروژن در اندام‌های سبز و زرد تعیین می‌شود. بخشی از نیتروژن موجود در برگ و ساقه به‌عنوان نیتروژن ساختاری و غیرقابل انتقال در نظر گرفته می‌شود. میزان انتقال نیتروژن از برگ به نسبت نیتروژن قابل انتقال در برگ به کل نیتروژن قابل انتقال بستگی دارد (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012).

پارامتریابی مدل: به‌منظور پارامتریابی مدل SSM-iCrop، از داده‌های حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای متعددی که در بازه

تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی تا حدود زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی قرار می‌گیرد. به علاوه مراحل فنولوژی نقش بسزایی در سیستم مدیریت کشت دارند. به همین دلیل، تعیین دقیق پارامترهای مرتبط با فنولوژی اهمیت زیادی در کارایی مدل شبیه‌سازی دارد (Nehbandani, Soltani, Zeinali, 2015; Raeisi, & Najafi, 2015). مقادیر مشاهده‌شده برای مراحل فنولوژیک به ترتیب، روز تا سبز شدن ۴ تا ۹، برای روز تا تاسل‌دهی ۵۰ تا ۸۴، روز تا ابریشم‌دهی ۵۲ تا ۸۶ و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک بین ۹۷ و ۱۳۷ روز متغیر بود. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل SSM-iCrop با دقت خوبی مراحل رشد فنولوژیک شامل روز تا سبز شدن، روز تا تاسل‌دهی، روز تا ابریشم‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک را شبیه‌سازی کرده است. براساس نتایج، مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای پیش‌بینی مراحل رشد فنولوژیکی ۱۳/۲۲ روز و ضریب تغییرات بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده ۱۷/۴ درصد برآورد شد. همچنین همبستگی بالای نتایج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده ($r = 0.97$) نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل رشد فنولوژی ذرت است (شکل ۲ الف).

انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر مشاهده‌شده، از نمودار پراکنش با خط ۱:۱ و حاشیه ۲۰ درصد استفاده گردید. رابطه‌های مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌های آماری به شرح زیر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (6)$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}{\bar{x}} \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

که در آن‌ها، X_i : مقادیر مشاهده‌شده، Y_i : مقادیر شبیه‌سازی‌شده، n : تعداد کل مشاهدات، $\bar{X}$: میانگین مقادیر مشاهده‌شده و $\bar{Y}$: میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده است.

نتایج

در این مطالعه، دو پارامتر مرتبط با مراحل نمو فنولوژیک (bdEMREJU و bdSILPM)، دو پارامتر مرتبط با گسترش سطح برگ (فیلوکرون و PLAPOW)، دو پارامتر مرتبط با تجمع ماده خشک (ضرایب تخصیص ماده خشک به برگ) و همه پارامترهای مرتبط با تخصیص نیتروژن در گیاه تغییر یافت. پارامترهای تغییر یافته و مقدار اولیه آن‌ها در مدل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- آزمایش‌های استفاده‌شده جهت برآورد پارامتر وارزیابی مدل SSM-iCrop برای ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴

Table 2- Experiments used for parameterization and evaluation of SSM-iCrop model for Maize (SC704)

سال، مکان اجرای آزمایش Experiment location, season and year	تیمارها Treatments	منبع Reference
Shiraz (Fars), 1999	تراکم و سطوح نیتروژن Plant density, nitrogen rates	(Sadeghi & Bahrani, 2001)
Shiraz (Fars), 1999	سطوح نیتروژن و رطوبت Nitrogen levels, water regime	(Ghadiri & Majidian, 2003)
Khuzestan, 2003- 2004	تراکم، سطوح نیتروژن و رطوبت Plant density, nitrogen levels, water regime	(Lak, Naderi, Siyadat, Ayeneband, & Nourmohammadi, 2006)
Saveh (Markazi), 2006	سطوح نیتروژن Nitrogen Levels	(Eradatmand Asli, Farrokhi, & Usefi Rad, 2009)
Shiraz (Fars), 2007- 2008	آرایش کاشت، تراکم و سطوح نیتروژن Planting pattern, density, nitrogen levels	(Izadi & Emam, 2009)
Karaj (Alborz), 2007	سطوح نیتروژن Nitrogen Levels	(Karimi, Mazaheri, Peyghambari, & Mirabzadeh Ardakani, 2011)
Gorgan (Golestan), 2012	تاریخ کاشت و تراکم Planting date, plant density	(Zeinali et al., 2016)
Kerman, 2013- 2014	سطوح نیتروژن Nitrogen Levels	(Madadzadeh, Kambouzia, Soufizadeh, & Panahi, 2017)
Kermanshah, 2014- 2015	آبیاری و سطوح نیتروژن Irrigation level, nitrogen levels	(Ghobadi et al., 2017)
Kerman, 2014	سطوح نیتروژن Nitrogen levels	(Madadzadeh & Amiri, 2022)

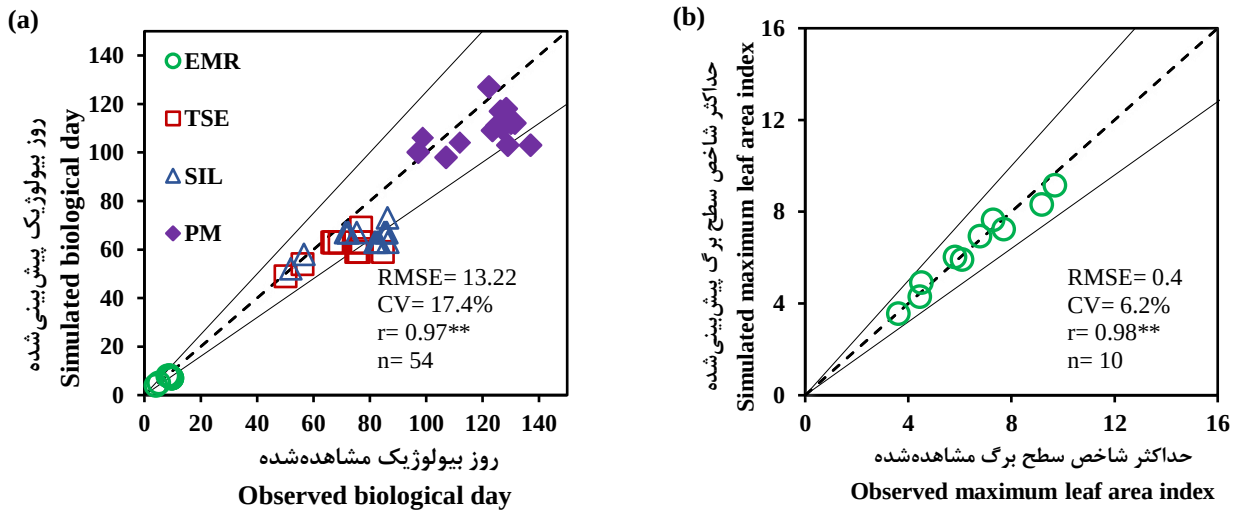
جدول ۳- پارامترهای گیاهی تغییر یافته در مدل SSM-iCROP برای ذرت رقم ۷۰۴
Table 3- Cultivar-specific modified input parameters used for SSM-iCROP for maize (SC704)

علامت اختصاری Acronym	پارامتر Parameter	واحد Unit	اولیه Default	تغییر یافته Modified
bdEMREJU	روز بیولوژیک از سبز شدن تا پایان رشد آغازی‌های برگی Biological day from emergence to end of juvenile	bd	8.5	8
bdSILPM	روز بیولوژیک از ابریشم‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک Biological day from silking/end of leaf growth on main-stem to physiological maturity	bd	33.8	33
Phyl	فیلوکرون Phyllochron	°C leaf ⁻¹	33.9	38.9
PLAPOW8	توان رابطه بین سطح برگ و تعداد گره Coefficients in power relationship between plant leaf area and main-stem node number	g g ⁻¹	2.9	2.78
FLF1A	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ در مرحله اصلی توسعه برگ Partitioning coefficient to leaves during main phase of leaf area development at lower levels of total crop mass	g g ⁻¹	0.7	0.6
FLF1B	ضریب تخصیص ماده خشک به برگ در مرحله دوم توسعه برگ Partitioning coefficient to leaves during main phase of leaf area development at higher levels of total crop mass	g g ⁻¹	0.15	0.14
SLNG	مقدار نیتروژن در واحد سطح برگ در برگ‌های سبز (جوان) Specific leaf nitrogen in green leaves (target)	g m ⁻²	1.35	1.9
SLNS	مقدار نیتروژن در برگ‌های زرد (پیر) Specific leaf nitrogen in senesced leaves (minimum)	g m ⁻²	0.4	0.25
SNCG	غلظت نیتروژن در ساقه سبز Stem nitrogen concentration in green stems (target)	g g ⁻¹	0.0106	0.04
SNCS1	غلظت نیتروژن در ساقه از سبز شدن تا شروع پر شدن دانه Stem nitrogen concentration in senesced stems from emergence to begin seed growth	g g ⁻¹	0.0025	0.005
SNCS2	غلظت نیتروژن در ساقه از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک Stem nitrogen concentration in senesced stems from BSG to PM	g g ⁻¹	0.0025	0.0025
GNC (min)	حداقل غلظت نیتروژن دانه Grain nitrogen concentration minimum	g g ⁻¹	0.011	0.009
GNC (max)	حداکثر غلظت نیتروژن دانه Grain nitrogen concentration maximum	g g ⁻¹	0.011	0.0025
MXNUP	حداکثر سرعت جذب روزانه نیتروژن Maximum uptake rate of nitrogen	g m ⁻² . d ⁻¹	0.6	0.62

گرم بر مترمربع گزارش شده بود. براساس نتایج حاصل از ارزیابی مدل، جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد بیولوژیک ۴۳۱ گرم بر مترمربع و برای عملکرد دانه ۱۶۱ گرم بر مترمربع برآورد شد. ضریب تغییرات بین نتایج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در عملکرد بیولوژیک ۲۳/۹ درصد و در عملکرد دانه ۱۶/۹ درصد محاسبه شد. ضریب همبستگی بین نتایج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به‌ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۶۶ برآورد گردید. در شکل ۳ که رابطه خطی برازش‌یافته بین مقادیر عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد، اکثر نقاط بین خطوط ± 20 درصد قرار گرفته‌اند. این امر، برآورد صحیح پارامترهای ذرت و کارایی مدل در تخمین مقدار عملکرد را تأیید می‌نماید.

در آزمایش‌های استفاده‌شده برای ارزیابی مدل (جدول ۲)، مقدار شاخص برگ مشاهده‌شده بین ۳/۵ تا ۹/۶ متغیر بود. نتایج شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج، جذر میانگین مربعات خطا برای حداکثر شاخص سطح برگ ۰/۴، ضریب تغییرات و ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده به‌ترتیب ۶/۲ درصد ۰/۹۸ برآورد گردید. براساس نتایج ارزیابی، مدل دقت بالایی در پیش‌بینی حداکثر شاخص سطح برگ داشت (شکل ۲- ب).

مقدار عملکرد بیولوژیک مشاهده‌شده در آزمایشات مختلف (جدول ۲)، از ۱۰۴۹ تا ۲۷۰۵/۷ گرم بر مترمربع متغیر بود. همچنین دامنه تغییرات داده‌های مشاهده‌شده برای عملکرد دانه بین ۵۱۹/۸ و ۱۶۹۱

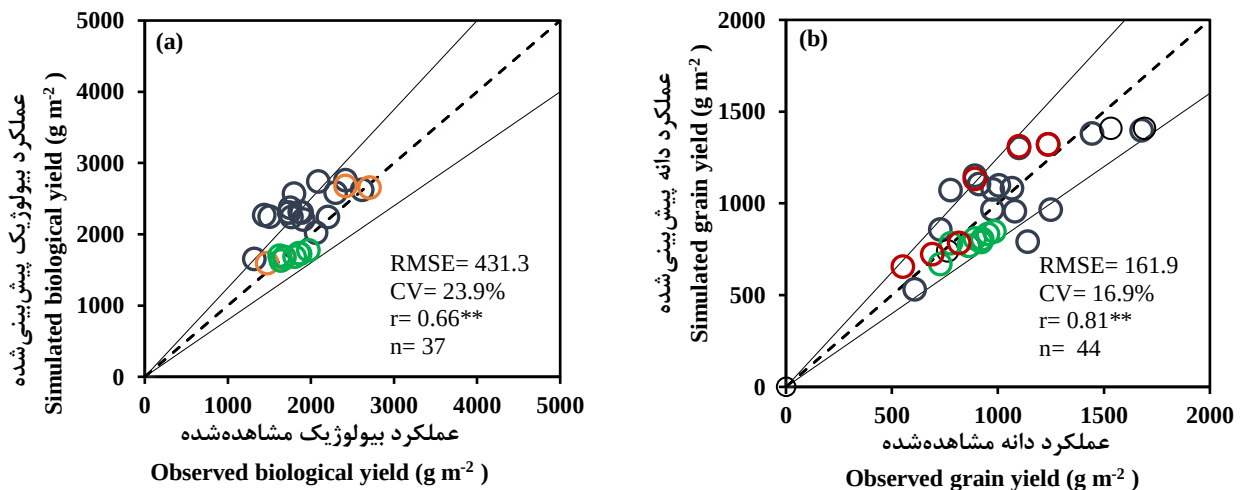


شکل ۲- (الف). مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده روز تا مراحل مختلف فنولوژی (از سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک) و (ب) حداکثر شاخص سطح برگ شبیه سازی شده نسبت به مشاهده شده

Figure 2- Simulated versus observed (a) days to phenological stages, from germination to physiological maturity, and (b) maximum leaf area index

دامنه ۲۰ درصد اختلاف بین داده های شبیه سازی و مشاهده شده با خطوط ممتد و خط ۱:۱ به صورت با خط نقطه چین نشان داده شده است. همچنین ** نشان دهنده معنی داری در سطح یک درصد است.

The solid lines represent the 20% range of discrepancy between simulated and observed values; the dashed line indicates the 1:1 line. Asterisks (**) indicate significance at $\alpha = 0.01$.



شکل ۳- عملکرد بیولوژیک (a) و عملکرد دانه (b) شبیه سازی شده در مقابل مشاهده شده

Figure 3- Simulated versus observed biological yields (a) and grain yield (b)

دامنه ۲۰ درصد اختلاف بین داده های شبیه سازی و مشاهده شده با خطوط ممتد و خط ۱:۱ به صورت با خط نقطه چین نشان داده شده است. همچنین ** نشان دهنده معنی داری در سطح یک درصد است.

The solid lines represent the 20% range of discrepancy between simulated and observed values; the dashed line indicates the 1:1 line. Asterisks (**) indicate significance at $\alpha = 0.01$.

بحث

در این مطالعه، مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد و عملکرد ذرت در ایران پارامتریابی و ارزیابی شد. مدل، عملکرد خوبی در پیش‌بینی مراحل فنولوژیک (شکل ۲- الف)، شاخص سطح برگ (شکل ۲- ب) و عملکرد (شکل ۳) داشت و ضریب تغییرات در دامنه استاندارد و قابل قبول (۳۰ درصد - ۱۰ درصد) برای مدل‌های گیاهی قرار گرفت (Hammer et al., 2010). عملکرد مدل برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت در مقایسه با سایر مطالعات قابل قبول بود. در مطالعه‌ای، یکوب و همکاران (Yakoub, Lloveras, Biau, Lindquist, & Lizaso, 2017) عملکرد مدل DSSAT را برای پیش‌بینی رشد و عملکرد و جذب نیتروژن ارزیابی کردند. در مطالعه آن‌ها، RMSE برای عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به ترتیب ۳۳۲۴ و ۱۳۱۳ کیلوگرم در هکتار و شاخص تبیین (R^2) به ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۳۰ برآورد شد. به و همکاران (Beah et al., 2021) مدل APSIM را برای ارقام مختلف ذرت دانه‌ای پارامتریابی و ارزیابی کردند. در مطالعه مذکور، شاخص RMSE برای روز تا رسیدگی ۳/۴ تا ۴/۲ روز، برای شاخص سطح برگ ۰/۲۴ تا ۰/۳، برای عملکرد بیولوژیک ۵۱/۷ تا ۹۸/۸ گرم بر مترمربع و برای عملکرد دانه در حدود ۳۰ تا ۲۸ گرم بر مترمربع ارزیابی شد. دقت نتایج مطالعه حاضر نسبت به مطالعه آن‌ها قابل قبول است. باسو و همکاران (Basso, Liu, & Ritchie, 2016)، عملکرد مدل CERES-Maize را در مطالعات و شرایط مختلف رشد ارزیابی کردند. متوسط شاخص RMSE برای شاخص سطح برگ در بیش از ۲۰ مطالعه مختلف ۰/۸۳ برآورد شد. کارایی مدل حاضر در پیش‌بینی سطح برگ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر بود ($RMSE = 0.4$).

زینی و همکاران (Zeinali et al., 2016) مدل SSM-iCrop را برای ذرت در شرایط گرگان پارامتریابی کردند. در مطالعه آن‌ها، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تغییرات برای روز تا رسیدگی به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۱۷ درصد، ضریب تغییرات (CV) برای عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به ترتیب ۸/۱۹ درصد و ۴/۱۱ درصد و ضریب تبیین (R^2) برای عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۷۶ گزارش شد. مطالعه حاضر عملکرد دانه را با دقت بالاتری نسبت به مطالعه آن‌ها شبیه‌سازی نمود. به‌علاوه در مطالعه آن‌ها نیتروژن در حالت پتانسیل در نظر گرفته شد و پویایی نیتروژن شبیه‌سازی نگردید. منشادی و همکاران (Manschadi et al., 2021)، مدل SSM-iCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت دانه‌ای در شرایط اتریش پارامتریابی و ارزیابی کردند. براساس نتایج آن‌ها، جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه ۳۲/۶۳ گرم و ضریب تبیین (R^2) بین نتایج مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده ۰/۹۸ برآورد شد و نتایج دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی عملکرد دانه داشت. با توجه به

آنکه صحت و دقت پارامترهای مشاهده‌شده نقش مهمی در ارزیابی عملکرد مدل دارد، کاهش دقت نتایج مطالعه حاضر در مقایسه با نتایج آن‌ها را می‌توان تا حد زیادی به دقت داده‌های مشاهده‌شده مرتبط دانست. لازم به ذکر است که اگرچه تیمارهای کودی نیتروژن در این مطالعه گنجانده شده است و اثر پارامترهای مرتبط با نیتروژن بر عملکرد، تولید ماده خشک و سطح برگ بررسی شده، اما صفات مرتبط با نیتروژن به‌طور مجزا ارزیابی نشدند، زیرا داده‌های دقیق و یکپارچه‌ای برای تغییرات نیتروژن در خاک و سیستم گیاه (ریشه، ساقه، برگ و دانه) در کشور ثبت نشده است. در مطالعات موجود، تنها اثر کود نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد بررسی شده، اما محتوای نیتروژن در برگ و دانه اندازه‌گیری نشده بود، در برخی موارد اطلاعات خاک ناقص یا تعداد اندازه‌گیری‌ها برای شبیه‌سازی ناکافی بود. به همین دلیل، امکان ارزیابی مدل (مقایسه پیش‌بینی مدل با داده‌های واقعی) در خصوص صفات مرتبط تغییرات نیتروژن در گیاه فراهم نبود.

اگرچه پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop در شبیه‌سازی عملکرد و پویایی نیتروژن برای ذرت محدود است، اما این مدل در مطالعات مختلف و برای گیاهان متعدد با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است (Manschadi et al., 2022; Nehbandani et al., 2020). نتایج مقایسه این مدل با سایر مدل‌های گیاهی نشان‌دهنده کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد است. برای مثال، سلطانی و سینکلی (Soltani & Sinclair, 2015) در مقایسه عملکرد مدل SSM-iCrop با سه مدل گیاهی DSSAT، APSIM و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد گندم بیان کردند که مدل SSM-iCrop علی‌رغم تعداد پارامترهای کمتر (۵۵ پارامتر) در مقایسه با APSIM (۲۹۲ پارامتر) و DSSAT (۲۱۱ پارامتر) عملکرد گندم را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود. ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌شده در این مدل ($CV = 8\%$) پایین‌تر از سایر مدل‌ها برآورد شد. در مطالعه منشادی و همکاران (Manschadi et al., 2021) عملکرد دو مدل SSM-iCrop و APSIM در شبیه‌سازی عملکرد و پویایی نیتروژن ذرت دانه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. آن‌ها عملکرد مدل SSM-iCrop را بیشتر برآورد کردند. در مدل SSM، شاخص RMSE برای عملکرد دانه ۳۲/۶۳ و برای مقادیر نیتروژن اندام‌های هوایی ۱/۴ گرم بر مترمربع بود، درحالی‌که این مقادیر در مدل APSIM به ترتیب ۵۹/۹۲ و ۲/۴ گرم بر مترمربع برآورد شد. همچنین ضریب تبیین (R^2) بین نتایج مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در مدل SSM و APSIM به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۷ گزارش گردید.

از آنجاکه عملکرد مدل‌های گیاهی در شبیه‌سازی پاسخ گیاه به عوامل اقلیمی، خاکی، ژنتیکی و مدیریتی تا حد زیادی وابسته به کیفیت پارامتریابی است (Manschadi et al., 2021) و با توجه به نتایج رضایت‌بخش ارزیابی مدل SSM-iCrop در کشور، می‌توان از

این مدل در مطالعات گسترده از جمله بهینه‌سازی مدیریت کشت ذرت دانه‌ای (شامل بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن، بهینه‌سازی تاریخ و تراکم کاشت و الگوی آبیاری)، پیش‌بینی رشد و عملکرد ذرت، خلاء عملکرد، شناسایی صفات مطلوب گیاهی برای افزایش عملکرد ذرت دانه‌ای، و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد ذرت دانه‌ای در کشور استفاده گردد. محققان پس از تأیید نتایج ارزیابی مدل، از این مدل در مطالعه دیگری برای شناسایی صفات مؤثر بر افزایش عملکرد ذرت دانه‌ای در کشور استفاده کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل SSM-iCrop در مقایسه با سایر مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، در محدوده قابل قبول شاخص‌های آماری (مانند ضریب همبستگی و ضریب تغییرات) قرار داشت و عملکرد مدل در پیش‌بینی مراحل فنولوژی، سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه، رضایت‌بخش ارزیابی گردید. با استناد به نتایج ارزیابی و با در نظر گرفتن تنوع داده‌های مشاهده‌شده که از مناطق مختلف کشت ذرت در ایران و تحت سطوح متفاوت مصرف کود نیتروژن جمع‌آوری شده بود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل SSM-iCrop با پارامترهای گیاهی واسنجی‌شده در این پژوهش، ابزاری توانمند و قابل اعتماد برای استفاده در طیف وسیعی از مطالعات مرتبط با ذرت در کشور است. در این مطالعه، با واسنجی دقیق مدل و ارائه مجموعه‌ای معتبر از

پارامترهای فیزیولوژیک که در شرایط واقعی مزرعه‌ای آزموده شده‌اند، زمینه برای به‌کارگیری مؤثر مدل در تحلیل سناریوهای مدیریتی، مطالعات خلأ عملکرد، شناسایی صفات مطلوب در برنامه‌های به‌نژادی و بهینه‌سازی سیستم‌های مدیریت زراعی ذرت از جمله تعیین مقادیر بهینه مصرف نیتروژن، زمان و تراکم کاشت، و ارزیابی الگوهای آبیاری فراهم شده است. از آنجاکه پارامترهای به‌دست‌آمده از دقت بالایی برخوردارند، سایر پژوهشگران می‌توانند بدون نیاز به انجام مجدد فرآیند زمان‌بر و پرهزینه واسنجی، از این مدل در مطالعات مشابه بهره‌برداری نمایند. این موضوع می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و منابع پژوهشی شده و بستر مناسبی برای گسترش مطالعات کاربردی در حوزه تولید ذرت فراهم آورد.

علاوه‌بر این، با توجه به واسنجی مدل در شرایط اقلیمی غالب مناطق کشت ذرت در ایران، استفاده از آن در ارزیابی کمی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد، و همچنین شناسایی صفات گیاهی مؤثر در پایداری عملکرد، می‌تواند به تدوین راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی و توسعه برنامه‌های به‌نژادی هدفمند کمک شایانی نماید. در عین حال، با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های جامع در زمینه پویایی نیتروژن در این مطالعه، پیشنهاد می‌شود که در صورت فراهم شدن داده‌های مرتبط در آینده، فرآیند پارامتریابی و ارزیابی مجدد مدل برای این بخش نیز در دستور کار قرار گیرد؛ اقدامی که می‌تواند موجب ارتقاء دقت مدل در شبیه‌سازی چرخه نیتروژن و در نتیجه بهبود پیش‌بینی عملکرد شود.

References

1. Abidi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2024). Identifying plant traits to increase wheat yield under irrigated conditions. *Heliyon*, 10(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31734>
2. Ali, M. G. M., Ahmed, M., Ibrahim, M. M., El Baroudy, A. A., Ali, E. F., Shokr, M. S., Aldosari, A. A., Majrashi, A., & Kheir, A. M. S. (2022). Optimizing sowing window, cultivar choice, and plant density to boost maize yield under RCP8.5 climate scenario of CMIP5. *International Journal of Biometeorology*, 66(5), 971-985. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02253-x>
3. Basso, B., Liu, L., & Ritchie, J. T. (2016). A Comprehensive Review of the CERES-Wheat, -Maize and -Rice Models' Performances. In D. L. Sparks ed., *Advances in Agronomy*, 136, 27-132. Academic Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.11.004>
4. Beah, A., Kamara, A. Y., Jibrin, J. M., Akinseye, F. M., Tofa, A. I., & Ademulegun, T. D. (2021). Simulation of the optimum planting windows for early and intermediate-maturing maize varieties in the nigerian savannas using the APSIM model. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.624886>
5. Chisanga, C. B., Moombe, M., & Elijah, P. (2022). Modelling climate change impacts on maize. *CABI Reviews*, 2022. <https://doi.org/10.1079/cabireviews202217008>
6. Eradatmand Asli, D., Farrokhi, G. R., & Usefi Rad, M. (2009). Effect of pyridoxine and different levels of nitrogen on yield and yield components of corn (*Zea mays* L. Var. SC. 704). *Journal on Plant Science Researches*, 14(2), 9.
7. FAOSTAT. (2021). <http://www.fao.org/faostat>
8. García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Chapter 1 - Corn history and culture. pp. 1-18 in S. O. Serna-Saldivar (Ed.), *Corn* (3rd Edition). AACC International Press and Woodhead Publishing, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00001-2>
9. Ghadiri, H., & Majidian, M. (2003). Effect of different nitrogen fertilizer levels and moisture stress during milky

- and dough stages on grain yield, yield components and water use efficiency of corn (*Zea mays* L.). *Journal of Water and Soil Science*, 7(2), 103-113. (in Persian with English abstract). <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-467-fa.html>
10. Ghobadi, R., Ghobadi, M., Mondani, F., Jalali Honarmand, S., & Farhadi Bansooleh, B. (2017). Effect of irrigation and nitrogen interactions on phenologic characteristics and growth indices of seed corn. *Plant Process and Function*, 6(21), 20. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1396.6.21.13.5>
11. Guiguitant, J., Marrou, H., Vadez, V., Gupta, P., Kumar, S., Soltani, A., Sinclair, T. R., & Ghanem, M. E. (2017). Relevance of limited-transpiration trait for lentil (*Lens culinaris* Medik.) in South Asia. *Field Crops Research*, 209, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.04.013>
12. Haghshenas, H., Soltani, A., Ghanbari Malidarreh, A., Ajam Norouzi, H., & Dastan, S. (2020). Selecting the ideotype of improved rice cultivars using multiple regression and multivariate models. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(8), 1134-1153. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1658866>
13. Hammer, G. L., van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S. C., Broad, I., Harland, P., & Muchow, R. C. (2010). Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of Experimental Botany*, 61(8), 2185-2202. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq095>
14. Hammer, G., Messina, C., Wu, A., & Cooper, M. (2019). Biological reality and parsimony in crop models—why we need both in crop improvement. *In Silico Plants*, 1(1), diz010. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diz010>
15. Izadi, M. H., & Emam, Y. (2009). Effect of planting pattern, plant density and nitrogen levels on grain yield and yield components of maize cv. SC704. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 12(3), 13. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1389.12.3.2.3>
16. Jing, Q., Boote, K. J., Liu, K., Hoogenboom, G., White, J. W., Smith, W., Jégo, G., Grant, B., Crépeau, M., Shang, J., Liu, J., Chipanshi, A., & Qian, B. (2024). Simulating the development and growth of lentil using the CSM-CROPGRO model. *Agronomy Journal*, 116(5), 23. <https://doi.org/10.1002/agj2.21654>
17. Kafaie Ghaeini, A., Soltani, A., Deihimfard, R., & Ajam Norouzi, H. (2023). Modifying sowing date as an adaptation strategy to climate change in grain maize (*Zea mays* L.) under mild-arid climates as simulated by the SSM-Maize model. *International Journal of Plant Production*, 17(3), 437-447. <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00252-5>
18. Karimi, H., Mazaheri, D., Peyghambari, S. A., & Mirabzadeh Ardakani, M. (2011). Effect of organic and chemical fertilizers application on grain yield and yield components of maize (*Zea mays* L.) SC704. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 13(4), 16. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1390.13.4.2.2>
19. Kimball, B. A., Thorp, K. R., Boote, K. J., Stockle, C., Suyker, A. E., Evett, S. R., Brauer, D. K., Coyle, G. G., Copeland, K. S., Marek, G. W., Colaizzi, P. D., Acutis, M., Alimagham, S., Archontoulis, S., Babacar, F., Barcza, Z., Basso, B., Bertuzzi, P., Constantin, J., De Antoni Migliorati, M., Dumont, B., Durand, J. L., Fodor, N., Gaiser, T., Garofalo, P., Gayler, S., Giglio, L., Grant, R., Guan, K., Hoogenboom, G., Jiang, Q., Kim, S. H., Kisekka, I., Lizaso, J., Masia, S., Meng, H., Mereu, V., Mukhtar, A., Perego, A., Peng, B., Priesack, E., Qi, Z., Shelia, V., Snyder, R., Soltani, A., Spano, D., Srivastava, A., Thomson, A., Timlin, D., Trabucco, A., Webber, H., Weber, T., Willaume, M., Williams, K., van der Laan, M., Ventrella, D., Viswanathan, M., Xu, X., & Zhou, W. (2023). Simulation of evapotranspiration and yield of maize: An inter-comparison among 41 maize models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 333, 109396. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109396>
20. Kiniry, J. R. (1991). Maize phasic development. In R. J. Hanks & J. T. Ritchie (Eds.), *Modeling plant and soil systems* (pp. 55–70). Agronomy Monograph No. 31. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c4>
21. Koo, J., & Dimes, J. (2013). *HC27 Generic Soil Profile Database*. Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/90WJ9W>
22. Lak, S., Naderi, A., Siyadat, S. A., Ayenehband, A., & Nourmohammadi, G. (2006). Effect of different levels of nitrogen and plant density on grain yield and its components and water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) cv. SC. 704 under different moisture conditions in Khuzestan. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 8(2), 153-170. (in Persian with English abstract). <http://agrobreedjournal.ir/article-1-297-fa.html>
23. Madadzadeh, M., & Amiri, S. R. (2022). Evaluation of growth, development and yield of maize cultivars for sustainable nitrogen management. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(4), 22. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/saps.2022.47202.2717>
24. Madadzadeh, M., Amiri, S. R., Kambouzia, J., & Soufizadeh, S. (2023). Calibration and evaluation of APSIM model for simulation of growth and development of KSC 704 and maxima maize hybrids under different amounts of nitrogen. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 20(4), 18. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.71744.1071>
25. Madadzadeh, M., Kambouzia, J., & Soufizadeh, S. (2017). Evaluation of maize (*Zea mays* L.) hybrids thermal time requirements of different soil fertility in the arid climate of Kerman. *Iranian Journal of Applied Ecology*,

- 6(2), 10. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijae.6.2.43>
26. Madadzadeh, M., Kambouzia, J., Soufizadeh, S., & Panahi, B. (2017). Evaluation of physiological responses of maize hybrids to different nitrogen levels in Kerman province, Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(2), 14. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v15i2.60121>
27. Manschadi, A. M., Eitzinger, J., Breisch, M., Fuchs, W., Neubauer, T., & Soltani, A. (2021). Full parameterisation matters for the best performance of crop models: Inter-comparison of a simple and a detailed maize model. *International Journal of Plant Production*, 15(1), 61-78. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00116-2>
28. 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>
29. Messina, C. D., Sinclair, T. R., Hammer, G. L., Curan, D., Thompson, J., Oler, Z., Gho, C., & Cooper, M. (2015). Limited-transpiration trait may increase maize drought tolerance in the US corn belt. *Agronomy Journal*, 107(6), 1978-1986. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0016>
30. Muchow, R. C., & Sinclair, T. R. (1991). Water deficit effects on maize yields modeled under current and "greenhouse" climates. *Agronomy Journal*, 83(6), 1052-1059. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300060023x>
31. Muchow, R. C., Sinclair, T. R., & Bennett, J. M. (1990). Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agronomy Journal*, 82(2), 338-343. <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200020033x>
32. Nehbandani, A., Barani, H., Soltani, A., Torabi, B., & Sharifian Bahraman, A. (2023). Estimating rangeland production in current and future conditions using SSM-iCrop2 model in Iran. *Agricultural Research*, 12(3), 346-355. <https://doi.org/10.1007/s40003-023-00652-z>
33. Nehbandani, A., Soltani, A., Nourbakhsh, F., & Dadrasi, A. (2020). Estimating crop model parameters for simulating soybean production in Iran conditions. *Oilseeds & fats Crops and Lipids*, 27, 1-9. <https://doi.org/10.1051/ocl/2020057>
34. Nehbandani, A. R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., & Najafi, R. A. (2015). Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*, 22(3), 1-26. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222050.1394.22.3.1.2>
35. Ochieng', I. O., Gitari, H. I., Mochoge, B., Rezaei-Chiyaneh, E., & Gweyi-Onyango, J. P. (2021). Optimizing maize yield, nitrogen efficacy and grain protein content under different N forms and rates. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 1867-1880. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00486-0>
36. Pickering, N. B., Hansen, J. W., Jones, J. W., Wells, C. M., Chan, V. K., & Godwin, D. C. (1994). WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal*, 86(2), 332-337. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600020023x>
37. Rugira, P., Ma, J., Zheng, L., Wu, C., & Liu, E. (2021). Application of DSSAT CERES-Maize to identify the optimum irrigation management and sowing dates on improving maize yield in Northern China. *Agronomy*, 11(4), 674. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/4/674>
38. Saddique, Q., Cai, H., Ishaque, W., Chen, H., Chau, H. W., Chattha, M. U., Hassan, M. U., Khan, M. I., & He, J. (2019). Optimizing the sowing date and irrigation strategy to improve maize yield by using CERES (crop estimation through resource and environment synthesis)-Maize model. *Agronomy*, 9(2), 109. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020109>
39. Sadeghi, H., & Bahrani, M. J. (2001). Effect of plant density and nitrogen rates on yield and yield components of corn (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 3(2), 13. (in Persian with English abstract). <http://agrobreedjournal.ir/article-1-439-fa.html>
40. Salo, T. J., Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Angulo, C., Ewert, F., Bindi, M., Calanca, P., Klein, T., Moriondo, M., Ferrise, R., Olesen, J. E., Patil, R. H., Ruget, F., Takáč, J., Hlavinka, P., Trnka, M., & Rötter, R. P. (2016). Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization. *The Journal of Agricultural Science*, 154(7), 1218-1240. <https://doi.org/10.1017/S0021859615001124>
41. Shen, H., Xu, F., Zhao, R., Xing, X., & Ma, X. (2020). Optimization of sowing date, irrigation, and nitrogen management of summer maize using the DSSAT-CERES-Maize model in the Guanzhong plain, China. *Transactions of the ASABE*, 63(4), 789-797. <https://doi.org/10.13031/trans.13654>
42. Sinclair, T. R., & Muchow, R. C. (1995). Effect of nitrogen supply on maize yield: I. modeling physiological responses. *Agronomy Journal*, 87(4), 632-641. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700040005x>
43. Soltani, A., & Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, 103(3), 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.06.003>
44. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield.

- Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI Publishing. 322 p.
45. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*, 175, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.019>
46. 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>
47. Tang, J., Wang, J., Fang, Q., Wang, E., Yin, H., & Pan, X. (2018). Optimizing planting date and supplemental irrigation for potato across the agro-pastoral ecotone in North China. *European Journal of Agronomy*, 98, 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.05.008>
48. Unknown. (2023). *Statistics of Crops Production in Iran, The Year 1402*. (in Persian). <https://www.maj.ir/>
49. Yakoub, A., Lloveras, J., Biau, A., Lindquist, J. L., & Lizaso, J. I. (2017). Testing and improving the maize models in DSSAT: Development, growth, yield, and N uptake. *Field Crops Research*, 212, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.002>
50. Zeinali, E., Soltani, A., & Khadempir, M. (2016). *Parameterization of SSM-Maize model for growth and yield simulation in Gorgan*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Research Report. (in Persian with English abstract).



Investigating the Effects of Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Drainage Water, Foliar Application of Amino Acids, and Salicylic Acid on Morpho-Physiological Characteristics of Camelina (*Camelina sativa* L.) Cultivars

H. Nezhad Gharebaghi¹, P. Hassibi^{1*}, A. Rahnama¹, D. Kehrizi², A. Monsefi¹

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

2- Department of Biotechnology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(*- Corresponding author's Email: p.hassibi@scu.ac.ir)

Received: 09 December 2024
Revised: 09 March 2025
Accepted: 10 March 2025
Available Online: 13 April 2025

How to cite this article:

Nezhad Gharebaghi, H., Hassibi, P., Rahnama, A., Kehrizi, D., & Monsefi A. (2025). Investigating the Effects of Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Drainage Water, Foliar Application of Amino Acids, and Salicylic Acid on Morpho-Physiological Characteristics of Camelina (*Camelina sativa* L.) Cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 417-438. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.91086.1363>

Introduction

This study aimed to utilize unconventional water resources to cultivating the strategic oilseed crop *Camelina sativa*, also investigating the effects of foliar application of L-amino acids and salicylic acid (SA) on morpho-physiological characteristics of Camelina cultivars. Soil and water salinity are the most significant problems in Khuzestan Province, leading to reduced agricultural productivity. High salinity in Khuzestan soils significantly reduces the growth and productivity of many crops. However, employing foliar spraying of amino acids and salicylic acid can serve as a magnificent method to reduce the impact of salt stress in saline soils. The current investigation intends to explore the effect of foliar spraying of amino acids and salicylic acid on the *Camelina sativa* L. under sugarcane (*Saccharum officinarum*) drainage water irrigation. Camelina as a low input oilseed crop has a few positive traits that make it possible to cultivate in Iran. The main advantages of Camelina like drought and salinity tolerance and high seed oil content make it valuable especially in less productive lands. Due to the large volumes of drainage water produced in the sugarcane industry, recycling this water and using it to irrigate salt-tolerant crops—other than sugarcane—can serve as a valuable source of supplemental irrigation. With proper management, drainage water recycling can also offer additional benefits, such as conserving conventional freshwater resources needed for expanding crop cultivation in the region.

Materials and Methods

The experiment was conducted during the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons using a split-split plot test based on a randomized complete block design in four replications at the sugarcane industry of Hakim Farabi, located in southern Khuzestan Province. Water sources as main factor included river water (control), alternate irrigation (alternating river water and sugarcane drainage water), sugarcane drainage water irrigation. Sub-factor was foliar applications at flowering stage included control (no application), L-amino acids at 1.5 and 3 L ha⁻¹, salicylic acid at 1 and 2 mM, and cultivars (Soheil and Sepehr) as sub-sub-factor. The amino acids used included alanine, arginine, aspartic acid, cysteine, glutamic acid, glutamine, glycine, histidine, isoleucine, leucine, lysine, methionine, phenylalanine, proline, serine, threonine, tryptophan, tyrosine, and valine from stock solutions of 1 and 1.5 L ha⁻¹.



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.2025.91086.1363>

Results and Discussion

Results indicated that under river water irrigation (Karun River), the Sepehr cultivar treated with 3 L ha⁻¹ L-amino acids exhibited a 53% higher seed yield compared to the untreated Soheil control. The lowest yield was observed under sugarcane drainage water irrigation. However, the Soheil cultivar showed a 35% yield advantage under sugarcane drainage water when treated with 3 L ha⁻¹ L-amino acids compared to the untreated Sepehr control. The highest seed yield over the two years was obtained from river water irrigation combined with a foliar application of 3 L ha⁻¹ of amino acids in the Sepehr cultivar (3609 kg ha⁻¹). In contrast, the lowest seed yield was recorded for the Sepehr cultivar under irrigation with sugarcane drain water. The best seed yield in the Soheil cultivar was also achieved with a foliar application of 3 L ha⁻¹ of amino acids (1691 kg ha⁻¹). The Sepehr cultivar exhibited higher grain and biological yields under river water irrigation. Foliar applications of amino acids and salicylic acid significantly improved seed yield, biological yield, harvest index, 1000-seed weight, number of siliques per plant, number of seeds per silique, silique length, and plant height under both drainage water and non-drainage water irrigation conditions. However, under drainage water irrigation, Sepehr yielded less than the Soheil cultivar. Overall, foliar application of L-amino acids and salicylic acid appeared to function as effective growth regulators, alleviating stress by enhancing nutrient uptake and ultimately improving seed yield.

Conclusion

This study concluded that foliar applications of amino acids and salicylic acid enhanced the growth and development of Camelina by improving nutrient absorption, mitigating stress effects, and increasing seed yield. The integration of L-amino acids and SA alleviated stress under unconventional water irrigation, demonstrating their potential for sustainable Camelina production. River water with amino acid supplementation yielded optimal results, while sugarcane drainage water required amino acid amendments to enhance productivity.

Keywords: Irrigation management, L-amino acids, Non-conventional water resources, Oilseed, Seed yield

بررسی تأثیر زهاب نیشکر (*Saccharum officinarum*)، کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها و اسیدسالیسیلیک روی برخی از ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک ارقام کاملینا (*Camelina sativa* L.)

حبیب نژاد قرباغی^۱، پیمان حسینی^{۱*}، افراسیاب راهنما^۱، دانیال کهریزی^۲، علی منصفی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

این آزمایش با هدف استفاده از منابع آب نامتعارف به منظور صرفه‌جویی در مصرف آب برای تولید محصول راهبردی دانه روغنی کاملینا (*Camelina sativa* L.) و همچنین مطالعه اثر کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها و اسیدسالیسیلیک بر بعضی از ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک ارقام کاملینا در سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲ به صورت کرت‌های دو بار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا گردید. منابع آبی به‌عنوان عامل اصلی شامل آبیاری با رودخانه (شاهد)، آبیاری تناوبی (یک بار آب رودخانه و یک بار آبیاری با آب زهکش به‌طور متناوب) و آبیاری با زهاب نیشکر، کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در پنج سطح شامل بدون کاربرد (شاهد)، آمینواسیدهای چپ‌گرد به‌میزان ۱/۵ و ۳ لیتر در هکتار، اسیدسالیسیلیک با غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار در مرحله گل‌دهی به‌عنوان عامل فرعی، و رقم در دو سطح شامل دو رقم سه‌پیل و سپهر به‌عنوان عامل فرعی بودند. نتایج آزمایش نشان دادند که کاربرد برگی آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های بالقوه برای افزایش رشدونمو کاملینا از طریق افزایش جذب عناصر غذایی باعث تعدیل اثرات تنش شده و عملکرد دانه را بهبود بخشید. نتایج نشان داد که در بین تیمارهای منابع آبی، در آبیاری با آب رودخانه کارون بیشترین عملکرد دانه رقم سپهر با کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید سه لیتر در هکتار نسبت به شاهد رقم سه‌پیل، ۵۳ درصد عملکرد بالاتری داشت. کمترین میزان عملکرد در کاربرد زهاب نیشکر مشاهده شد. هرچند رقم سه‌پیل در شرایط کاربرد زهاب نیشکر همراه با آمینواسید سه لیتر در هکتار به‌میزان ۳۵ درصد نسبت به شرایط کاربرد زهاب بدون کاربرد آمینواسید (شاهد) رقم سپهر برتری نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آمینواسیدهای چپ‌گرد، دانه روغنی، عملکرد دانه، مدیریت آبیاری، منابع آبی نامتعارف

مقدمه

مطالعات متعدد روی گیاه کاملینا نشان می‌دهد که این گیاه قادر است در شرایط مختلف آب‌وهوایی و خاک رشد نماید و در مقایسه با سایر دانه‌های روغنی مرسوم همچون کلزا (*Brassica napus*)، سویا (*Glycine max* L.) و آفتابگردان (*Helianthus annuus*) نیاز کمتری به آب، کود و آفت‌کش‌ها دارد و می‌تواند در زمین‌های حاشیه‌ای رشد نماید (Mohammadinejad, Bahramian, & Kahrizi, 2018; Putnik-Delic, Maksimovic, Zeremski, & Marjanovic-Jeromela, 2013; Li & Sun, 2015) در حال حاضر، افکار عمومی به‌سمتی است که شبکه‌های زهکشی به‌گونه‌ای طراحی شوند که حفظ حیات ساکنین زیست‌بوم‌ها تضمین شده و فعالیت‌های کشاورزی، کیفیت آب را زایل نکنند (Khairy, Shaban, M., Negm, Eldeen, & Ramadan, 2022; Yazar, Metin,

کاملینا (*Camelina sativa* L.) متعلق به خانواده کلمیان می‌باشد که با نام‌های کتان کاذب، کتان وحشی و کنجد آلمانی شناخته می‌شود و بومی مناطق مدیترانه‌ای آسیا و اروپا است که بررسی‌های کمی در اکثر گونه‌های این جنس صورت گرفته است (Qamarnia, Kahrizi, & Rostami Ahmadvandi, 2019).

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- گروه بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
(Email: p.hassibi@scu.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.91086.1363>

از اقدامات لازم جمع‌آوری زهاب‌های کشاورزی و کاربرد مجدد در برنامه‌های اصلاحی و زراعی است (Arun & Priyanka., 2021). کاربرد برون‌زای تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه (PGRS) به‌طور گسترده برای تحمل تنش در بسیاری از گونه‌های گیاهی با تعدیل بیوشیمیایی و فیزیولوژی سبب افزایش تحمل تنش‌ها می‌شود (Bakhtavar, Afzal, Basra, Ahmad, & Noor, 2015; Ismail et al., 2016). کاربرد شاخساره‌ای مانند (اسمولیت‌های آلی، آمینواسیدها، شبه هورمون‌های گیاهی مانند اسیدسالیسیلیک و مواد معدنی) یکی از راه‌های مقابله با شرایط نامناسب در علوم زیستی است (Hayat, Hasan, Fariduddin, Ahmad, 2008). آمینواسیدها می‌توانند به‌عنوان یک رویکرد عملی و سازگار با محیط‌زیست جهت بهبود رشد و عملکرد گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد (Ashour, Zeidan, & Elshemy., 2021). آمینواسیدها به‌عنوان منبع تأمین نیتروژن، در تولید پروتئین گیاهی و سبزینه (کلروفیل) و در نتیجه افزایش سطح برگ و افزایش تعداد کلروفیل برگ و تولید اسمولیت‌های سازگار در گیاه مؤثرند و همچنین موجب افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاه می‌شوند (Ghazi Manas, Banj Shafiee, Haj Seyed Hadi, & Darzi, 2013). بررسی‌های به‌عمل‌آمده توسط کولا و همکاران (Colla, Cardarelli, Bonini, & Rouphael, 2017)، نشان داد که کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها اثرات مستقیمی در تحریک رشد گیاه، افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود عملکرد دارد. اثرات مثبت کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها بر خصوصیات فیزیوشیمیایی، رشد و جذب عناصر غذایی در سایر محصولات زراعی مانند سویا (Teixeira et al., 2018)، کلم بروکلی (*Brassica oleracea* L.) (Shekari & Javanmardi, 2017) و کاهو (*Lactuca sativa* L.) (Khan et al., 2019) نیز در نتایج سایر محققان گزارش شده است. اسید سالیسیلیک از جمله ترکیبات فنلی است که در تعداد زیادی از گیاهان به‌وسیله ریشه گیاهان تولید می‌شود و به‌عنوان ماده‌ای شبه‌هورمونی نقش مهمی در رشد و نمو گیاهان ایفا می‌کند (Klessig, Choi, & Dempsey, 2018). اسید سالیسیلیک فرآورده‌های فیزیولوژیکی را در گیاهان تنظیم و عوارض جانبی تنش را کاهش داده و می‌تواند اثر نامطلوب تنش را بهبود بخشد (Yavas & Unay, 2016). در این رابطه، امام و پیرسته انوشه (Imam & Pirasteh Anousheh, 2014) با بررسی عملکرد و اجزای عملکرد جو (*Hordeum vulgare*) تحت تأثیر غلظت‌های متفاوت محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک در شرایط شور بیان کردند که عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه تحت تأثیر شوری کاهش معنی‌داری را در هر دو سال داشت، ولی اسیدسالیسیلیک در هر دو شرایط با و بدون تنش شوری موجب افزایش معنی‌دار این صفات گردید. این اثرات مثبت می‌تواند منجر به بهبود اغلب ویژگی‌های بیوشیمیایی مانند کاهش خسارات اکسیداتیو در اثر شوری و یا فیزیولوژیک مانند بهبود

(Yeşim, Çiğdem, & Servet, 2017). ایران نیز از جمله کشورهای است که در حال حاضر با این مشکلات روبه‌رو است و بسیاری از تالاب‌ها و رودخانه‌ها در اثر ورود زهاب زمین‌های کشاورزی هم‌جوار آلوده شده‌اند (Mokhtaran, Tavoosi, Varjavand, & Sepehri, 2020). در این راستا، یکی از اقدامات لازم، جمع‌آوری آب‌های برگشتی حاصل از کشاورزی و استفاده مجدد از آن‌ها در امور زراعی و باغی می‌باشد. هدف اصلی استفاده مجدد از زهاب، کاهش مقادیر زهاب است، به‌طوری‌که همزمان بتوان آب اضافی قابل دسترسی را برای آبیاری و یا مصارف دیگر تأمین کرد (Rajabzadeh & Pizra., 2022; Fernandes, Galvao, Santos, & Monteiro, 2023). استفاده مجدد تنها در صورتی مفید است که زهاب از کیفیت خوب و قابل قبولی برخوردار باشد (Ashu & Lee, 2018). در مطالعه‌ای توسط جرجسن و همکاران (Jorgensen, Solomon, & Cervinka, 1992)، از زهاب حاصل از کشت هویج (*Daucus carota*) برای آبیاری پنبه استفاده شد. زهاب پنبه که حجم آن کمتر شده و از لحاظ نمک و عناصر سمی مانند سلنیم غلیظ‌تر شد، برای آبیاری اوکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis*) استفاده گردید و زهاب حاصل برای آبیاری نوعی هالوفیت به‌نام آترپلیکس (*Atriplex amnicola*) به کار رفت. زهاب نهایی با غلظت بالا به حوضچه‌های تبخیری تخلیه گردید. نتایج نشان داد که این روش برای کاهش حجم و استفاده مؤثر از زهاب بسیار مفید است، اما هزینه‌های انتقال و تخلیه زهاب به حوضچه‌های تبخیری بالا می‌باشد. برای قسمتی از جنوب و جنوب غرب خوزستان که با محدودیت تأمین آب شیرین روبه‌رو است، استفاده از زهاب نیشکر را راه‌حل مناسبی برای کشت گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa*) در بهار و تابستان معرفی کردند (Mokhtaran et al., 2020). همچنین نتایج (Sharifipour et al., 2019) نشان دادند که از زهاب‌های با کیفیت مناسب در جنوب خوزستان می‌توان برای کشت گیاهان متحمل به شوری و توسعه منابع طبیعی برای جلوگیری از طوفان‌های گردوغبار استفاده کرد. لتی (Letey, 2005) به‌منظور مدیریت زهاب در یک سامانه آگروفرستری در کالیفرنیا، از زهاب یک محصول حساس به شوری برای آبیاری پنبه که متحمل به شوری است، استفاده کرد. این چرخه چند بار تکرار شد و زهاب حاصل به حوضچه‌های تبخیری تخلیه گردید. نتایج نشان داد که مزیت اصلی این سامانه ورود کمتر آب به حوضچه تبخیری و هدررفت کمتر آب می‌باشد. گراتان و همکاران (Grattan et al., 2004) به‌منظور کاهش حجم زهاب، نسبت به استفاده متوالی از زهاب برای آبیاری ۱۰ محصولات متحمل به شوری اقدام کردند. در پژوهشی دیگر، به‌منظور افزایش سطح زیرکشت و کاهش حجم زهاب، برای آبیاری گندم (*Triticum aestivum*) از زهاب استفاده شد، به‌طوری‌که ۴۰ درصد عملکرد محصول گندم حاصل شد. با توجه به توضیحات فوق و محدود بودن منابع آبی، یکی

ظرفیت فتوسنتزی و فعالیت روبیسکو در اثر کاربرد اسیدسالیسیلیک گردد.

با توجه به روند فزاینده شدت خشکسالی طی سال‌های اخیر و کمبود منابع آبی و همچنین سیاست‌های اتخاذشده از سوی شرکت توسعه نیشکر مینی بر استفاده مجدد از زهاب نیشکر در مزارع غیرنیشکری، لذا این آزمایش با هدف استفاده از منابع آب خاکستری به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب برای تولید محصول راهبردی دانه روغنی کاملینا انجام پذیرفت. همچنین کمبود اطلاعات کافی از پاسخ این گیاه به زهاب نیشکر به‌عنوان یک منبع نامتعارف آب و واکنش‌های مورفوفیزیولوژیک آن در شرایط آبیاری با این گونه منابع آبی، لزوم انجام این پژوهش در منطقه را بیشتر نمایان کرد. به نظر می‌رسد که می‌توان با ارائه یک راهکار مناسب مدیریتی، از زهاب حاصل از زراعت نیشکر جهت استفاده مجدد بهره جست. بر همین اساس، این مطالعه به‌منظور استفاده از زهاب نیشکر و بررسی تأثیر زهاب نیشکر، کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها و اسیدسالیسیلیک روی برخی از ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک ارقام کاملینا در شرایط خوزستان اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی واقع در جنوب استان خوزستان به‌صورت کرت‌های دوبرار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا گردید. منابع آبی به‌عنوان عامل اصلی شامل آبیاری با آب رودخانه (شاهد)، آبیاری تناوبی (یک بار آب رودخانه و یک بار آبیاری با آب زهکش به‌طور متناوب) و آبیاری با زهاب نیشکر، کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در پنج سطح شامل بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، آمینواسید ۱/۵ و ۳ لیتر در هکتار، اسیدسالیسیلیک با غلظت‌های یک و دو میلی‌مولار در مرحله گل‌دهی به‌عنوان عامل فرعی، و رقم در دو سطح شامل دو رقم سه‌پیل و سپهر به‌عنوان عامل فرعی بودند. ارقام مورد استفاده سه‌پیل و سپهر از شرکت دانش بنیان بیستون شفا کرمانشاه تهیه شدند. والد پدری این دو رقم Blanne Greek از کشور یونان و والد مادری آن‌ها رقم Calena.sp از کشور فرانسه بودند. در **جدول ۱** ارائه شده است. آمینواسیدهای چپ‌گرد مورد استفاده در این پژوهش شامل آمینواسیدهای چپ‌گرد با نام تجاری آرگانامین (محصول شرکت دانش بنیان کوه‌رنگ در کشور ایران شماره مجوز واحد فناوری وزارت علوم، تحقیقات و فناوری: ۵/۲۸۲۳/ب) با ترکیب آلانین (۲/۷ درصد)، آرژنین (۳/۶۸ درصد)، آسپارتیک (۲/۵۸ درصد)، سیستئین (۱/۲۲ درصد)، گلوتامیک اسید (۴/۴۹ درصد)، گلوتامین (۳/۵۶ درصد)، گلستین (۹/۶۷ درصد)، هیستیدین (۰/۶۹ درصد)،

ایزولوسین (۱/۹۸ درصد)، لوسین (۳/۴۶ درصد)، لیزین (۲/۳۴ درصد)، متیونین (۰/۲۹ درصد)، فنیل آلانین (۱/۷۵ درصد)، پرولین (۵/۳۸ درصد)، سرین (۲/۵۶ درصد)، ترئونین (۱/۱۹ درصد)، تریپتوفان (۰/۸۳ درصد)، تیروزین (۱/۹۱ درصد)، والین (۱/۷۳ درصد)، در لیتر به‌عنوان استوک تهیه گردید و مقادیر ۱/۵ لیتر و ۳ لیتر در هکتار پس از کالیبره کردن سم‌پاش دستی و محاسبه میزان آب مورد نیاز به همراه کاربرد سورفاکتانت از مارک تجاری طلای سبز B محصول شرکت زرافشان مورد استفاده قرار گرفت (Fayaz, Sorooshzadeh, & Heidarzadeh, 2024). اسیدسالیسیلیک مورد استفاده (با فرمول شیمیایی $C_7H_6O_3$ وزن مولکولی ۱۳۸/۱۲ گرم) متعلق به شرکت مرک آلمان بود. عملیات کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک (کد رشدی ۵۰) در زمان ۵۰ درصد گل‌دهی طی ساعات هفت تا نه صبح با سم‌پاش دستی طبق توصیه شرکت سازنده محلول استوک پایه به‌ترتیب شامل آمینواسید با غلظت‌های ۱/۵ لیتر و ۳ لیتر در هکتار، اسیدسالیسیلیک با غلظت‌های یک و دو میلی‌مولار با کاربرد ۱۰ لیتر آب در هر کدام از واحدهای آزمایشی طبق نقشه تیمارها در تاریخ‌های ۱۴۰۲/۱۲/۰۲ و ۱۴۰۱/۱۲/۰۲ محلول‌پاشی شد (Fayaz et al., 2024; Jahanbakhsh, Khajoei-Nejad, Moradi, & Naghizadeh, 2021). اطلاعات هواشناسی زمان اجرای آزمایش در **جدول ۲** آورده شده است. قبل از اجرای آزمایش و در مهرماه هر دو سال، مزرعه آزمایشی به‌وسیله گاواهن برگردان‌دار شخم زده شد و سپس به‌منظور خرد شدن کلوخ‌ها و همچنین یکنواخت شدن وضعیت خاک مزرعه، زمین دیسک و ماله زده شد. قبل از کاشت، نمونه‌های خاک از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر به‌صورت تصادفی گرفته شد (**جدول ۳**) پس از آماده‌سازی زمین به‌وسیله دیسک، ابعاد هر کرت آزمایشی ۳/۶ در ۴ مترمربع در نظر گرفته شد. هر کرت شامل شش پشته با فاصله ۶۰ سانتی‌متر و طول چهار متر بود. بذرها پس از ضدعفونی و مخلوط کردن با ماسه در دو طرف هر پشته با فاصله خطوط کاشت ۳۰ سانتی‌متر و فاصله روی خطوط حدود پنج سانتی‌متر در عمق یک سانتی‌متری در تاریخ‌های ۱۴۰۲/۰۸/۱۵ و ۱۴۰۱/۰۸/۱۵ کشت شد. به‌منظور جلوگیری از نشت رطوبت بین تیمارهای منابع آبی، فاصله بین سطوح منابع آبیاری سه متر و فاصله بین بلوک‌ها چهار متر در نظر گرفته شد. براساس نتایج آنالیز خاک و توصیه کودی مرکز تحقیقات، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل، ۵۰ کیلوگرم پتاسیم سولفات قبل از کاشت و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره در دو مرحله (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله دو برگی و ۵۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله ساقه‌دهی) استفاده شد. آبیاری براساس ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A انجام گردید و میزان آب ورودی به مزرعه نیز توسط کنتور محاسبه شد (Amiri-Darban, Nourmohammadi, Shirani Rad, 2024).

(۱) محاسبه شد (Fischer & Maurer, 1987).

$$SSI=1-(Ys/Yp)/SI \quad (۱)$$

$$SI=1-(Ys/Yp) \quad (۲)$$

که در آن، YP: عملکرد بالقوه هر ژنوتیپ در محیط بدون تنش، YS: عملکرد بالقوه هر ژنوتیپ در محیط تنش، $\sum YP$: میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ ها در محیط بدون تنش، $\sum YS$: میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ ها در محیط تنش و SI: شدت تنش است.

نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک انجام شد. با توجه عدم معنی‌دار شدن تست بارلت برای بیشتر صفات، لذا تجزیه مرکب با استفاده از برنامه آماری SAS نسخه ۹/۴ برای دو سال آزمایش انجام شد. همچنین مقایسه میانگین صفات با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گردید و برای رسم نمودارها از برنامه Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

براساس نتایج دو سال آزمایش، ارتفاع بوته ارقام به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر کاربرد شاخساره‌ای و رقم قرار گرفت (جدول ۶). مقایسه میانگین نیز مشخص نمود که در هر دو سال آزمایش، آبیاری با آب کارون در کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد سه لیتر در هکتار در رقم سپهر (۱۲۱/۸۷ سانتی‌متر) و تیمار منابع آبی آبیاری با زهاب نیشکر بدون کاربرد شاخساره‌ای در رقم سپهر (۴۴/۶۲ سانتی‌متر) به‌ترتیب بیشترین و کمترین ارتفاع بوته در زمان برداشت را دارا بودند (شکل ۱). نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک بر ارتفاع بوته بود، به‌صورتی‌که موجب کاهش اثرات منفی تنش شد.

(Mirhadi, & Majidi Heravan, 2021). میانگین میزان هدایت الکتریکی آب تیمارهای آبیاری در جدول ۴ و میانگین تجزیه شیمیایی آب در جدول ۵ طی دو سال آزمایش ارائه شده است (Neysi, Hassibi, Rahnama Ghahfarokhi, & Bahadori, 2024; Hovezawi, Naseri, & Izdpanah 2016). در هر نوبت آبیاری، با توجه به دبی کنتور مدت زمان آبیاری مشخص، و مقدار آب مصرفی برحسب مترمکعب در هکتار محاسبه شد. پس از جوانه‌زنی بذرها، عملیات تنک کردن (کد رشدی ۱۵) در مرحله سه تا چهار برگی در هر دو سال ۱۴۰۲/۰۹/۱۸ و ۱۴۰۱/۰۹/۱۸ گیاهچه‌ها برای دستیابی به تراکم تقریبی ۱۰۰ بوته در مترمربع انجام گردید (Martinelli & Galasso, 2011). در هر دو سال آزمایش، صفات ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی، فنولوژیکی و عملکردی مورد بررسی قرار گرفت. به‌دلیل مشاهده نشدن آفات طی دو سال، سم حشره‌کشی استفاده نشد. نمونه‌برداری‌ها برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی (کد رشدی ۷۹) در مرحله کپسول‌دهی کامل در تاریخ ۱۴۰۳/۰۱/۰۸ و ۱۴۰۲/۰۱/۰۸ انجام گردید. قبل از عملیات برداشت، به‌طور تصادفی از هر واحد آزمایشی، تعداد ۲۰ بوته انتخاب و صفات ارتفاع بوته و طول کپسول، تعداد دانه در کپسول و تعداد کپسول در بوته اندازه‌گیری شد، جهت تعیین عملکرد دانه، در پایان فصل رشد و هنگام رسیدگی کامل دانه‌ها در ارقام، پس از حذف دو ردیف کاشت از دو طرف و ۰/۵ متر از بالا و پایین هر کرت آزمایشی از سطحی معادل یک مترمربع، بوته‌ها با رطوبت حدود ۱۴ درصد در تاریخ‌های ۱۴۰۳/۰۲/۰۱ و ۱۴۰۲/۰۲/۰۱ با (کد رشدی ۹۹) برداشت شدند (Zarei, Hassibi, Kahrizi, & Safieddin Ardebili, 2022). برای تعیین وزن خشک، بوته‌های موجود در مساحت یک مترمربع از هر تیمار به‌طور کامل کف‌بر شده و پس از خشک نمودن در آون (۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد) توزین صورت گرفت. عملکرد دانه نیز با جداسازی کامل اندام‌هوایی گیاه از دانه به دست آمد. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد اقتصادی (عملکرد دانه) بر عملکرد زیستی ضریب ۱۰۰ محاسبه شد. محاسبه شاخص حساسیت به تنش براساس رابطه

جدول ۱- شناسنامه مشخصات رقم‌های مورد تحقیق

Table 1- Certification of the studied cultivars

نام رقم Name of the cultivars	نام به‌نژادگر The name of the breeder	مالک رقم Owner of the cultivars	سال معرفی Year of release	کد رقم Cultivar code
سهیل Sohail	دکتر دانیال کهریزی Dr. Danial Kahrizi	شرکت کشت و توسعه گیاهان دارویی بیستون شفا Beeston Shafa Medicinal Plants Cultivation and Development Company	1396	1.2.7.1
سپهر Sepehr	دکتر دانیال کهریزی Dr. Danial Kahrizi	شرکت کشت و توسعه گیاهان دارویی بیستون شفا Beeston Shafa Medicinal Plants Cultivation and Development Company	1396	1.2.7.5

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی منطقه اجرای آزمایش در کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی جنوب اهواز (سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)

Table 2- Meteorological information of the experiment region of Hakim Farabi sugarcane cultivation and industry in the south of Ahvaz (2022 and 2023 years)

		(درجه سانتی‌گراد)			(درجه سانتی‌گراد)		
		(°C)			(°C)		
		2022			2023		
ماه	Month	میانگین Mean	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	حداقل Min	حداکثر Max
فروردین	April	14.9	13	38.4	13.4	14	36.4
اردیبهشت	May	19.2	32.1	41	18.86	33.2	42
خرداد	June	36.5	21	49.7	36.18	16.8	48.7
تیر	July	39.4	17.2	50.5	38.24	23.3	50.6
مرداد	August	39.69	25.2	51.3	40.15	29.4	50.1
شهریور	September	36.52	15.7	48.5	29.9	19.4	41.7
مهر	October	31.6	12.2	43	28.02	15.1	42.1
آبان	November	24.13	11.7	35.3	21.41	8.8	38.6
آذر	December	18.2	6.5	26.4	16.82	5.3	30.4
دی	January	11.65	2.4	18.2	11.8	3	18.4
بهمن	February	14.6	-0.2	23	10.7	4	16.2
اسفند	March	19.2	1	30.7	19.1	2	31.8

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 3- Physiochemical properties of experimental site soil

سال	عمق	هدایت الکتریکی		کربن آلی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	گوگرد	شن	سیلت	رس
Year	Depth (cm)	EC (dS m ⁻¹)	pH	Organic C (%)	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	S (mg kg ⁻¹)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
2022-23	0-30	2.69	7.2	0.34	0.09	12.9	269	14.7	23	46	31
	30-60	1.42	7.5	0.48	0.08	9.9	192	15.5	25	47	28
2023-24	0-30	2.63	7.1	0.41	0.08	13.6	256	14.1	23	47	30
	30-60	1.48	7.3	0.52	0.09	10.2	229	14.6	24	49	27

جدول ۴- میانگین میزان هدایت الکتریکی آب تیمارهای آبیاری طی دو سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲

Table 4- Average of water electrical conductivity in irrigation treatments during 2022-2023

منبع آبیاری	آبیاری اول	آبیاری دوم	آبیاری سوم	آبیاری چهارم	آبیاری پنجم	آبیاری ششم	میانگین
Irrigation source	First irrigation	Second irrigation	Third irrigation	Fourth irrigation	Fifth irrigation	Sixth irrigation	Average
زهاب نیشکر Sugarcane water drainage	6.27	5.3	6.76	7.1	8.13	5.42	6.49
آبیاری با آب رودخانه کارون Irrigation with Karun River water	3.1	3.03	3.28	3.05	3.7	1.94	3.01

واحد اندازه‌گیری اعداد براساس دسی زیمنس بر متر (dS m⁻¹) می‌باشد.The unit of measurement is deciSiemens per meter (dS m⁻¹).

آمینواسید در لیتر به صورت کاربرد شاخساره‌ای بیشترین عملکرد ارتفاع بوته ۱۶۶/۵ سانتی متر به دست آمد. (El-Said & Mahdy, 2016)، تأثیر مثبت محرک‌های رشد به‌ویژه آمینواسید را در افزایش عملکرد

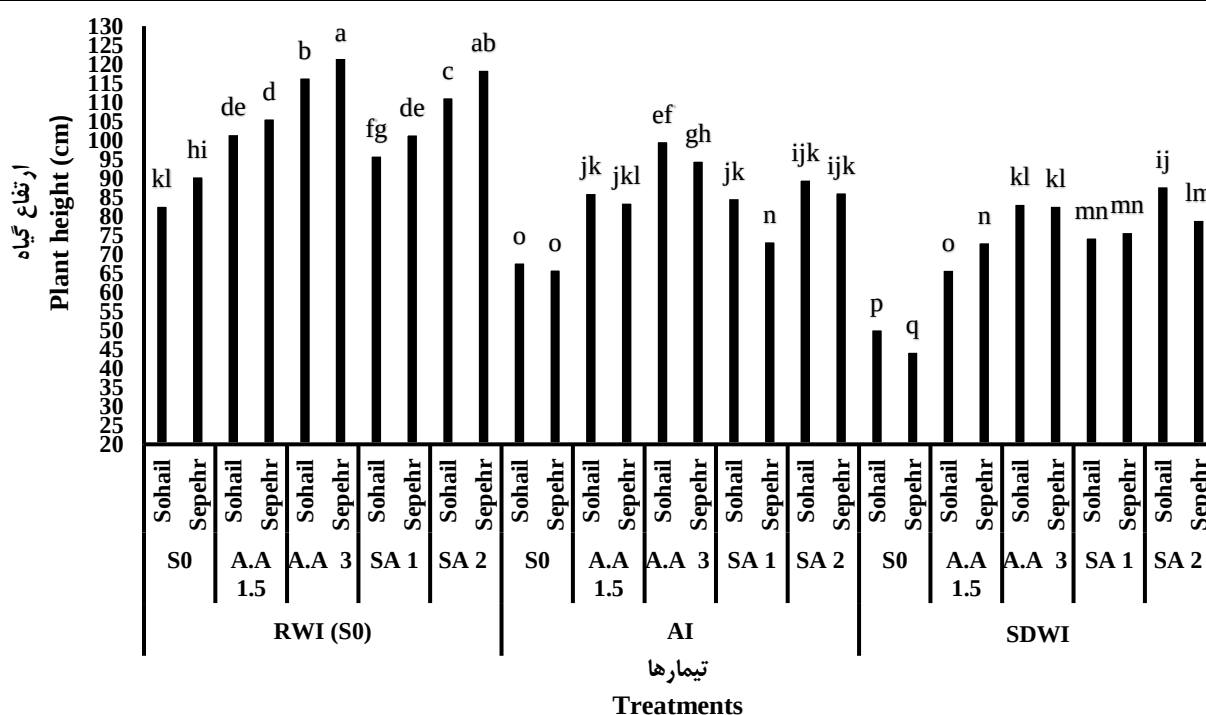
طی گزارشی، فیاض و همکاران (Fayaz et al., 2024) با بررسی تأثیر کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد در شرایط تنش بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا بیان کردند که کاربرد دو گرم

برای گیاه، این امکان را فراهم می‌سازد که گیاه در شرایط تنش انرژی خود را به‌جای ساخت آمینواسید در رشد و توسعه خود به کار برده و رشدونمو گیاه بهبود یابد (Li, Zheng, & Wu, 2021).

دانه و وزن هزار دانه و ارتفاع بوته را ناشی از اثر آن‌ها بر ساخت مواد نیتروژن‌دار غیرپروتئینی نسبت داده‌اند. پژوهشگران دیگری نیز اظهار داشتند که هرچند گیاهان می‌توانند اسیدهای آمینه تولید کنند، اما این سنتز فرآیندی انرژی‌بر است، لذا استفاده از آمینواسیدهای سنتز شده

جدول ۵ - میانگین خصوصیات تجزیه شیمیایی آب آبیاری طی دو سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲
Table 5- Average of chemical properties of irrigation water during 2022-2023

خواص شیمیایی Chemical properties	نسبت جذب سدیم SAR (meq l^{-1})	پتاسیم K^{+} (meq l^{-1})	منیزیم Mg^{+2} (meq l^{-1})	سدیم Na^{+} (meq l^{-1})	کلسیم Ca^{+2} (meq l^{-1})	کلر CL^{-1} (meq l^{-1})	بی‌کربنات HCO^{-3} (meq l^{-1})	کربنات CO_3^{+2} (meq l^{-1})	pH	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})
آب رودخانه کارون Karun River water	4.3	1.3	4.3	8.7	4.1	48.8	3.9	0	7	3.01
زهاب نیشکر Sugarcane drainage water	12.9	3.7	13.7	51.8	6.4	75.6	17.5	0	7.2	6.49



شکل ۱- مقایسه میانگین ارتفاع بوته در اثر متقابل منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در ارقام کاملینا در دو سال زراعی

Figure 1- Mean comparison of different water resources and foliar application effect in Cameline cultivars on plant height during two years

S0: بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، A.A 1.5: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت ۱/۵ در هکتار، A.A 3: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت سه لیتر در هکتار، SA 1: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، SA 2: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، RWI (S0): آبیاری با آب خام (شاهد)، AL: آبیاری به‌صورت تناوبی و SDWI: آبیاری با زهاب نیشکر

میانگین‌های دارای حروف مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار (دانش پنج درصد) می‌باشند

S0: Control, A.A 1.5: Amino acid foliar application 1.5 L ha⁻¹, A.A 3: Amino acid foliar application 3 L ha⁻¹, SA 1: Salicylic acid foliar application 1 millimolar, SA 2: Salicylic acid foliar application 2 millimolar, RWI (S0): River water irrigation (control), AL: Alternative irrigation, SDWI: Sugarcane drainage water irrigation

Means in each column and for each treatment, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range Test.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس میانگین میربات صفات در شرایط کاربرد منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای مختلف در برخی ارقام کامپینا در دو سال زراعی.

Table 6- Mean square analysis of traits under the conditions of using different water resource and foliar spray conditions on some Camellina cultivars during two years.										
منابع تغییرات	درج آزادی	عملکرد دانه	عملکرد زیستی	شاخص برداشت	ارتفاع بوته	طول کیسهول	تعداد دانه در کیسهول	تعداد کیسهول در بوته	1000-seed weight	وزن هزار دانه
S.O.V	d.f	Seed yielded	Biological yield	Harvest index	Plant height	Capsules length	Number of capsules	Number of capsules per plant		
سال	1	3146.5ns	4116ns	1.24ns	0.06ns	0.003ns	1.2ns	7.0ns	0.01ns	0.01ns
Year										
سال × بوک	6	3505.6ns	5911 ns	1.3ns	0.05ns	0.26ns	1.08ns	10.6ns	0.008ns	0.008ns
Block × year										
منابع آبی	2	67547913**	415168821**	202.2**	22209**	248.6**	260.11**	1015838**	0.03**	0.03**
Water resources (D)										
سال × منابع آبی	2	604.9ns	845.4ns	0.43ns	13.5ns	0.005ns	0.43ns	6.5ns	0.001ns	0.001ns
Year× water resources										
سال × منابع آبی × بوک	12	2330.9ns	1940ns	0.66ns	49.7ns	0.119	0.59ns	16.2ns	0.003ns	0.003ns
Block × water resources × year										
رقم	1	182988**	1584365 **	43 **	0.81ns	1.18**	17.60**	1606.**	0.03**	0.03**
Variety (V)										
رقم × سال	1	2413.0ns	320.2ns	0.43ns	16ns	0.008ns	0.5ns	2.604ns	0.01ns	0.01ns
Year × variety										
رقم × منابع آبی	2	1228588**	6308150.1**	200**	574.1**	12.0**	97.5**	29035**	0.03**	0.03**
Water resources × variety										
سال × رقم × منابع آبی	2	2100.6ns	6550.3ns	0.37ns	2.6ns	0.001ns	0.45ns	2ns	0.001ns	0.001ns
Year × water resources × variety										
کاربرد شاخساره ای	4	5545596.0**	26487596.2**	126 **	7611.5**	38.6**	175.69**	128636**	0.67**	0.67**
Foliar spraying (S)										
سال × کاربرد شاخساره ای	4	2824.3ns	3470.1ns	0.62ns	0.9ns	0.004ns	0.35ns	3ns	0.004ns	0.004ns
Year× foliar spraying										
کاربرد شاخساره ای × منابع آبی	8	1554484.9**	6409040.6**	32.81**	251.7**	6.42**	4.39**	17034780**	0.06**	0.06**
Water resources × foliar spraying										
کاربرد شاخساره ای × منابع آبی × سال	8	2129.0ns	4030.9ns	0.35ns	4.2ns	0.003ns	0.059ns	3.2ns	0.001ns	0.001ns
Year×water resources × foliar spraying										
رقم× کاربرد شاخساره ای	4	59368.8**	985980.1**	30.05**	41.2**	0.65**	0.43ns	4465.9**	0.03**	0.03**
Variety × foliar spraying										
رقم× کاربرد شاخساره ای × سال	4	433.4ns	894.6ns	0.13ns	9.6ns	0.003ns	0.63ns	4.39ns	0.003ns	0.003ns
Year × variety × foliar spraying										
رقم × کاربرد شاخساره ای × منابع آبی	8	86716.3**	409415.1**	29.13**	95.6**	0.77**	5.25**	2443**	0.023**	0.023**
Water resources × variety × foliar spraying										
سال × کاربرد شاخساره ای × منابع آبی × سال	8	557.8ns	655.5ns	0.19ns	1.6ns	0.002ns	0.38ns	3.702ns	0.002ns	0.002ns
Year× water resources × variety × foliar spraying										
ضریب تغییرات		9.4	6.9	7.6	5.4	7.0	6.0	5.8	4.9	4.9
CV (%)										

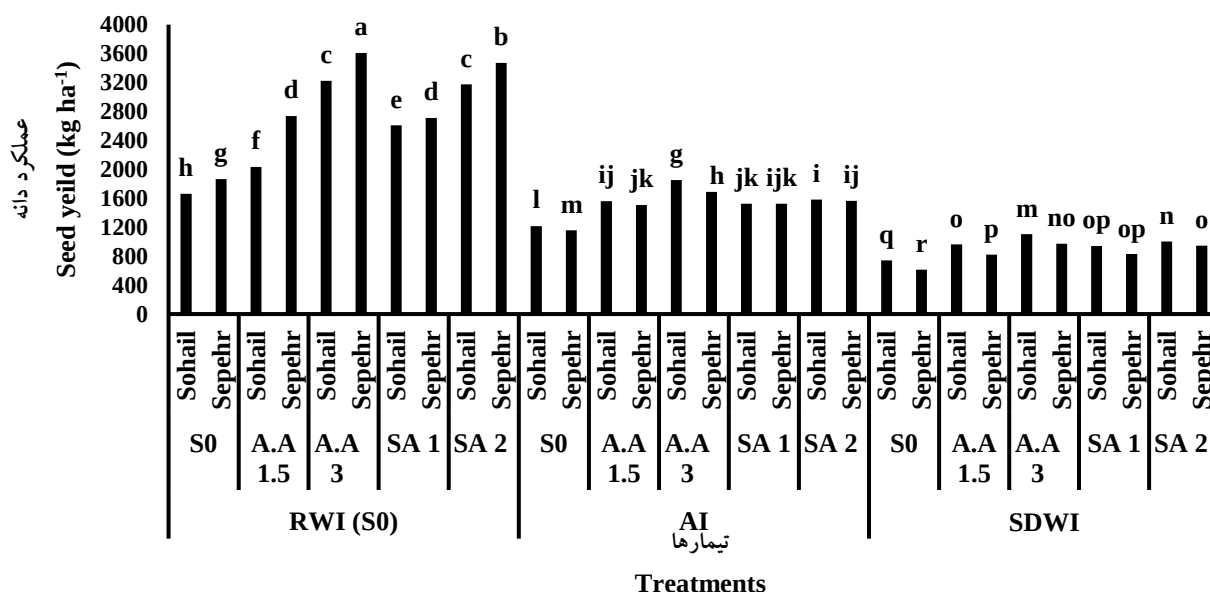
ns و *، ** از لحاظ آماری در سطح یک و پنج درصد دارای اختلاف آماری معنی دار و فاقد اختلاف آماری معنی دار هستند. **، * and ns: have significant differences at the 1 and 5 percent levels of probability, respectively, respectively. Ns: non-significant.

در پژوهشی، یانگ و همکاران (Yang et al., 2018) اثر شوری را بر عملکرد گیاه کینوا رقم Titicaca مورد بررسی قرار داد و نتایج نشان داد که اعمال تنش شوری منجر به کاهش معنی‌دار ارتفاع، وزن خشک اندام هوایی و عملکرد در سطح احتمال یک درصد شد. عظیمی و همکاران (Azimi, Daneshian, Sayfzadeh, & Zar, 2013) گزارش کردند که کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها باعث افزایش قابل توجه ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و عملکرد دانه گندم شد. نتایج رزمی و همکاران (Razmi, Ebadi, Daneeshian, & Jahanbakhsh, 2023) نشان داد که اثر تیمار آبیاری، ژنوتیپ‌های سویا و غلظت اسیدسالیسیلیک در مورد ارتفاع بوته از لحاظ آماری معنی‌دار بود و با افزایش دور آبیاری از سطح آبیاری ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر به سطح آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر و افزایش شدت تنش، ارتفاع بوته کاهش معنی‌داری یافت، اما کاربرد اسیدسالیسیلیک موجب بهبود صفات مانند عملکرد دانه، ارتفاع بوته به‌ویژه در ژنوتیپ ویلیامز شد که با نتایج این تحقیق هم‌راستا می‌باشد.

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که عملکرد دانه تیمار بدون زهاب (شاهد) با سایر تیمارها (کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد) در سطح یک درصد اختلاف معنی‌دار داشت (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌جانبه تیمارهای مورد آزمایش نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در دو سال آزمایش مربوط به آبیاری با آب رودخانه و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد سه لیتر در هکتار و رقم سپهر با میانگین عملکرد ۳۶۰۹ کیلوگرم در هکتار به دست آمد و کمترین عملکرد دانه نیز در آبیاری با زهاب نیشکر و بدون کاربرد شاخساره‌ای و رقم سپهر با میانگین عملکرد ۶۱۵ کیلوگرم در هکتار حاصل شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که در بین تیمارهای منابع آبی، آبیاری با آب رودخانه کارون بیشترین عملکرد دانه را در رقم سپهر با کاربرد شاخساره‌ای سه لیتر در هکتار آمینواسید حاصل کرد که نسبت به رقم سهیل در تیمار شاهد به‌میزان ۵۳ درصد برتری داشت. در تیمارهای شاهد آبیاری تناوبی و آبیاری با زهاب نیشکر، رقم سهیل به‌ترتیب ۵ و ۱۱ درصد عملکرد بالاتری نسبت به رقم سپهر داشت. همچنین ارقام مورد مطالعه با افزایش غلظت کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد در کلیه تیمارها از عملکرد دانه بالاتری برخوردار بودند. با توجه به اینکه زهاب مزارع نیشکر دارای مقدار شوری بیشتری نسبت به آب رودخانه کارون بود، لذا تنش شوری باعث کاهش عملکرد دانه کاملینا

شد که با نتایج سایر تحقیقات روی کلزا (Neysi et al., 2024) و گندم (Pasha, Alavifazel, Jafarnejadi, Lack, & Mojaddam, 2023) مطابقت داشت. وقتی گیاه در معرض تنش شوری قرار می‌گیرد، بر اثر کاهش پتانسیل اسمزی آب در خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی، ریشه دچار نوعی خشکی فیزیولوژیکی شده و ریشه‌ها تحت این شرایط، مقدار اسید آسزیک را افزایش داده که این هورمون از طریق جریان تعلق به اندام‌های هوایی منتقل شده و در اندام‌های هوایی سبب کاهش هدایت روزه‌ها و به‌دنبال آن کاهش تعلق می‌شود (Ghoalinezhad, Lalehgani, & Kazemi, 2023). نتایج دیگر تحقیقات نیز نشان دادند که با افزایش سطح تنش شوری، عملکرد و اجزای عملکرد دانه کاملینا کاهش معنی‌داری یافت که یافته‌های این پژوهش را تأیید می‌کنند (Gholamian, Ghamarnia, & Kahrizy, 2017). به نظر می‌رسد که اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد اثر تعدیل‌کنندگی بر اثرات منفی زهاب برای عملکرد دانه داشتند. در این رابطه، امام و پیرسته‌انوشه (Imam & Pirasteh Anousheh, 2014) با بررسی عملکرد و اجزای عملکرد جو تحت تأثیر غلظت‌های متفاوت محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک در شرایط شور بیان کردند که عملکرد دانه و عملکرد زیستی تحت تأثیر شوری کاهش معنی‌داری را در هر دو سال داشت، ولی اسیدسالیسیلیک در هر دو شرایط با و بدون تنش شوری موجب افزایش معنی‌دار این صفات گردید. این اثرات مثبت می‌تواند به بهبود اغلب ویژگی‌های بیوشیمیایی مانند کاهش خسارات اکسیداتیو در اثر شوری و یا فیزیولوژیک مانند بهبود ظرفیت فتوسنتزی و فعالیت روبیسکو در اثر کاربرد اسیدسالیسیلیک بیانجامد. این نتایج، تأثیر تعدیل‌کنندگی اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدها بر اثرات منفی تنش با زهاب را بر وزن هزار دانه، عملکرد دانه و بیولوژیک و سایر صفات نشان داد. این موضوع ممکن است به‌دلیل تأثیر اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدها بر کمبود تنظیم‌کننده‌های رشد تحت شرایط تنش و غیرتنش باشد، به‌نحوی که کاربرد شاخساره‌ای تنظیم‌کننده‌های رشد می‌تواند بر کمبود داخلی آن‌ها در اثر تنش غلبه کرده و بنابراین می‌تواند منجر به کاهش اثرات بازدارندگی تنش بر رشد گیاه گردد. بررسی واکنش لاین‌های ذرت (Zea mays) نشان داد که آمینواسیدها اثرات بیشتری بر پارامترهای رشدی ذرت مانند عملکرد دانه و عملکرد زیستی داشتند (Branko et al., 2020) که با نتایج سایر تحقیقات روی گیاه سویا (Razmi et al., 2023)، نیشکر (Badil, Barary, Shomeili, & Tahmasebi, 2016) و ذرت (Pouryousef & Shahravan, 2014) مطابقت داشت.



شکل ۲- مقایسه میانگین عملکرد دانه در اثر متقابل منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در ارقام کاملینا در دو سال زراعی

Figure 2- Mean comparison of different water resources and foliar applications effect in *Camelina* cultivars on seed yield during two years

S0: بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، A.A 1.5: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت ۱/۵ در هکتار، A.A 3: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت سه لیتر در هکتار، SA 1: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، SA 2: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، RWI (S0): آبیاری با آب خام (شاهد)، AL: آبیاری به‌صورت تناوبی، SDWI: آبیاری با زهاب نیشکر

میانگین‌های دارای حروف مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار (دانکن پنج درصد) می‌باشند.

S0: Control, A.A 1.5: Amino acid foliar application 1.5 L ha⁻¹, A.A 3: Amino acid foliar application 3 L ha⁻¹, SA 1: Salicylic acid foliar application 1 millimolar, SA 2: Salicylic acid foliar application 2 millimolar, RWI (S0): River water irrigation (control), AL: Alternative irrigation, SDWI: Sugarcane drainage water irrigation

Means in each column and for each treatment, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range Test.

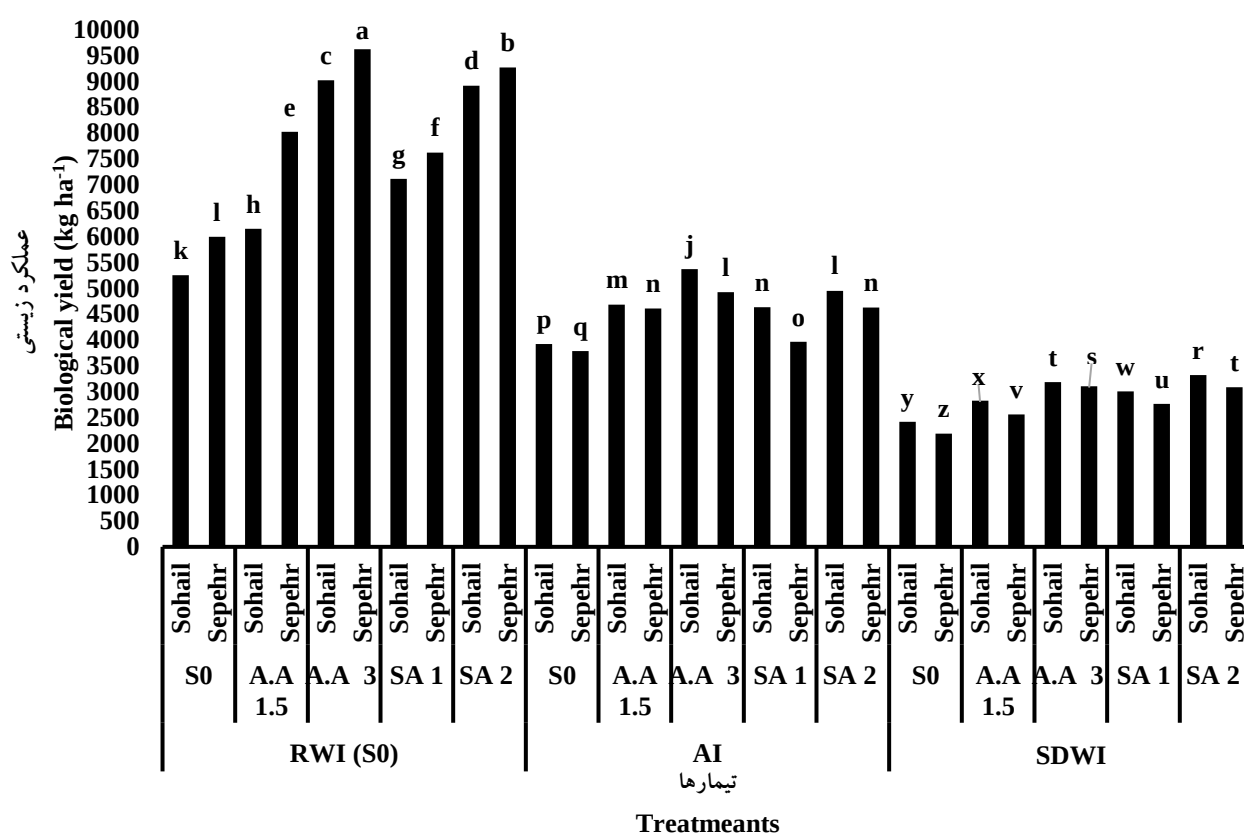
عملکرد زیستی

بالاتری داشت. در آبیاری تناوبی همراه با کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها به‌میزان سه لیتر در هکتار و اسیدسالیسیلیک دو میلی‌مولار، رقم سهیل به‌ترتیب ۲۹ و ۲۳ درصد نسبت به شاهد رقم سپهر عملکرد زیستی بالاتری داشت. عملکرد زیستی ارقام مورد مطالعه در کاربرد آب رودخانه کارون، با افزایش غلظت کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدها در تمامی تیمارها افزایش نشان داد. بررسی‌ها نشان داده است که آمینواسیدها پیش‌ساز فیتوهورمون‌ها و مواد رشدی گیاه بوده و کارایی متابولیسمی گیاه را افزایش می‌دهند، همچنین از دیگر قابلیت‌های آمینواسیدها می‌توان به توانایی آن‌ها در افزایش تحمل گیاه در شرایط تنش غیرزنده، تسهیل تولید مواد فتوسنتزی، تقویت فرایندهای مرتبط با تنفس، سنتز پروتئین و در نهایت تقویت رشد و افزایش عملکرد زیستی گیاه را نام برد (Radkowski & Radkowska, 2018). در پژوهشی دیگر تأثیر آمینواسید باعث بهبود عملکرد و ویژگی‌های کمی و کیفی تربچه (*Raphanus sativus*) شد، نتایج گویای تأثیر آمینواسید بر صفات

نتایج نشان داد که عملکرد زیستی شاهد بدون کاربرد زهاب با سایر تیمارها (کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد) در سطح یک درصد اختلاف معنی‌دار داشت (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل منابع آبی در کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسید چپ‌گرد در رقم نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد زیستی در هر دو سال آزمایش مربوط به آبیاری با آب رودخانه و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید چپ‌گرد سه لیتر در هکتار و رقم سپهر (۹۵۹۲ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد (شکل ۳). تنش شوری در بین تیمارها منابع آبی با آبیاری تناوبی و منبع آبیاری با زهاب نیشکر باعث کاهش عملکرد زیستی گردید که با نتایج گندم (Pasha et al., 2023) مطابقت داشت. در بین تیمارهای منابع آبی، با آبیاری آب رودخانه کارون با کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها به‌میزان سه لیتر در هکتار و اسیدسالیسیلیک دو میلی‌مولار رقم سپهر به‌ترتیب ۴۵ و ۳۵ درصد نسبت به شاهد رقم سهیل عملکرد زیستی

دانه می‌گردد (Kalaji, Govindjee, Bosa, Kościelniak, & Żuk-Golaszewska, 2011) کوچک زاده و همکاران (Koochekzadeh, Siahposh, Moradi-Telavat, & Shafiee, 2023) اثر تلقیح مایکوریزایی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک بر ویژگی‌های رشدی، عملکرد و کیفیت گیاه همیشه بهار (*Calendula officinalis*) تحت تنش شوری را بررسی و بیان کردند که محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک سبب افزایش ۳۶ درصدی عملکرد زیست توده نسبت به شاهد شد که با نتایج با این آزمایش مطابقت دارد.

مورد بررسی بود که پژوهشگران علت این تأثیر مثبت را اهمیت تغذیه برگ اسیدآمین به عنوان یک منبع مهم در سنتز پروتئین گیاهان عنوان کردند که در نهایت باعث افزایش عملکرد زیستی گیاه در شرایط تنش زیستی و غیرزیستی می‌گردد (Khoshvaghti & Tajbakhsh-Shishavan, 2022). شوری آب آبیاری سبب کاهش پتانسیل اسمزی محلول خاک و در نتیجه تغییر در بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه مانند فتوسنتز، کاهش مقدار کلروفیل‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش فعالیت روبیسکو شده که در نتیجه منجر به کاهش رشد گیاه، عملکرد زیستی و عملکرد و اجزای عملکرد



شکل ۳- مقایسه میانگین عملکرد زیستی در اثر متقابل منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در ارقام کاملینا در دو سال زراعی

Figure 3- Mean comparison of different water resources and foliar applications effect in *Camelina* cultivars on Biological yields during two years

S0: بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، A.A 1.5: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت ۱/۵ در هکتار، A.A 3: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت سه لیتر در هکتار، SA

1: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، SA 2: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، RWI (S0): آبیاری با آب خام (شاهد)،

AL: آبیاری به صورت تناوبی، SDWI: آبیاری با زهاب نیشکر

میانگین‌های دارای حروف مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار (دانکن پنج درصد) می‌باشند.

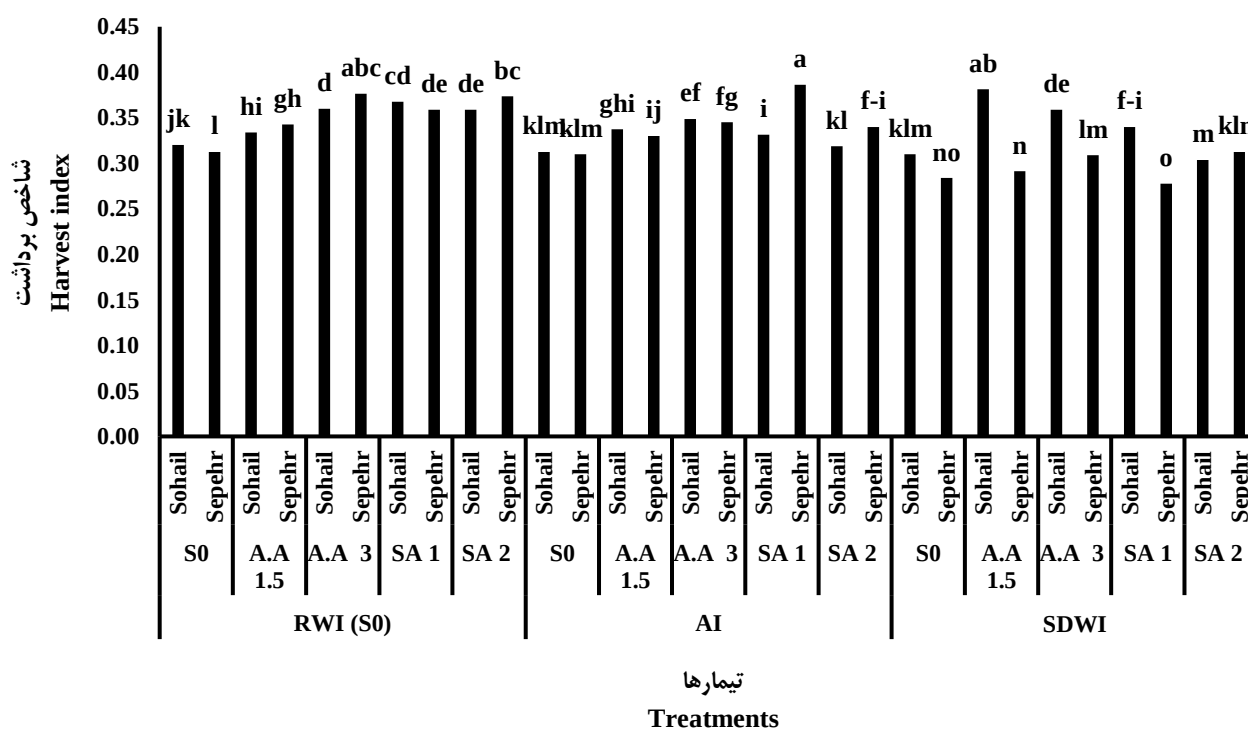
S0: Control, A.A 1.5: Amino acid foliar application 1.5 L ha⁻¹, A.A 3: Amino acid foliar application 3 L ha⁻¹, SA 1: Salicylic acid foliar application 1 millimolar, SA 2: Salicylic acid foliar application 2 millimolar, RWI (S0): River water irrigation (control), AL: Alternative irrigation, SDWI: Sugarcane drainage water irrigation

Means in each column and for each treatment, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range Test.

شاخص برداشت

شاخص برداشت شاهد بدون زهاب با سایر تیمارها (کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد) در سطح یک درصد اختلاف معنی‌دار داشت (جدول ۶). مقایسه میانگین اثرات متقابل منابع آبی در کاربرد شاخساره‌ای (شکل ۳) نشان داد که بیشترین شاخص برداشت هر دو سال آزمایش در آبیاری تناوبی در کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک یک میلی‌مولار در رقم سپهر (۳۸/۹ درصد) بود که با تیمار زهاب نیشکر و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد ۱/۵ لیتر هکتار تفاوت معنی‌داری نداشت.

کمترین میزان شاخص برداشت در تیمار زهاب نیشکر با کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک یک میلی‌مولار (۲۷/۸ درصد) حاصل شد که با زهاب نیشکر بدون کاربرد شاخساره‌ای در رقم سپهر تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۴). با افزایش شوری، مانند دیگر صفات، شاخص برداشت نیز کاهش یافت. گزارش شده است که صفات مربوط به عملکرد اقتصادی و شاخص برداشت گیاهان در شرایط تنش کاهش می‌یابد (Waraich, Rashid, Ahmad, Ahmad, & Ahmad, 2020; Shahsavari, 2019).



شکل ۴- مقایسه میانگین شاخص برداشت در اثر متقابل منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در ارقام کم‌لینا در دو سال زراعی

Figure 4- Mean comparison of different water resources and foliar applications effect in Camelina cultivars on harvest index during two years

S0: بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، A.A 1.5: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت ۱/۵ در هکتار، A.A 3: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت سه لیتر در هکتار، SA 1: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، SA 2: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، RWI (S0): آبیاری با آب خام (شاهد)،

AL: آبیاری به‌صورت تناوبی، SDWI: آبیاری با زهاب نیشکر

میانگین‌های دارای حروف مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار (دانکن پنج درصد) می‌باشند.

S0: Control, A.A 1.5: Amino acid foliar application 1.5 L ha⁻¹, A.A 3: Amino acid foliar application 3 L ha⁻¹, SA 1: Salicylic acid foliar application 1 millimolar, SA 2: Salicylic acid foliar application 2 millimolar, RWI (S0): River water irrigation (control), AL: Alternative irrigation, SDWI: Sugarcane drainage water irrigation

Means in each column and for each treatment, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range Test.

نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج مطالعات قبلی مبنی بر افزایش شاخص برداشت با کاربرد آمینواسید در گیاه گندم و عدس (*Lens culinaris*) مطابقت داشت (Heidarzadeh, Modarres-Sanavy, & Ebrahimi Esborezi, 2021; Haider et al., 2021). شاخص برداشت به عواملی نظیر طول دوره قبل و بعد از رشد دانه، ماده خشک و میانگین دما (از طریق تأثیر بر عملکرد دانه) بستگی دارد (Soltani, Torabi, & Zarei, 2005). در بیشتر تیمارها، شاخص برداشت با عملکرد بیولوژیکی رابطه نسبتاً معکوسی داشته و با افزایش عملکرد بیولوژیکی، شاخص برداشت کاهش پیدا کرده است که با نتایج سایر مطالعات روی گیاه کلزا (Neysi et al., 2024) مطابقت داشت.

تعداد کپسول در بوته

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که تعداد کپسول در بوته شاهد بدون زهاب با سایر تیمارها (کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد) در سطح یک درصد اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۶). مقایسه میانگین اثرات متقابل منابع آبی در کاربرد شاخساره‌ای نشان داد که بیشترین تعداد کپسول در بوته در هر دو سال آزمایش از تیمار آبیاری با آب کارون در کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد سه لیتر در هکتار در رقم سپهر با تعداد ۵۶۰/۶۲ کپسول حاصل شد (شکل ۵). ظرفیت مخزن‌های گیاه توسط تعداد دانه در کپسول مشخص می‌شود. هرچه تعداد دانه‌ها بیشتر باشند، تعداد مخزن‌ها برای ذخیره مواد پرورده تولیدشده بیشتر است و هر عاملی که این جزء را افزایش دهد باعث افزایش عملکرد نیز خواهد شد. بنابراین کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید و اسیدسالیسیلیک سطح سبز را افزایش داده و در ادامه باعث افزایش فتوسنتز گیاه شده که به‌نوبه خود در انتقال مواد فتوسنتزی و پر شدن دانه تأثیر مثبتی دارد. عملکرد دانه در کاملینا حاصل چندین جزء (تعداد دانه در کپسول، تعداد کپسول در بوته، وزن هزار دانه، تعداد بوته در مترمربع و وزن هزار دانه) می‌باشد و هر کدام از این اجزاء در مرحله خاصی از رشد گیاه شکل می‌گیرد و اهمیت نسبی آن‌ها در عملکرد دانه متفاوت است. در پژوهشی که قلی‌نژاد و همکاران (Ghoazinezhad et al., 2023) برای بررسی تأثیر کاربرد شاخساره‌ای با پلی‌آمین‌ها بر صفات رشدی و عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کاملینا در سطوح مختلف تنش شوری بر خصوصیات تعداد کپسول در بوته انجام دادند، گزارش شد که کاربرد شاخساره‌ای با اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین در مقایسه با عدم کاربرد شاخساره‌ای، تعداد کپسول در هر بوته را به ترتیب ۲۶، ۲۳ و ۲۴ درصد افزایش داد. در این آزمایش نیز کاربرد شاخساره‌ای با آمینواسیدهای

چپ‌گرد ۱/۵ لیتر در هکتار، آمینواسیدهای چپ‌گرد سه لیتر در هکتار، اسیدسالیسیلیک یک میلی‌مولار و اسیدسالیسیلیک دو میلی‌مولار در مقایسه با عدم کاربرد شاخساره‌ای تعداد کپسول در هر بوته را به ترتیب ۱۷، ۲۳، ۲۱ و ۲۲ درصد در آبیاری با آب کارون افزایش داد. در استفاده از زهاب نیشکر، تأثیر کاربرد شاخساره‌ای با آمینواسیدهای چپ‌گرد ۱/۵ لیتر در هکتار، آمینواسیدهای چپ‌گرد سه لیتر در هکتار، اسیدسالیسیلیک یک میلی‌مولار و اسیدسالیسیلیک دو میلی‌مولار در مقایسه با عدم کاربرد شاخساره‌ای، تعداد کپسول در هر بوته به ترتیب ۱۴، ۲۷، ۲۰ و ۲۸ درصد افزایش نشان داد. و همچنین در شرایط استفاده از آبیاری تناوبی، تأثیر کاربرد شاخساره‌ای با آمینواسیدهای چپ‌گرد ۱/۵ لیتر در هکتار، آمینواسیدهای چپ‌گرد سه لیتر در هکتار، اسیدسالیسیلیک یک میلی‌مولار و اسیدسالیسیلیک دو میلی‌مولار در مقایسه با عدم کاربرد شاخساره‌ای، تعداد کپسول در هر بوته را به ترتیب ۲۰، ۲۷، ۱۳ و ۲۲ درصد افزایش داد. در گزارشی دیگری، خان و همکاران (Khan, Shabian, Masood, Nazar, & Iqba, 2010) با کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک در باقلا (*Vicia faba*) تحت تنش شوری دریافتند که کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک تعداد غلاف را در بوته افزایش می‌دهد که با نتایج این آزمایش مطابقت داشت.

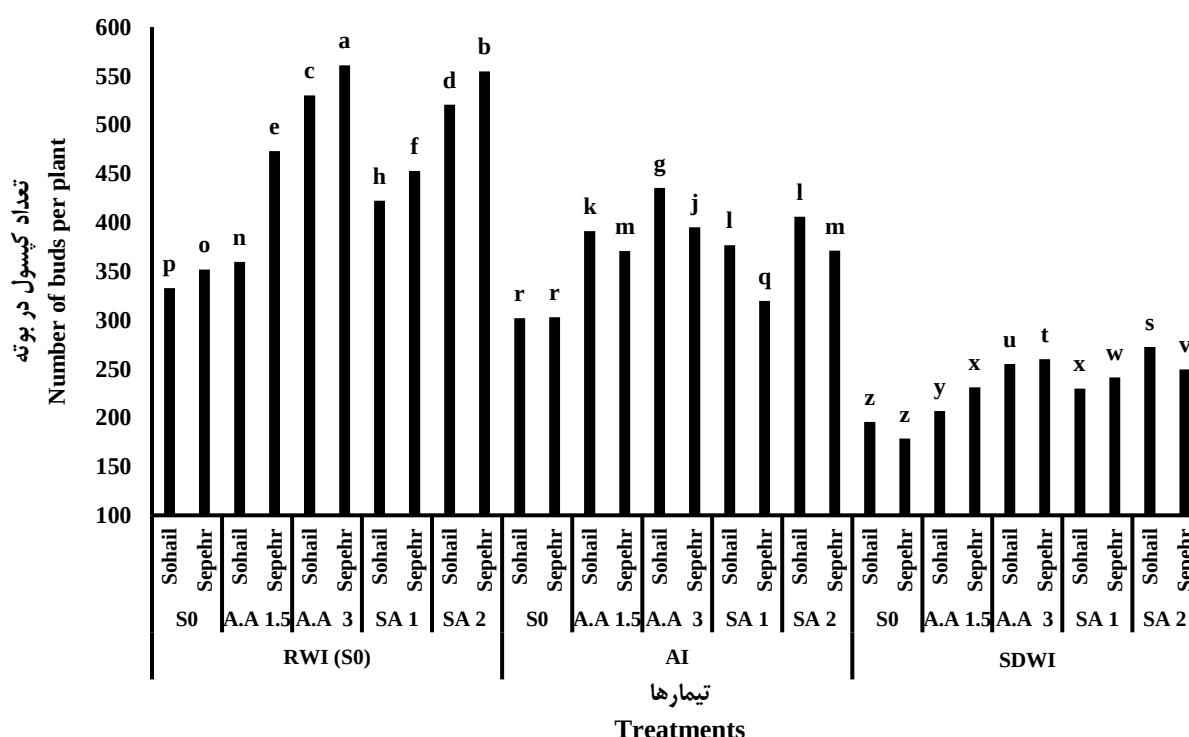
وزن هزار دانه

براساس نتایج به‌دست‌آمده، وزن هزار دانه شاهد بدون زهاب با سایر تیمارها (کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد) در سطح یک درصد اختلاف معنی‌دار داشت (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه تیمارهای مورد آزمایش نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه در دو سال آزمایش مربوط به آبیاری با آب رودخانه و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد سه لیتر در هکتار و رقم سپهر (۱/۷۳ گرم) به دست آمد (شکل ۶). کمترین وزن هزار دانه نیز در آبیاری تناوبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد ۱/۵ لیتر در هکتار در رقم سهیل (۱/۲۳ گرم) حاصل شد که البته با تیمارهای بدون کاربرد شاخساره‌ای و آبیاری با آب رودخانه هر رقم سهیل و سپهر تفاوت معنی‌داری نداشت. نتایج جمالی و انصاری (Jamali & Ansari, 2019)، روی رقم Titicaca گیاه کینوا نشان داد که استفاده از مدیریت‌های مختلف آب شور در آبیاری عملکرد دانه و وزن هزار دانه را به میزان ۲۰/۸ و ۲۰ درصد (آبیاری با آب شور در کل دوره رشدی گیاه)، ۱۴/۷ و ۱۳/۶ درصد (منابع آبی آبیاری اختلاط) و ۸/۱ و ۷/۷ درصد (منابع آبی آبیاری تناوبی) نسبت به آبیاری با آب چاه در آبیاری کاهش داد. وزن هزار دانه گیاه ذرت توسط اسیدسالیسیلیک و تحت شرایط بدون شوری افزایش یافت و

عملکرد دانه، وزن دانه و تعداد دانه توسط کاربرد اسیدسالیسیلیک در شرایط تنش شوری نسبت به شرایط بدون کاربرد اسیدسالیسیلیک افزایش یافت (Gunes et al., 2005). طبق نتایج فیاض و همکاران (Fayaz et al., 2024)، در همه سطوح آبیاری، کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد موجب بهبود وزن هزار دانه کلزا در شرایط تنش و غیرتنش شد که با نتایج این مطالعه هم‌خوانی داشت.

طول کپسول

نتایج نشان داد که صفت طول کپسول دارای تفاوت معنی‌داری



شکل ۵- مقایسه میانگین تعداد کپسول در بوته در اثر متقابل منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در ارقام کم‌لینا در دو سال زراعی

Figure 1- Mean comparison of different water resources and foliar applications effect in Camelina cultivars on number of buds per plant during two years

S0: بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، A.A 1.5: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت ۱/۵ در هکتار، A.A 3: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت سه لیتر در هکتار، SA

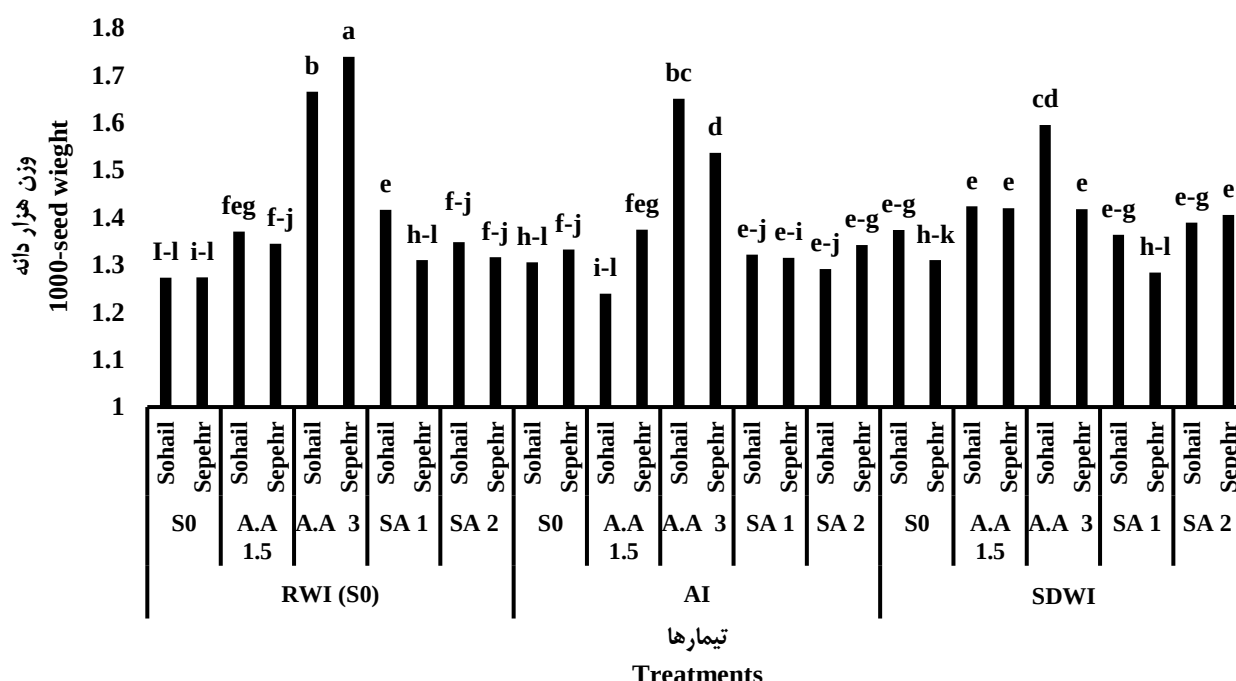
1: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، SA 2: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، RWI (S0): آبیاری با آب خام (شاهد)،

AL: آبیاری به‌صورت تناوبی، SDWI: آبیاری با زهاب نیشکر

میانگین‌های دارای حروف مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار (دانکن پنج درصد) می‌باشند.

S0: Control, A.A 1.5: Amino acid foliar application 1.5 L ha⁻¹, A.A 3: Amino acid foliar application 3 L ha⁻¹, SA 1: Salicylic acid foliar application 1 millimolar, SA 2: Salicylic acid foliar application 2 millimolar, RWI (S0): River water irrigation (control), AL: Alternative irrigation, SDWI: Sugarcane drainage water irrigation

Means in each column and for each treatment, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range Test.



شکل ۶- مقایسه میانگین وزن هزار دانه در اثر متقابل منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در ارقام کمینا در دو سال زراعی

Figure 5- Mean comparison of different water resources and foliar applications effect in Camelina cultivars on 1000 Seed weight during two years

S0: بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، A.A 1.5: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت ۱/۵ در هکتار، A.A 3: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت سه لیتر در هکتار، SA 1: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، SA 2: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، RWI (S0): آبیاری با آب خام (شاهد)، AL: آبیاری به‌صورت تناوبی، SDWI: آبیاری با زهاب نیشکر

میانگین‌های دارای حروف مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار (دانکن پنج درصد) می‌باشند.

S0: Control, A.A 1.5: Amino acid foliar application 1.5 L ha⁻¹, A.A 3: Amino acid foliar application 3 L ha⁻¹, SA 1: Salicylic acid foliar application 1 millimolar, SA 2: Salicylic acid foliar application 2 millimolar, RWI (S0): River water irrigation (control), AL: Alternative irrigation, SDWI: Sugarcane drainage water irrigation

Means in each column and for each treatment, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range Test.

می‌رسد که کاربرد شاخساره‌ای با آمینواسیدهای چپ‌گرد از طریق افزایش جذب عناصر غذایی به‌خصوص نیتروژن در گیاه موجب بهبود فرآیند فتوسنتز، افزایش سرعت انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی به دانه و متعاقب آن بهبود وزن دانه و طول کپسول و در نهایت افزایش اندازه گیاه و عملکردی تولیدی گردیده است (Colla et al., 2017). آشوری و همکاران (Ashouri, Fallah, Niknezhad, & Barari, 2023) طی مطالعه اثر کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدها بر ویژگی‌های رشد، عملکرد و ارزش غذایی در برنج (*Oryza sativa*) بیان کردند که کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید منجر به افزایش معنی‌دار طول خوشه برنج نسبت به شاهد شد. کاربرد شاخساره‌ای توأم آمینواسید متیونین و لیزین می‌تواند نقش مهمی در بهبود رشد، عملکرد و جذب عناصر غذایی در دانه برنج رقم

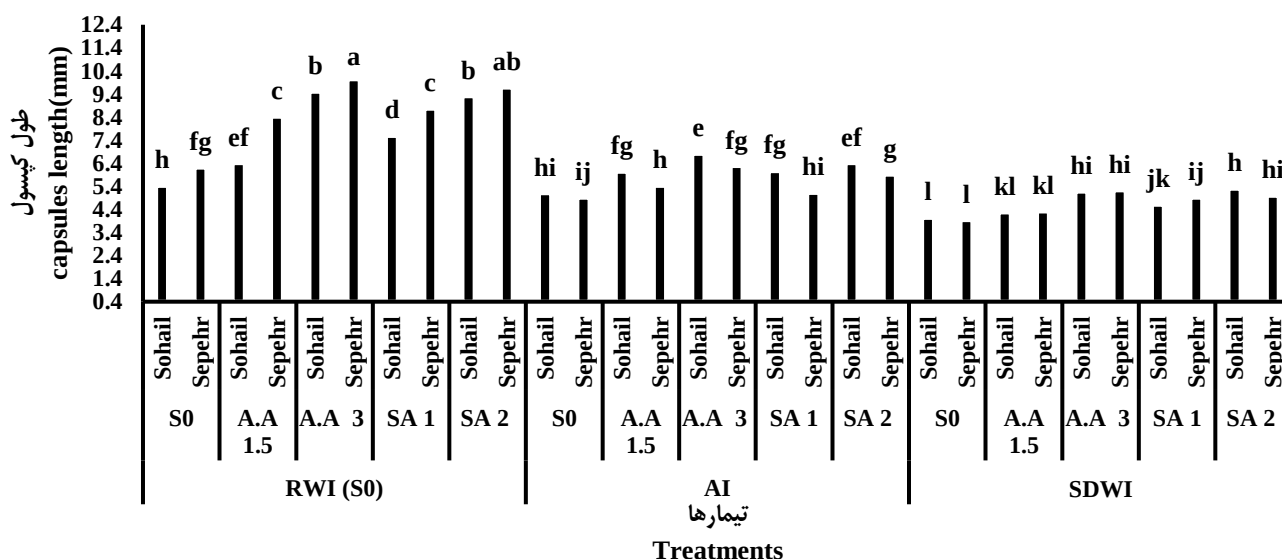
کاهش فتوسنتز و ارسال فرآورده‌های فتوسنتزی به کپسول‌ها در اثر تنش، مهم‌ترین عامل کاهش طول کپسول و در نتیجه عملکرد دانه است (Seyed Ahmadi, Bakhshandeh, & Garineh, 2015). سایر پژوهشگران در تحقیق خود گزارش‌های مشابهی را در این خصوص عنوان نمودند. این نتایج حاکی از آسیب‌پذیری عملکرد و اجزای عملکرد دانه به‌ویژه تحت شرایط تنش شوری می‌باشد. به نظر می‌رسد که شوری با تأثیرگذاری بر فرآیند فتوسنتز احتمالاً سبب کاهش قدرت منبع در این ارقام می‌شود که این امر در نهایت موجب کاهش تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در بوته، طول کپسول، ارتفاع بوته، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و وزن هزار دانه گردید که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. از طرفی دیگر با توجه به اینکه نیتروژن یکی از اجزای اصلی ساختار آمینواسیدهای چپ‌گرد می‌باشد، به نظر

لیتر در هکتار و رقم سپهر (۲۰/۸ عدد) حاصل شد (شکل ۸). کمترین تعداد دانه در کپسول نیز در دو سال تیمار در آبیاری با زهاب نیشکر و بدون کاربرد شاخساره‌ای و رقم سپهر (۱۰/۷ عدد) به دست آمد. نتایج سلوا و اوساما (Salwa, Hammad, Osama, & Ali, 2014) نشان داد که محلول‌پاشی آمینواسیدها در مواجهه با تنش باعث افزایش قابل توجه ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و عملکرد دانه شد. اختلال در متابولیسم کربوهیدرات‌ها به واسطه افزایش شوری که از کاهش غلظت قند برگ‌ها نتیجه می‌شود، می‌تواند به کاهش مقدار کربوهیدرات‌های قابل دسترس برای ارسال به اعضای ذخیره‌کننده منجر شده که در نتیجه، مقدار سقط جنین افزایش و تعداد دانه تشکیل شده کاهش می‌یابد. کاید نظامی و همکاران (Kayed Nezami, Balochi, & Yadavi, 2012) گزارش دادند که به نظر می‌رسد یکی از علل کاهش تعداد دانه در کپسول بر اثر شوری، کاهش اندازه کپسول‌ها باشد که با نتایج این پژوهش هم‌راستا بود.

هاشمی داشته باشد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که کاربرد شاخساره‌ای اسیدهای آمینه از طریق تحریک رشد گیاه و بهبود جذب آب و عناصر غذایی موجب افزایش عملکرد تولیدی گیاه مانند طول کپسول، تعداد دانه در کپسول و تعداد کپسول در بوته گردید که با نتایج مروچی و همکاران (Maroji, Zamani, Kafi, & Alizadeh, 2017) روی کلزا مطابقت داشت.

تعداد دانه در کپسول

نتایج تجزیه واریانس مرکب دو سال آزمایش نشان داد که صفات تعداد دانه در کپسول دارای تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد بین تیمارهای منابع آبی و آب آبیاری شاهد و سایر تیمارهای کاربرد شاخساره‌ای با اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد می‌باشد (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل منابع آبی در کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد نشان داد که بیشترین تعداد دانه در کپسول در هر دو سال آزمایش مربوط به آبیاری با آب رودخانه و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد سه



شکل ۷- مقایسه میانگین وزن هزار دانه در اثر متقابل منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در ارقام کمیلنا در دو سال زراعی

Figure 6- Mean comparison of different water resources and foliar applications effect in *Camelina* cultivars on capsules length during two years

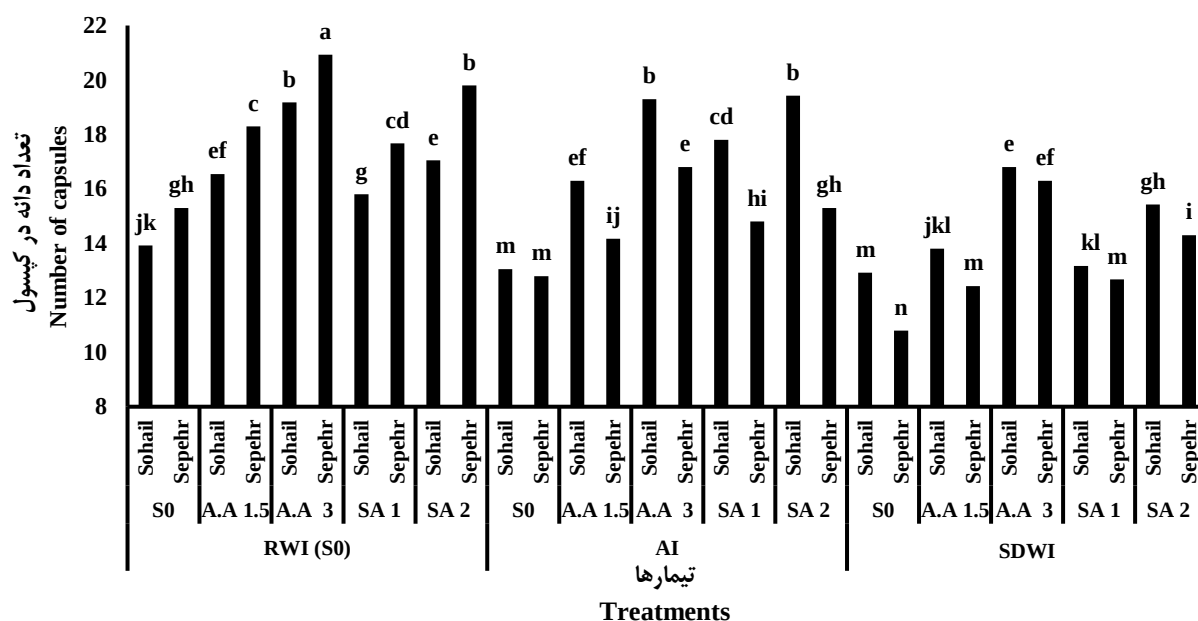
S0: بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، A.A 1.5: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت ۱/۵ در هکتار، A.A 3: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت سه لیتر در هکتار، SA 1: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، SA 2: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، RWI (S0): آبیاری با آب خام (شاهد)،

AL: آبیاری به صورت تناوبی، SDWI: آبیاری با زهاب نیشکر

میانگین‌های دارای حروف مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار (دانکن پنج درصد) می‌باشند.

S0: Control, A.A 1.5: Amino acid foliar application 1.5 L ha⁻¹, A.A 3: Amino acid foliar application 3 L ha⁻¹, SA 1: Salicylic acid foliar application 1 millimolar, SA 2: Salicylic acid foliar application 2 millimolar, RWI (S0): River water irrigation (control), AL: Alternative irrigation, SDWI: Sugarcane drainage water irrigation

Means in each column and for each treatment, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range Test.



شکل ۸- مقایسه میانگین تعداد دانه در کپسول در اثر متقابل منابع آبی و کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک در ارقام کملینا در دو سال زراعی

Figure 8- Mean comparison of different water resources and foliar applications effect in Camelina cultivars on capsules number during two years

S0: بدون کاربرد شاخساره‌ای (شاهد)، A.A 1.5: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت ۱/۵ در هکتار، A.A 3: کاربرد شاخساره‌ای آمینواسید با غلظت سه لیتر در هکتار، SA 1: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، SA 2: کاربرد شاخساره‌ای اسیدسالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، RWI (S0): آبیاری با آب خام (شاهد)، AL: آبیاری به‌صورت تناوبی، SDWI: آبیاری با زهاب نیشکر

میانگین‌های دارای حروف مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار (دانکن پنج درصد) می‌باشند.

S0: Control, A.A 1.5: Amino acid foliar application 1.5 L ha⁻¹, A.A 3: Amino acid foliar application 3 L ha⁻¹, SA 1: Salicylic acid foliar application 1 millimolar, SA 2: Salicylic acid foliar application 2 millimolar, RWI (S0): River water irrigation (control), AL: Alternative irrigation, SDWI: Sugarcane drainage water irrigation

Means in each column and for each treatment, followed by at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's Multiple Range Test.

جدول ۷- شاخص حساسیت به تنش ارقام مورد مطالعه

Table 7- Stress susceptibility index of studied varieties

ارقام مورد مطالعه	شاخص حساسیت به تنش (SSI)
Studied varieties	Stress susceptibility index
سپیل	0.27
Sohail	
سپهر	0.46
Sepehr	

روی ۱۹ رقم کلزا انجام دادند، عنوان کردند که شاخص حساسیت به تنش ارقام مورد مطالعه بین ۰/۳۷ تا ۱/۴۴ متغیر بود. در گزارش دیگری توسط (Neysi et al., 2024)، بررسی فیزیولوژیکی اثر زهاب مزارع نیشکر روی برخی از صفات کمی و کیفی ارقام کلزا گزارش کردند که رقم هایولا ۴۸۱۵ با شاخص حساسیت به تنش پایین‌تری نسبت به دو رقم دیگر، نشان داد که تحمل نسبی به استفاده از منبع نامتعارف زهاب مزارع نیشکر دارد.

شاخص حساسیت به تنش

رقم سپیل شاخص حساسیت به تنش پایین‌تری نسبت به رقم سپهر نشان داد که دارای تحمل نسبی به استفاده از منبع نامتعارف زهاب مزارع نیشکر است (جدول ۷). آنالقی و همکاران (Anaghli, Roust, & Azari, 2016) در آزمایشی که جهت انتخاب ارقام متحمل به شوری کلزا با استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش بر

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که در تمامی صفات، تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد بین تیمارهای منابع آبی و آب آبیاری شاهد و سایر تیمارهای کاربرد شاخساره‌ای با اسیدسالیسیلیک و آمینواسیدهای چپ‌گرد وجود داشت. کاربرد آبیاری تناوبی و زهاب نیشکر (تنش شوری) منجر به کاهش ارتفاع گیاه، تعداد کپسول و در نهایت عملکرد دانه نسبت به شاهد شد. رقم سهیل در شرایط کاربرد زهاب دارای بیشترین تعداد دانه در کپسول، کپسول در بوته، شاخص برداشت، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک بود. از طرف دیگر، کاربرد آمینواسیدهای چپ‌گرد به میزان سه لیتر در هکتار و اسیدسالیسیلیک با غلظت دو میلی‌مولار، در مرحله گل‌دهی نقش مهمی در رشد گیاه داشته است، به گونه‌ای که عملکرد دانه نسبت به شاهد در شرایط استفاده از آب رودخانه کارون به ترتیب ۴۸ و ۴۷ درصد افزایش نشان داد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که کاربرد شاخساره‌ای آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک، اثر مثبتی بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کاملینا داشته است. در بین تیمارهای منابع آبی، آبیاری با آب رودخانه کارون با کاربرد شاخساره‌ای سه لیتر در هکتار آمینواسید، بیشترین عملکرد دانه را در رقم سپهر به میزان ۵۳ درصد نسبت به رقم سهیل در تیمار شاهد نشان داد، ولی در شرایط استفاده از زهاب، رقم سپهر

عملکرد کمتری نسبت به رقم سهیل داشت. یافته‌های این مطالعه نشان داد که به نظر می‌رسد کاربرد برگی آمینواسیدهای چپ‌گرد و اسیدسالیسیلیک به عنوان تنظیم‌کننده‌های بالقوه برای افزایش رشدونمو کاملینا، از طریق افزایش جذب عناصر غذایی باعث تعدیل اثرات تنش شده و عملکرد دانه را بهبود می‌بخشد که اثبات آن نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتری دارد. عملکرد دانه در شرایط آبیاری با آب رودخانه در تیمارهای مورد استفاده به صورت معنی‌داری بیشتر از سایر روش‌های آبیاری بوده و کمترین میزان عملکرد در کاربرد زهاب نیشکر مشاهده شد، هرچند در این میان رقم سهیل در شرایط کاربرد زهاب نیشکر با آمینواسید سه لیتر در هکتار به میزان ۳۵ درصد نسبت به شرایط کاربرد زهاب بدون کاربرد آمینواسید (شاهد) رقم سپهر برتری نشان داد. در مجموع، به نظر می‌رسد که چنانچه هدف آبیاری با آب رودخانه کارون باشد، می‌توان از رقم سپهر بهره جست و چنانچه در زمان کمبود منابع آب آبیاری، هدف آبیاری با زهاب باشد بهتر است از رقم سهیل استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به جهت تأمین اعتبار لازم برای اجرای این طرح تشکر و قدردانی می‌نماید.

References

- Amiri-Darban, N., Nourmohammadi, G., Shirani Rad, A. H., Mirhadi, S. M. J., & Majidi Heravan, I. (2021). Evaluation of the response of physiological and seed and oil yields of camelina (*Camelina sativa* L. Crantz) to the application of ammonium and potassium sulfates under late-season drought stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(4), 87-99. (in Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22059/IJFCS.2020.308214.654746>.
- Anaghli, A., Rousta, M. J., & Azari, A. (2016). Selection of salt-tolerant rapeseed cultivars using indicators, *Arid Biome Scientific Journal*, 6(2), 1-9. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008790.1395.6.2.1.6>
- Arun, G., & Priyanka, T. (2021). Reuse of canal and drainage water in irrigation for wheat crop by using Hydrus 2D software - A case study. *Water and Energy International*, 63(12), 6-11.
- Ashour, E., Zeidan, B., & Elshemy, M. (2021). Assessment of agricultural drainage water reuse for irrigation in El-Behira Governorate, Egypt. *Water Science*, 35(1), 135-153. <https://doi.org/10.1080/23570008.2021.1982336>
- Ashouri, R., Fallah, H., Niknezhad, Y., & Barari Tari, D. (2023). Effect of application of plant growth promoting bacteria and amino acids foliar application on growth characteristics, yield, and nutritional value in rice (*Oryza sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(3), 333-346. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.81340.1230>
- Ashu, A., & Lee, S. (2018). Reuse of agriculture drainage water in a mixed land-use watershed. *Agronomy*, 9(6), 1-18. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010006>
- Azimi, M. S., Daneshian, J., Sayfzadeh, S., & Zare, S. (2013). Evaluation of amino acid and salicylic acid application on yield and growth of wheat under water deficit. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(8), 816-819. (in Persian with English abstract)
- Badil, F. C., Barary, M., Shomeili, M., & Tahmasebi, Z. (2016). Alleviation of salinity effects by exogenous applications of salicylic acid in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) seedlings. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 14(3), 449-459. (in Persian with English abstract).
- Bakhtavar, M. A., Afzal, I., Basra, S. M. A., Ahmad, A. U. H., & Noor, M. A. (2015). Physiological strategies to improve the performance of spring maize (*Zea mays* L.) planted under early and optimum sowing conditions. *PloS One*, 10, e0124441. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124441>.
- Branko, M., Simi, M., Dolijanovi, Z., Rajkovi, M., Mandi, V., & Dragicevi, V. (2020). The response of maize

- lines to foliar fertilizing. *Agriculture*, 10(9), 365-378. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090365>
11. Colla, G., Cardarelli, M., Bonini, P., & Rouphael, Y. (2017). Foliar applications of protein hydrolysate, plant and seaweed extracts increase yield but differentially modulate fruit quality of greenhouse tomato. *HortScience*, 52, 1214-1220. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12200-17>
12. El-Said, M. A. A., & Mahdy, A. Y. (2016). Response of two wheat cultivars to foliar application with amino acids under low levels of nitrogen fertilization. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 5(4), 462-472.
13. Fayaz, E., Sorooshzadeh, A., & Heidarzadeh, A. (2024). Effect of foliar application of amino acids under water deficit conditions during late-season on yield & yield components of oil rapeseed (*Brassica napus* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(1), 139-149. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2024.368145.655044>
14. Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897-912. <http://dx.doi.org/10.1071/AR9780897>
15. Fernandes, L. S., Galvao, A., Santos, R., & Monteiro, S. (2023). Impact of water reuse on agricultural practices and human health. *Environmental Research*, 216, 114762. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114762>
16. Gharechaei, N., Paknejad, F., Shirani Rad, A. H., Tohidloo, Gh., & Jabbari, H. (2019). Study of late season drought stress and planting date on some agronomic traits of advanced winter canola genotypes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1), 181-191. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2018.1208.1247>
17. Ghazi Manas, M., Banj Shafiee, S., Haj Seyed Hadi, M. R., & Darzi, M. T. (2013) Effects of vermicompost and nitrogen on quantitative and qualitative yield of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 29(2), 269–280. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2013.2855>
18. Gholinezhad, E., Lalehgani, B., & Kazemi, S. (2023). Evaluation of the effect of different levels of salinity stress and foliar spraying of spermine, spermidine and putrescine on seed yield and concentration of leaf and root nutrients in Camelina plant. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13(3), 1-24. <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2023.21074.2089>.
19. Gholamian, S. M., Ghamarnia, H., & Kahrizy, D. (2017). Effects of saline water on Camelina (*Camelina sativa*) yield in greenhouse condition. *Water and Irrigation Management*, 7(2), 333-348. <https://doi.org/10.22059/jwim.2018.248556.582>.
20. Grattan, S. R., Grieve, C. M., Poss, J. A., Robinson, P. H., Suarez, D. L., & Benesd, S. E. (2004). Evaluation of salt-tolerant forages for sequential water reuse systems: I. Biomass production. *Agricultural Water Management*, 70(2), 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.010>.
21. Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., Cicek, N., Guneri, E., Eraslan, F., & Guzelordu, T. (2005). Effects of exogenously applied salicylic acid on the induction of multiple stress tolerance and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 51, 687-695. <https://doi.org/10.1080/03650340500336075>.
22. Haider, I., Raza, M. A. S., Iqbal, R., Ahmad, S., Aslam, M. U., Israr, M., Riaz, U., Sarfraz, M., Abbas, N., Abbasi, S. H., & Abbas, Z. (2021). Alleviating the drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) by foliar application of amino acid and yeast. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 34(1), 239-246. <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2021/34.1.239.246>.
23. Hayat, S., Hasan, S. A., Fariduddin, Q., & Ahmad, A. (2008). Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. *Journal of Plant International*, 3, 297–304.
24. Heidarzadeh, A., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Ebrahimi Esborezi, H. (2021). Effect of priming and foliar application of different amino acids on yield and yield components of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in late sowing. *Iranian Journal Pulses Research*, 12(1), 88-99. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/IJPR.V12I1.83900>.
25. Hovezawi, S., Naseri, A. A., & Izdpanah, Z. (2016). The effect of sugarcane drainage irrigation on soil chemical properties. *Water and Irrigation Management*, 6(1), 117-132.
26. Imam, Y., & Pirasteh Anousheh, H. (2014). *The effect of salicylic acid priming on water absorption, germination and growth of barley seedlings under salt stress*. 13th Iranian Congress of Agriculture and Plant Breeding. Karaj. Iran. (in Persian).
27. Ismail, H., Maksimovic, J. D., Maksimovic, V., Shabala, L., Živanovic, B. D., Tian, Y., Jacobsen, S. E., & Shabala, S. (2016). Rutin, a flavonoid with antioxidant activity, improves plant salinity tolerance by regulating K⁺ retention and Na⁺ exclusion from leaf mesophyll in quinoa and broad beans. *Functional Plant Biology*, 43, 75–86. <https://doi.org/10.1071/FP15312>.
28. Jamali, S., & Ansari, H. (2019). Effects of water quality and irrigation management on growth and yield of quinoa. *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(3), 339-351. (in Persian with English abstract).
29. Jahanbakhsh, S., Khajoei-Nejad, Gh. R., Moradi, R., & Naghizadeh, M. (2021). Effect of planting date and salicylic acid on some quantitative and qualitative traits of quinoa as affected by drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(4), 1149-1167. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2313.1595>
30. Jorgensen, G. S., Solomon, K. H., & Cervinka, V. (1992). Agroforestry systems for on farm drain water

- management,” in Drainage and water table control: Proc. Sixth International Drainage. *American Society of Agricultural Engineers*, 484–490.
31. Kalaji, H. M., Govindjee, Bosa, K., Kościelniak, J., & Żuk-Golaszewska, K. (2011). Effects of salt stress on photosystem II efficiency and CO₂ assimilation of two Syrian barley landraces. *Journal of Environmental and Experimental Botany*, 73, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.10.009>
32. Kayed Nezami, R., Balochi, H. R., & Yadavi, A. R. (2012). The effect of salicylic acid foliar spraying on yield, yield components and some physiological traits of lentil cultivars under salt stress (*Lens culinaris*) Medik. *Iranian Legume Research*, 3(2), 97-110. (in Persian with English abstract).
33. Khairy, S., Shaban, M., Negm, A. M., Eldeen, O. W., & Ramadan, M. (2022). Drainage water reuse strategies: Case of El-Bats drain, Fayoum Governorate, Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101681. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101681>.
34. Khan, N. A., Shabian, S., Masood, A., Nazar, A., & Iqbal, N. (2010). Application of salicylic acid increases contents of nutrients and antioxidative metabolism in mungbean and alleviates adverse effects of salinity stress. *International Journal of Plant Biology*, 1, 1- 8. <https://doi.org/10.4081/pb.2010.e1>.
35. Khan, S., Yu, H., Li, Q., Gao, Y., Sallam, B. N., Wang, H., Liu, P., & Jiang, W. (2019). Exogenous application of amino acids improves the growth and yield of lettuce by enhancing photosynthetic assimilation and nutrient availability. *Agronomy*, 9(5), 266. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050266>
36. Khoshvaghti, H., & Tajbakhsh-Shishavan, M., (2022). The effect of foliar application of nano and amino acid fertilizers on some biochemical properties of grain and yield of corn. *To Agricultural Crops*, 24(1), 237-252. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2022.332347.2628>.
37. Klessig, D. F., Choi, H. W., & Dempsey, D. M. A. (2018). Systemic acquired resistance and salicylic acid: Past, present, and future. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 31(9), 871-888. <https://doi.org/10.1094/mpmi-03-18-0067-cr>
38. Koochekzadeh, A., Siahposh, A., Moradi-Telavat, M. R., & Shafiee, M., (2023). Effect of mycorrhizal inoculation and salicylic acid on growth characteristics, yield and quality of marigold under salinity stress. *Journal of Crops Improvement*, 25(4), 1133-1148. <https://doi.org/10.22059/jci.2023.344308.2719>.
39. Letey, J. (2005). Model describes sustainable long-term recycling of saline agricultural drainage water. *California Agriculture*, 57(1), 24-27.
40. Li, X., Zheng, S., & Wu, G. (2021). Nutrition and functions of amino acids in fish. Amino acids in nutrition and health: Amino acids in the nutrition of companion, zoo and farm animals. P.133-168 https://doi.org/10.1007/978-3-030-54462-1_8
41. Li, Y., & Sun, X. (2015). Camelina oil derivatives and adhesion properties. *Industrial Crops and Products*, 73, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.015>.
42. Maroji, S., & Zamani, G., & Kafi, M., & Alizadeh, Z. (2017) Effect of different levels of salinity on yield and yield components of spring rapeseed cultivars (*Brassica napus* L) and Indian mustard (*B. juncea* L). *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 10(3), 445-457. <https://doi.org/10.22077/escs.2017.302.1062>.
43. Martinelli, T., & Galasso, I. (2011). Phenological growth stages of *Camelina sativa* according to the extended BBCH scale. *Annals of applied Biology*, 158(1), 87-94. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00444.x>
44. Mohammadinejad, R., Bahramian, S., & Kahrizi, D. (2018). Evaluation of physicochemical properties, fatty acid composition and oxidative stability of *Camelina sativa* oil (DH 125). *Food Science and Technology*, 15(77), 261-269.
45. Mokhtaran, A., Tavoosi, M., Varjavand, P., & Sepehri Sadeghian, S. (2020). Investigation of the effects of sugarcane drainage water for *Quinoa* cultivation in Southern Khuzestan on crop yield and soil salinity and sodictiy changes. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(3), 337-354.
46. Neysi, K., Hassibi, P., Rahnama, A., Ghahfarokhi, A., & Bahadori, A. (2024). Physiological study of sugarcane fields drain water effect on some quantitative and qualitative traits of *Canola* cultivars. *Scientific Journal of Crop Plant Physiology, Islamic Azad University, Ahvaz*, 16(61), 47-64. <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1635-en.html>.
47. Pasha, S., Alavifazel, M., Jafarnejadi, A., Lack, Sh., & Mojaddam M. (2023). Effect of supplemental nutrition on yield, yield components, and grain protein and Zinc amount of wheat cultivars under drain water irrigation. *Scientific Journal of Crop Plant Physiology, Islamic Azad University, Ahvaz*, 15(58), 5-21. <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1331-en.html>.
48. Pouryousef Miandoab, M., & Shahravan, N. (2014). The effect of foliar spraying of amino acids at different times on corn yield and yield components. *Quarterly Scientific Research Journal of Crop Plant Physiology. Islamic Azad University, Ahvaz*, 6(23), 21-32. <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-378-en.html>
49. Putnik-Delic, M., Maksimovic, I., Zeremski, T., & Marjanovic-Jeromela, A. (2013). Effects of heavy metals on chemical composition of *Camelina sativa* L. *Agroзнanje*, 14(3), 377-384. <https://doi.org/10.7251/AGREN1303377P>
50. Qamarnia, H., Kahrizi, D., & Rostami Ahmadvandi, H. (2019). *Camelina: A Low-Risk and Adaptable Plant*. Razi University. Kermanshah, Iran. 120 pp.

51. Radkowski, A., & Radkowska, I. (2018). Influence of foliar fertilization with amino acid preparations on morphological traits and seed yield of timothy. *Plant Soil Environment*, 64, 209-213. <https://doi.org/10.17221/112/2018-PSE>
52. Rajabzadeh, F., & Pazira, E. (2022). Management of drainage waters from sugarcane cultivation in Khuzestan plain. *Water Management in Agriculture*, 9(1), 119-134. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24764531.1401.9.1.9.0>
53. Razmi, N., Ebadi, A., Daneeshian, J., & Jahanbakhsh, S. (2023). The effect of salicylic acid on some agrophysiological and biochemical traits of soybean genotypes under drought stress conditions. *Scientific Journal of Crop Plant Physiology, Islamic Azad University, Ahvaz*, 15(58), 61-81. <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1613-en.html>
54. Salwa, A., Hammad, R., Osama, A., & Ali, M., (2014). Physiological and biochemical studies on drought tolerance of wheat plants by application of amino acids and yeast extract. *Annals of Agricultural Science*, 59(1), 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2014.06.018>
55. Seyed Ahmadi, A., Bakhshandeh, A., & Garineh, M. H. (2015). Evaluation physiological characteristics and grain yield canola cultivars under end seasonal drought stress in weather condition of Ahvaz. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 13(1), 71-80. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/GSC.V13I1.48318>
56. Shahsavari, N. (2019). Effects of zeolite and zinc on quality of canola (*Brassica napus* L.) under late season drought stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(9), 1117-1122. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1604729>
57. Sharifipour, M., Liaqat, A., Naseri, A. A., Nozari, H., Hajishah, M., Zarshenas, M., Hoveyze, H., & Nasri, M. (2019). Management of wastewater in irrigation and drainage networks in southwestern Khuzestan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(2), 525-539. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2019.274004.668107>
58. Shekari, G., & Javanmardi, J. (2017). Effects of foliar application pure amino acid and amino acid containing fertilizer on broccoli (*Brassica oleracea* L. var. italica) transplant. *Advances in Crop Science and Technology*, 5, 280.
59. Soltani, A., Torabi, B., & Zarei, H. (2005). Modeling crop yield using a modified harvest index-based approach: Application in chickpea. *Field Crops Research*, 91, 273-285. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.07.016>
60. Teixeira, W. F., Fagan, E. B., Soares, L. H., Soares, J. N., Reichardt, K., & Neto, D. D. (2018). Seed and foliar application of amino acids improve variables of nitrogen metabolism and productivity in soybean crop. *Frontiers in Plant Science*, 9, 396. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00396>
61. Waraich, E. A., Rashid, F., Ahmad, Z., Ahmad, R., & Ahmad, M. (2020). Foliar applied potassium stimulate drought tolerance in canola under water deficit conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 43(13), 1923-1934. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1758132>
62. Yang, A., Akhtar, S. S., Iqbal, S., Qi, Z., Alandia, G., Saddiq, M. S., & Jacobsen, S. E. (2018). Saponin seed priming improves salt tolerance in quinoa. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204(1), 31-39. <https://doi.org/10.1111/jac.12229>
63. Yavas, I., & Unay, A. (2016). Effects of zinc and salicylic acid on wheat under drought stress. *JAPS: Journal of Animal and Plant Sciences*, 26(4), 1012-1018.
64. Yazar, A., Metin, S., Yeşim, B., Çiğdem, İ., & Servet, T. (2017). Effect of planting times and saline irrigation of Quinoa using drainage water on yield and yield components under the Mediterranean environmental conditions. *International Journal of Research International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 4(8), 8-16.
65. Zarei, Sh., Hassibi, P., Kahrizi, D., and Safieddin Ardebili, S. M. 2022. Effect of nitrogen application on camelina (*Camelina sativa*) oil seed yield and yield components at different planting dates. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(4), 311–325. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/JCESC.2021.37179.0>



Research Article

Vol. 23, No. 4, Winter 2025, p. 439-460

Effect of Iron Nano-Fertilizer on Grain Yield and Genotypic and Environmental Indices of Cowpea (*Vigna unguiculata* L.) GenotypesA. A. Ghanbari¹, H. Naghdi Badi^{1*}, A. A. Ghanbari², A. M. Naji¹

1- Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran

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

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

Received: 17 December 2024

Revised: 26 January 2025

Accepted: 11 March 2025

Available Online: 13 April 2025

Ghanbari, A. A., Naghdi Badi, H., Ghanbari, A. A., & Naji, A. M. (2025). Effect of Iron Nano-Fertilizer on Grain Yield and Genotypic and Environmental Indices of Cowpea (*Vigna unguiculata* L.) Genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 439-460. (In Persian with English abstract)<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.91244.1367>**Introduction**

Cowpea (*Vigna unguiculata* L.) is a valuable food legume from the Fabaceae family. This crop originated from West Africa (Nigeria) and was then transferred to the Middle East and Europe. Cowpea is suitable for cultivation in tropical regions. In addition to its multipurpose uses (green pods, dry seeds, animal feed), it also has high agronomic value. Despite breeding research worldwide to increase cowpea production, its yield is low in most growing regions. Therefore, to increase yield, agronomic management practices should be studied alongside breeding efforts. One of the key factors in farm management and improving the productivity of legumes, including cowpea, is the application of micronutrients, particularly iron.

Materials and Methods

In the present study, the responses of 12 cowpea lines (C1 to C12) along with the Mashhad cultivar to the application of iron nanofertilizer were investigated in four regions of Iran (Karaj, Dezful, Khomein and Shiraz). The experiments were conducted in a strip plot based on a randomized complete block design with three replications in 2023. Genotypes were placed in horizontal plots and treatments of using or not using iron nanofertilizer were placed in vertical plots. Some morphological traits including yield and yield components of genotypes were evaluated in different environments.

Results and Discussion

The results showed that the effects of location, nanofertilizer and genotype on all studied traits were significant. The interaction effect of location and nanofertilizer was significant on all traits except biomass, harvest index and 100-grain weight, but the interaction effect of location and genotype was significant on all traits except the number of grains per pod. The interaction effect of genotype and nanofertilizer was significant on all traits except plant height, biomass and grain yield. All traits, except the number of seeds per pod, were significantly affected by the three-way effect of location, genotype and nanofertilizer. Lines C4 and C5 were the earliest and the most late-maturing genotypes, respectively. The highest biomass yield of 3810 kg ha⁻¹ was related to the Mashhad cultivar, and the biomass yield in all lines was lower than that of the Mashhad cultivar. Plant height and number of branches per plant varied from 55.9-72.7 and 5.4-7.4, respectively. Only four lines, along with the Mashhad cultivar, had a grain harvest index higher than the average. The highest grain harvest index was related to C1 line (38.77%). All 13 genotypes studied responded positively to the use of iron nanofertilizer and had better growth compared to the conditions of no nanofertilizer use. The highest average



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

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.91244.1367>

percentage increase was related to the number of seeds per plant (27.25%). The use of iron nanofertilizer accelerated the maturity of the genotypes. In the absence of iron nanofertilizer, the number of pods per plant and the number of seeds per pod, and consequently the number of seeds per plant, were significantly lower than when iron nanofertilizer was applied. In line C11, although the values of these traits were lower than the average of the genotypes in the absence of iron nanofertilizer, it showed the greatest response to iron nanofertilizer application. Yield components (number of pods per plant, number of seeds per pod and 100-seed weight) showed a significant increase (17.4%, 8.8% and 3.2% respectively) under the influence of iron nanofertilizer application. Grain yield also increased by 10.8%. In accordance with our experimental results, it has been reported in various studies that the use of nanofertilizers significantly increases the yield of crop plants compared to treatments without the use of nanofertilizers. The main reason for this is the improvement of the growth of plant components and metabolic processes such as photosynthesis, which causes greater accumulation of photosynthetic products and their transport to the economic organs of the plant.

Conclusion

Based on the environmental index, the evaluated locations differed from each other. Accordingly, Dezful region had the highest value of environmental index. Line C1, along with lines C4 and C11, were the best genotypes. Although the use of iron nanofertilizers improved the growth and development of the studied genotypes, since there are limited reports on the biological consequences of nanofertilizer use and their absorption by plants, and numerous questions remain about the fate and behavior of nanomaterials in plants, the use of these types of fertilizers should be done with more caution.

Keywords: Harvest index, Line, Location, Maturity, Micronutrient, Nanomaterial

تأثیر نانوکود آهن بر عملکرد دانه و شاخص‌های ژنوتیپی و محیطی ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata* L.)

علی اصغر قنبری^۱، حسنعلی نقدی بادی^{۱*}، علی اکبر قنبری^۲، امیر محمد ناجی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

چکیده

با وجود تحقیقات به‌نژادی در سراسر جهان در رابطه با افزایش تولید محصول لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata* L.)، عملکرد این گیاه در اکثر مناطق کشت پایین است. بنابراین برای افزایش عملکرد در کنار فعالیت‌های به‌نژادی، باید در زمینه مدیریت زراعی بررسی‌های بیشتری صورت گیرد. یکی از عوامل مهم در مدیریت مزرعه و افزایش تولید حبوبات، استفاده از ریزمغذی‌ها به‌ویژه آهن است. در پژوهش حاضر، واکنش ۱۲ لاین به‌همراه رقم مشهد در چهار منطقه از ایران (کرج، دزفول، خمین و شیراز) نسبت به مصرف نانوکود آهن بررسی شد. برخی صفات ریخت‌شناختی و عملکرد و اجزای عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف ارزیابی گردید. طبق نتایج به‌دست‌آمده، مصرف نانوکود آهن باعث تسریع در رسیدگی ژنوتیپ‌ها شد. اجزای عملکرد (تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن ۱۰۰ دانه) تحت تأثیر مصرف نانوکود آهن افزایش قابل توجهی (به‌ترتیب ۱۷/۴، ۸/۸ و ۳/۲ درصد) نشان دادند. شاخص برداشت دانه، زیست‌توده و عملکرد دانه نیز به‌ترتیب ۷/۱، ۴/۷ و ۱۰/۴ درصد افزایش یافت. مناطق مورد ارزیابی از نظر شاخص محیطی با یکدیگر تفاوت داشتند. بر این اساس، منطقه دزفول بیشترین مقدار شاخص محیطی را داشت. از نظر شاخص ژنوتیپی، بیشترین مقدار مربوط به لاین C1 بود و بیشترین عملکرد را نسبت به میانگین مناطق داشت. این لاین به‌همراه لاین‌های C4 و C11، برترین ژنوتیپ‌ها در مناطق مورد بررسی بودند.

واژه‌های کلیدی: رسیدگی، ریزمغذی، شاخص برداشت، لاین، مکان، نانومواد

مقدمه

فرسایش خاک مؤثرند. مجموعه این ویژگی‌ها، حبوبات را از جنبه‌های زراعی، بوم‌شناختی و زیست‌محیطی در جایگاه ارزشمندی قرار داده است.

لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) یکی از حبوبات ارزشمند و از خانواده Fabaceae است که منشأ آن غرب آفریقا (نیجریه) بوده و از آنجا به خاورمیانه و اروپا منتقل شده است. این گیاه مناسب کشت در مناطق گرمسیر است و علاوه بر مصارف چندمنظوره (غلاف سبز، دانه خشک و تعلیف دام) دارای ارزش زراعی بالایی نیز می‌باشد (Xiong et al., 2016; Gerrano, Jansen van Rensburg, & Adebola, 2017). در سال ۲۰۲۲، سطح زیرکشت گیاه لوبیا چشم‌بلبلی در جهان ۱۵/۲ میلیون هکتار و تولید آن ۹/۷ میلیون تن با میانگین عملکرد ۶۴۳ کیلوگرم در هکتار بوده است (FAO, 2022). در آمارنامه‌های رسمی، سطح زیرکشت لوبیا چشم‌بلبلی در ایران در دسترس نیست، ولی مطابق گزارش‌های

حبوبات به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع گیاهی غنی از پروتئین، دومین منبع مهم غذایی انسان پس از غلات به‌شمار می‌روند. این گیاهان با داشتن قابلیت تثبیت زیستی نیتروژن، نقش مهمی در بهبود حاصلخیزی خاک دارند. حبوبات در تناوب با بسیاری از گیاهان زراعی، کشت می‌شوند و بدین ترتیب با تنوع‌بخشی به نظام‌های کشت مبتنی بر غلات، جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی پایدار به خود اختصاص داده‌اند. این گیاهان، کم‌توقع بوده و برای کشت در نظام‌های زراعی کم‌نهاد مناسب می‌باشند. هم‌چنین به‌صورت گیاهان پوششی، در جلوگیری از

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

۲- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، کرج، ایران

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: Naghdibadi@shahed.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.91244.1367>

شکل‌های مختلف است که می‌توان به فناوری نانو و نقش آن در افزایش کمی و کیفی محصولات اشاره کرد (Nongbet *et al.*, 2022). عرضه کودهای شیمیایی به شکل نانوذرات اخیراً مورد توجه قرار گرفته است و نتایج مطالعات موجود بیانگر واکنش متفاوت گونه‌ها و ارقام مختلف گیاهان به مواد غذایی تهیه شده به شکل نانو می‌باشد، به طوری که اثر نانوذرات بر گیاهان می‌تواند مفید (رشدونمو بیشتر جوانه) یا غیرمفید (ممانعت از رشد ریشه) باشد (Zhu, Han, & Jin, 2008). در آزمایشی، تأثیر نانوکود کلات آهن بر رشد و عملکرد دانه گیاه لوبیا چشم‌بلبلی بررسی شد و نتایج نشان داد که مصرف نانو کلات آهن باعث افزایش معنی‌دار تعداد شاخه فرعی، طول غلاف، عملکرد و اجزای عملکرد در مقایسه با تیمارهای عدم مصرف نانوکود شد (Khalaj, Baradaran Firouzabadi, & Delfani, 2020). در آزمایش دیگری که در گیاه سویا (*Glycine max* L. Merr.) انجام شد، استفاده از نانوکود آهن اثر معنی‌داری بر تعداد شاخه فرعی و وزن ۱۰۰ دانه نداشت، اما تأثیر معنی‌دار آن بر افزایش عملکرد مشاهده شد (Sheykhbaglou, Sedghi, Tajbakhsh Shishevan, & Sharifi, 2010). در مکزیك، واکنش گیاه لوبیا چشم‌بلبلی به مصرف سطوح مختلف نانوکود آهن بررسی شد و محققان نتیجه گرفتند که در غلظت ۲۵ میکرومول بر لیتر، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه افزایش معنی‌دار نسبت به عدم مصرف نانوکود داشتند، اما با افزایش غلظت نانوکود آهن، این صفات کاهش قابل توجهی نشان دادند و مقادیر آن‌ها در مقایسه با عدم مصرف نانوکود به‌طور معنی‌دار کمتر بود (Márquez-Quiroz *et al.*, 2015).

با وجود ضرورت توجه به تغذیه گیاهان با عناصر مغذی، عوامل مهم دیگری در رشدونمو آن‌ها تأثیرگذار هستند. هر محصولی حداکثر رشد و عملکرد خود را در مجموعه خاصی از شرایط محیطی دارد. در این میان، نه تنها محصولات بلکه ارقام مختلف یک محصول نیز تفاوت‌های زیادی را در سازگاری با محیط‌های مختلف نشان می‌دهند (Khajehpoor, 2000). بنابراین یکی از مشکلات مهم در توصیه ارقام زراعی، وجود برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط (GEI) است. این عامل می‌تواند موجب پنهان ماندن ارزش ژنوتیپی ارقام زراعی به دلیل وجود اثرات محیطی گردد (Cruz, Regazzi, & Carneiro, 2014). اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (GEI) از عوامل مؤثر بر میزان تولید محصولات کشاورزی است. هرچه میزان این اثر متقابل کمتر باشد، پایداری تولید بیشتر خواهد شد. وقتی ارقام در محیط‌های گوناگون با یکدیگر مقایسه می‌شوند، واکنش متفاوتی از خود نشان می‌دهند و این مسئله سبب می‌شود که نتوان برتری یکی را بر دیگری به‌طور کامل و در همه مناطق مشخص کرد. یک رقم ممکن است در یک محیط حداکثر عملکرد و در محیط‌های دیگر عملکرد ناچیزی داشته باشد. تغییرات در عملکرد نسبی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف به اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نسبت داده می‌شود (Farshadfar, 1998).

غیررسمی، سطح زیرکشت آن حدود ۱۷ هزار هکتار است و استان‌های اصلی تولیدکننده این گیاه شامل خوزستان، آذربایجان شرقی، جنوب کرمان و خراسان رضوی می‌باشند (Ghanbari, Dorri, Sheikh, Sekhavat, & Darvishi, 2018; Sekhavat, Ghanbari, & Mirzashahi, 2018).

لوبیا چشم‌بلبلی را می‌توان مانند لوبیا معمولی (یعنی دانه خشک) یا لوبیا سبز (برای غلاف‌های سبز) مصرف کرد. دانه‌ها، غلاف‌ها و برگ‌های لوبیا چشم‌بلبلی قابلیت فرآوری داشته و در صنایع غذایی استفاده می‌شوند (Abebe & Alemayehu, 2022). لوبیا چشم‌بلبلی منبع غنی از اسیدهای آمینه ضروری، پروتئین‌ها، مواد معدنی، ویتامین‌ها، ترکیبات پلی‌فنلی و آنتی‌اکسیدان‌ها است. اسیدآمینه موجود در دانه این گیاه مکمل غلات است و عناصر معدنی دانه آن شامل کلسیم و آهن بیشتر از گوشت، ماهی و تخم مرغ بوده و میزان آهن آن تقریباً برابر با شیر است (Alfa, Tijani, Omotoso, Junaidu, & Sezor, 2020).

لوبیا چشم‌بلبلی همانند سایر گیاهان لگوم به عناصر ریزمغذی نیاز وافر دارد. یکی از مهم‌ترین این عناصر، آهن است (Márquez-Quiroz, De-la-Cruz-Lázaro, Osorio-Osorio, & Sánchez-Chávez, 2015). آهن یکی از عناصر ضروری برای رشد گیاهان است و نقش مهمی در واکنش‌های فتوسنتزی ایفا می‌کند. آهن چندین آنزیم مختلف را در گیاهان فعال می‌کند و به سنتز RNA کمک کرده و عملکرد فتوسنتز گیاهی را بهبود می‌بخشد (Malakooti & Tehrani, 2005). این عنصر نقش مهمی در تغذیه و سلامتی انسان‌ها نیز دارد (Abbaspour, Hurrell, & Kelishadi, 2014) که بخش مهمی از آن از طریق تغذیه گیاهی حاصل می‌شود (Maphosa & Jideani, 2017; Valdes-Miramontes, Rodriguez-Macias, & Ruiz-Lopez, 2019; Hasanuzzaman & Fujita, 2022). برای کاربردهای خاکی، کودهای آهن بر پایه کلات آهن با لیگاندهای مصنوعی آمینو کربوکسیلات (مانند EDTA، DTPA، EDDHA، HEDTA) هستند که در حفظ آهن در محلول خاک، حتی در خاک‌های قلیایی، و در نتیجه افزایش فراهمی زیستی آن برای جذب توسط گیاه مؤثر هستند. با این وجود، کمپلکس‌های آهن-آمینو کربوکسیلات دارای محدودیت‌هایی هستند که به عنوان مثال به اثربخشی وابسته به pH، پایداری، ماندگاری در محیط و واکنش‌های تبادل لیگاند مربوط می‌شود (Zuluaga *et al.*, 2023).

استفاده از کودهای شیمیایی به دلیل اثرات مضر که بر محیط زیست و کیفیت غذا دارند، مورد نکوهش قرار گرفته است (Cui, Sun, Liu, Jiang & Gu, 2010)، بنابراین استفاده از فناوری‌های جدید در بهبود کیفیت محصولات کشاورزی در دهه‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته است. یکی از این موارد، کاربرد عناصر معدنی به

تنوع ژنتیکی ۱۰۰ ژنوتیپ لوبیا چشم‌بلبلی جنوب آفریقا، صفات زراعی و ریخت‌شناختی بررسی و مشخص شد که تعداد غلاف در بوته، طول غلاف و تعداد دانه در غلاف از مؤثرترین صفات در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه بودند (Nkhoma, Shimelis, & Laing, 2020).

از آنجاکه یکی از عوامل مهم در بهبود کمی و کیفی دانه لوبیا چشم‌بلبلی، تعیین پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیک ارقام و لاین‌های مختلف آن در مناطق تولید و واکنش آن‌ها به عوامل محیطی است، بنابراین آزمایش حاضر برای بررسی واکنش ژنوتیپ‌های مختلف لوبیا چشم‌بلبلی در مناطق مختلف تولید نسبت به مصرف نانوکود آهن انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در چهار منطقه از ایران (کرج، دزفول، خمین و شیراز) اجرا شد و طی آن ۱۲ لاین لوبیا چشم‌بلبلی (C1 تا C12) به همراه رقم مشهد به صورت کرت‌های نوار (اسپلیت استریپ پلات) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ کشت و مورد ارزیابی قرار گرفتند. لاین‌ها و رقم مشهد در کرت‌های افقی و مصرف یا عدم مصرف نانوکود آهن در کرت‌های عمودی بررسی شد. بذور ژنوتیپ‌های مورد بررسی (جدول ۱) در این آزمایش از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شدند.

بذور هر ژنوتیپ در چهار ردیف به طول پنج متر با فاصله روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر و فاصله بین خطوط ۷۵ سانتی‌متر در تاریخ کاشت مرسوم هر منطقه (جدول ۲) کشت شدند. براساس توصیه شرکت سازنده، نانوکود آهن (شرکت فناور نانو پژوهش مرکزی)، به مقدار سه گرم در هر کرتچه (دو کیلوگرم در هکتار) با آب آبیاری و قبل از گل‌دهی مصرف شد.

(Farshadfar & Sutka, 2006).

یکی از راه‌های ارزیابی تأثیر متقابل ژنوتیپ × محیط، انجام آزمایشات سازگاری و پایداری است. معمولاً به‌نژادگران ژنوتیپ‌هایی را انتخاب می‌کنند که عملکرد بالا و پایداری عملکرد بالاتری در همه سال‌ها و مکان‌ها دارند. یک ژنوتیپ زمانی پایدار است که عملکرد آن از میانگین عملکرد یک گروه از ژنوتیپ‌های استاندارد در محیط‌های مختلف انحراف نداشته باشد (Gancales, Bortoletto, Mellomartins, Costa, & Gallo, 2003).

پوراسماعیل و همکاران (Pouresmael, Saneinejad, Ghanbari, & Sekhvat, 2021) در بررسی ۵۶ ژنوتیپ از ژرم‌پلاسما لوبیا چشم‌بلبلی از بانک ژن گیاهی ملی ایران، تنوع قابل ملاحظه‌ای از نظر همه صفات مورد بررسی به‌ویژه عملکرد و اجزای آن بین ژنوتیپ‌ها مشاهده نمودند. صفات زیست‌توده، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، طول غلاف و وزن ۱۰۰ دانه، دارای بیشترین ضریب تغییرات فنوتیپی بودند. در آزمایشی چهار ساله که برای انتخاب لاین‌های برتر لوبیا چشم‌بلبلی در خوزستان انجام شد، هشت لاین که عملکرد نهایی بالاتری از توده محلی (شاهد) داشتند و بازارپسندی دانه آن‌ها نیز نسبت به سایر لاین‌ها برتر بود، انتخاب شدند (Sekhvat, 2006). در آزمایش چهار ساله دیگری، تعداد ۱۹۴ ژنوتیپ لوبیا چشم‌بلبلی از ۱۵ استان مختلف جمع‌آوری و صفات ریخت‌شناختی آن‌ها ارزیابی و ۶۲ ژنوتیپ با صفات مطلوب به‌عنوان ژنوتیپ برتر انتخاب شدند (Vaezi, 2010).

در بررسی ۲۱ لاین اصلاحی لوبیا چشم‌بلبلی مشخص شد که لاین‌ها از نظر دوره رسیدگی، اجزای عملکرد و عملکرد دانه متفاوت بودند (Aliyu & Makinde, 2016). در ارزیابی ۱۸ صفت ریخت‌شناختی و زراعی در ۲۸ ژنوتیپ لوبیا چشم‌بلبلی، اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها از نظر صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه و تعداد روز تا گل‌دهی گزارش شد (Hutchinson et al., 2017). در بررسی

جدول ۱- فهرست ژنوتیپ‌های مورد بررسی
Table 1- List of evaluated cowpea genotypes

کد ژنوتیپ	کد بانک ژن گیاهی ملی ایران	رنگ بذر
Genotype code	IR national plant gene bank code	Seed color
C1	TN-38-7013	Cream, Black-eyed
C2	TN-38-7158	Cream, Black-eyed
C3	TN-38-7162	Cream, Black-eyed
C4	TN-38-7248	Cream, Black-eyed
C5	TN-38-7265	Cream, Black-eyed
C6	TN-38-7281	Cream, Black-eyed
C7	TN-38-7284	Cream, Black-eyed
C8	TN-38-7285	Cream, Black-eyed
C9	TN-38-7290	Cream, Black-eyed
C10	TN-38-7292	Cream, Black-eyed
C11	TN-38-7296	Cream, Black-eyed
C12	TN-38-7309	Cream, Black-eyed
Mashhad	Traditional variety	Cream, Black-eyed

جدول ۲- ویژگی‌های مناطق مورد بررسی و زمان کشت ژنوتیپ‌ها
Table 2- Characteristics of four studied locations and sowing date of the genotypes

مکان Location	موقعیت جغرافیایی Geographical characteristics			برخی ویژگی‌های خاک Soil characteristics			وضعیت آب و هوایی Weather characteristics				زمان کشت Sowing date	
	طول Longitude	عرض Latitude	ارتفاع Altitude (m)	بافت خاک Soil texture	pH	آهن Fe (mg kg ⁻¹)	ماه Month	پیشینه دما Max temperature (°C)	کمینه دما Min temperature (°C)	میانگین دما Mean temperature (°C)		رطوبت نسبی Humidity (%)
کرج Karaj	50° 55'	35° 47'	1255	Clay loam	7.5	8.8	خرداد June	30.2	14.8	22.5	31.6	۱۱ خرداد June 1th
							تیر July	35.4	19.0	27.2	22.2	
							مرداد August	33.4	18.4	25.9	35.5	
							شهریور September	30.5	16.5	23.5	21.3	
دزفول Dezful	48° 30'	32° 24'	154	Loam clay	7.1	8.5	مرداد August	47.3	29.3	38.3	32.3	۱۱ مرداد August 2th
							شهریور September	43.7	25.0	34.3	37.1	
							مهر October	35.5	19.7	29.1	38.3	
							آبان November	29.5	16.4	23.0	64.8	
خمین Khomein	49° 57'	33° 39'	1885	Loam clay	7.2	8.3	خرداد June	38.7	13.3	25.8	11.6	۲۹ خرداد June 19th
							تیر July	39.6	16.6	27.5	19.6	
							مرداد August	35.8	14.9	25.3	20.0	
							شهریور September	34.7	11.0	22.4	16.6	
شیراز Shiraz	52° 41'	29° 47'	1596	Clay loam	7.9	5.2	تیر July	38.8	20.3	29.5	26	۷ تیر June 28th
							مرداد August	36.3	19.6	28.0	36	
							شهریور September	33.9	15.1	24.5	33	
							مهر October	30.2	10.6	20.4	34	

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. طبق نتایج، اثرات مکان، نانوکود و ژنوتیپ بر همه صفات مورد بررسی معنی‌دار بود. اثر متقابل مکان و نانوکود به‌جز در مورد صفات زیست‌توده، شاخص برداشت و وزن ۱۰۰ دانه برای سایر صفات معنی‌دار بود، اما اثر متقابل مکان و ژنوتیپ برای همه صفات به‌جز صفت تعداد دانه در غلاف معنی‌دار به دست آمد. اثر متقابل ژنوتیپ و نانوکود به‌جز ارتفاع بوته، زیست‌توده و عملکرد دانه بر همه صفات معنی‌دار بود. همه صفات به‌جز تعداد دانه در غلاف تحت تأثیر معنی‌دار اثر سه‌جانبه مکان، ژنوتیپ و نانوکود قرار گرفتند.

محققان توانایی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهی در جذب و مصرف عناصر غذایی را مورد بررسی قرار داده و اظهار داشتند که تفاوت کارایی آن‌ها در استفاده از عناصر غذایی به جذب ریشه‌ها، یا مصرف توسط گیاه و یا هر دو بستگی دارد و اهمیت نسبی هر کدام از آن‌ها بسته به نوع عنصر و نوع گونه گیاهی می‌تواند متفاوت باشد (Vaneckhaute et al., 2014).

همان‌طور که در نتایج آزمایش حاضر مشاهده می‌شود، همه لاین‌ها و رقم مشهد به مصرف نانوکود آهن واکنش مثبت داده و رشدونمو بهتری در این شرایط داشتند. البته برخی از ژنوتیپ‌ها پاسخ کمتری به افزایش دسترسی به آهن نشان دادند که به اعتقاد محققان (Tamuk et al., 2024) ممکن است منعکس‌کننده نیاز ذاتی کمتر آهن در این ژنوتیپ‌ها برای تکمیل چرخه زندگی آن‌ها باشد. در یافته‌های تحقیقاتی مختلف ثابت شده است که ژنوتیپ‌ها از نظر توانایی جذب و مصرف عناصر معدنی تفاوت زیادی دارند. این تفاوت‌ها، اهمیت زیادی در انتخاب یا اصلاح ارقام مناسب برای بهره‌وری بیشتر جذب و مصرف عناصر معدنی دارند (Dhaliwal et al., 2022).

میانگین صفات مورد بررسی در همه مکان‌ها و در شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. در مناطق مورد بررسی، لاین‌های C4 و C5 به‌ترتیب زودرس‌ترین و دیررس‌ترین ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط کودی بودند. زودرس‌ترین ژنوتیپ، لاین C3 با دوره رشد ۸۰/۳ روز در کرج و در شرایط مصرف نانوکود آهن بود. دیررس‌ترین ژنوتیپ، لاین C10 در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن با دوره رشد ۱۲۰ روز در منطقه خمین بود. بیشترین میانگین عملکرد زیست‌توده در مناطق با ۳۸۱۰ کیلوگرم در هکتار در رقم مشهد مشاهده شد و تولید ماده خشک (زیست‌توده) همه لاین‌ها کمتر از این رقم بود. لاین C10 در ذفول و در شرایط مصرف نانوکود آهن، با ۵۱۴۳ کیلوگرم در هکتار، بیشترین عملکرد را داشت. لاین C6 در شیراز و در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن،

مصرف کودهای شیمیایی ماکرو نیز براساس توصیه کودی (قبل از کشت به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم، ۷۰ کیلوگرم در هکتار پتاس و ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره) و مبارزه با آفات (سم دیازینون دو لیتر در هکتار برای مبارزه با شته، تریپس و زنجره) و علف‌های هرز (سم بازگران دو لیتر در هکتار برای مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ در مرحله دو برگ لوبیا و سم گالانت دو لیتر در هکتار برای مبارزه با علف‌های هرز باریک برگ دو روز پس از سم بازگران) انجام شد.

در اواخر مرحله پر شدن غلاف‌ها، از هر کرتچه با حذف اثر حاشیه‌ای، تعداد پنج بوته به‌طور تصادفی انتخاب و ارتفاع آن‌ها از سطح زمین برحسب سانتی‌متر و تعداد شاخه فرعی، شمارش و ثبت شد. برای این منظور، شاخه‌هایی با حداقل یک غلاف سالم لحاظ گردید. هم‌چنین شاخص برداشت دانه برحسب درصد و طبق روش فاگرا و سانتوس (Fageria & Santos, 2008) تعیین شد. در زمان رسیدگی و برداشت (زمانی که ۸۰ درصد غلاف‌ها زرد شده و دانه‌ها خشک بودند)، تعداد غلاف در بوته از شمارش غلاف‌های پنج بوته از هر کرتچه با حذف اثر حاشیه‌ای به‌طور تصادفی و تعداد دانه در غلاف از شمارش دانه‌های موجود در ۱۰ غلاف تعیین شد. برای تعیین وزن دانه، چهار نمونه ۱۰۰ عددی توزین و میانگین آن‌ها به‌عنوان وزن ۱۰۰ دانه ثبت شد. برای تعیین وزن اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی برحسب گرم در بوته تعیین گردید. برای این منظور، در زمان رسیدگی دانه پنج بوته از هر کرت برداشت شده و پس از خشک کردن در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت، میانگین وزن آن‌ها به‌عنوان وزن خشک اندام هوایی ثبت شد. برای تعیین عملکرد دانه هر تیمار، بوته‌های موجود در دو خط کاشت میانی هر کرتچه با رعایت اثر حاشیه‌ای برداشت و پس از کوبیدن و جداکردن دانه‌ها از غلاف‌ها، دانه‌ها (با رطوبت ۱۲ درصد) توزین و عملکرد برحسب کیلوگرم در هکتار ثبت شد. شاخص محیطی که نشان‌دهنده وضعیت محیط آزمایش می‌باشد، از تفاوت میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در هر مکان آزمایشی با میانگین کل عملکرد در مکان‌ها تعیین گردید. شاخص ژنوتیپی نیز که نشان‌دهنده وضعیت ژنوتیپ‌های آزمایش است، از تفاوت میانگین کل عملکرد ژنوتیپ با میانگین کل ژنوتیپ‌ها محاسبه و تعیین شد.

پس از جمع‌آوری داده‌ها، جهت اطمینان از صحت و دقت آن‌ها، آزمون‌های یکنواختی واریانس‌ها و نرمال بودن داده‌ها انجام شد. تجزیه واریانس ساده صفات برای هر منطقه به‌طور جداگانه انجام گردید. هم‌چنین داده‌های مربوط به صفات مختلف برای چهار منطقه مورد تجزیه واریانس مرکب قرار گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام و از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد برای مقایسه میانگین صفات استفاده شد.

است به فرار از خشکی کمک کند، درحالی که دیررسی به‌ویژه در ارقام رشد نامحدود ممکن است باعث بهبود جزئی پس از تنش و بازیابی توان رشدونمو گیاه گردد، اما زودرسی معمولاً با کاهش پتانسیل عملکرد رابطه دارد (Singh, 2007). طبق نتایج آزمایش ايقائی اسکوئی و همکاران (Ighaiee Oskoie, Ghanbari, & Mirhadi, 2018)، استفاده از نانوذرات آهن سبب افزایش دوره رشد رویشی گیاه لوبیا سبز (*Phaseolus vulgaris* L.) شد که این عامل می‌تواند موجب افزایش تولید ذخایر در گیاه و بهبود رشدونمو و عملکرد آن شود.

کمترین عملکرد زیست‌توده (۲۰۸۵ کیلوگرم در هکتار) را داشت. این لاین، بیشترین ارتفاع بوته را در کرج و در شرایط مصرف نانوکود آهن با ۱۱۵/۶ سانتی‌متر داشت. بیشترین و کمترین تعداد شاخه فرعی مربوط به لاین C12 به‌ترتیب در خمین (نه شاخه) و دزفول (دو شاخه) بود. از نظر این صفت، منطقه دزفول کمترین میانگین را در هر دو شرایط کودی داشت. میزان تغییرات (جدول ۷) صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی نشان داد که مصرف آهن باعث کاهش دوره رشد ژنوتیپ‌ها و زودرسی آن‌ها شد. بیشترین تأثیر بر زودرسی، مربوط به لاین‌های C10 و C5 بود. برخی محققان معتقدند که زودرسی ممکن

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات تعداد روز تا رسیدگی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، عملکرد زیست‌توده و شاخص برداشت ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در چهار مکان تحت شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن

Table 3- Analysis of variance of days to maturity, plant height, No. of branches per plant, biomass yield and harvest index (HI) of cowpea genotypes at four locations under two Fe conditions (use and non-use)

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares				
		تعداد روز تا رسیدگی Days to maturity	ارتفاع بوته Plant height	تعداد شاخه فرعی Branches per plant	عملکرد زیست‌توده Biomass yield	شاخص برداشت Harvest index
مکان Location (L)	3	1515.15 **	41482.17 **	120.29 **	16058090.03 **	1754.78 **
تکرار (مکان) Replication (L)	8	53.82	169.25	0.71	261280.45	12.11
نانوکود آهن Fe	1	980.15 **	1138.51 **	36.01 **	2061150.26 **	406.98 **
مکان×نانوکود آهن L×Fe	3	26.33 **	66.43 **	0.55 *	99738.62 ns	17.79 ns
تکرار (مکان×نانوکود آهن) Replication (L×Fe)	8	0.35	1.54	0.08	59043.34	5.26
ژنوتیپ Genotype (G)	12	224.56 **	552.93 **	6.73 **	953790.50 *	191.46 **
مکان×ژنوتیپ L×G	36	260.62 **	609.49 **	5.40 **	1824096.00 **	49.08 **
تکرار (مکان×ژنوتیپ) Replication (L×G)	96	42.66	46.23	1.06	404841.63	24.13
نانوکود آهن×ژنوتیپ Fe×G	12	2.26 **	3.17 ns	0.37 *	19980.49 ns	2.57 *
مکان×نانوکود آهن×ژنوتیپ L×Fe×G	36	2.99 **	3.86 *	0.27 *	27726.62 **	1.96 *
خطا Error	96	0.58	2.21	0.17	12846.1	1.26
ضریب تغییرات CV (%)		0.7	2.3	6.8	3.2	3.4

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

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

جدول ۴- تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در چهار مکان تحت شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن
Table 4- Analysis of variance of the yield and yield components of cowpea genotypes at four locations under two Fe conditions (use and non-use)

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares				
		تعداد غلاف در بوته Pods per plant	تعداد دانه در غلاف Seeds per pod	تعداد دانه در بوته Seeds per plant	وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight	عملکرد دانه Grain yield
مکان Location (L)	3	952.05 **	35.31 **	126924.7 **	1046.71 **	6715437.67 **
تکرار (مکان) Replication (L)	8	60.17	1.35	6606.9	2.32	48313.82
نانوکود آهن Fe	1	308.01 **	51.53 **	63446.7 **	28.64 **	1096836.54 **
مکان×نانوکود آهن L×Fe	3	8.92 **	2.70 **	451.48 *	0.34 ns	16055.59 ns
تکرار (مکان×نانوکود آهن) Replication (L×Fe)	8	0.19	0.32	94.78	0.13	12640.81
ژنوتیپ Genotype (G)	12	41.61 **	6.47 **	7091.53 **	25.69 **	451364.11 **
مکان×ژنوتیپ L×G	36	48.85 **	1.87 ns	5305.88 **	13.17 **	441509.39 **
تکرار (مکان×ژنوتیپ) Replication (L×G)	96	9.36	1.82	860.51	1.22	145159.27
نانوکود آهن×ژنوتیپ Fe×G	12	5.13 **	0.84 **	1110.32 **	1.14 **	3577.60 ns
مکان×نانوکود آهن×ژنوتیپ L×Fe×G	36	1.20 **	0.17 ns	95.69 *	0.17 *	4757.48 *
خطا Error	96	0.47	0.16	55.74	0.09	2657.25
ضریب تغییرات CV (%)		5.6	4.3	6.1	1.6	4.3

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

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

arietinum L. بیشترین تعداد شاخه فرعی و تعداد غلاف در بوته نخود دیم (لاین ILC482) تحت تأثیر مصرف سه در هزار نانوکود کلات آهن حاصل شد (Mir, Daneshvar, Nazarian, & Khosravi, 2016).

نتایج نشان داده است که ارتفاع بوته لوبیا چشم‌بلبلی با تولید ماده خشک ارتباط دارد. تأثیر مستقیم ارتفاع گیاه بر ماده خشک اندام هوایی مربوط به ماده خشک ساقه و شاخه است، به‌طوری‌که گیاهان بلندتر ماده خشک ساقه و شاخه‌های بیشتری دارند. افزایش ارتفاع بوته در اثر تیمار بذور با نانوذرات آهن احتمالاً به‌علت تأثیر بر رشد رویشی گیاه بوده و باعث افزایش تعداد گره‌های بوته شده و در نهایت باعث افزایش تعداد گیرنده‌های نوری و فتوسنتز بالاتر شده‌اند (Digrado et al., 2022).

مصرف نانوکود آهن به‌طور میانگین باعث افزایش ۶ و ۱۲ درصدی ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی در ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی شد (جدول ۵). تعداد شاخه در گیاه در گونه‌های مختلف حبوبات متفاوت است و به‌عنوان یک معیار مهم برای عملکرد دانه محسوب می‌شود. شاخه‌دهی در گیاه به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی به‌ویژه خصوصیات فیزیکی خاک و یا وضعیت آب خاک قرار می‌گیرد، بنابراین شرایط محیطی می‌تواند سهم شاخه‌ها را از عملکرد نهایی گیاه تغییر دهد (Khalaj et al., 2020). طبق نتایج تحقیقی که در گیاه لوبیا سبز انجام شد، استفاده از نانوکودها می‌تواند به توزیع بهتر شاخه‌های فرعی کمک نماید (Ighaiee Oskoie, 2018). در آزمایشی که روی گیاه سویا انجام شد، استفاده از نانواکسید آهن در غلظت‌های مختلف تأثیر معنی‌داری بر تعداد شاخه فرعی نداشت (Sheykhbaglou et al., 2010)، اما در گیاه نخود (*Cicer*

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در مناطق مورد بررسی تحت شرایط مصرف (+Fe) و عدم مصرف (-Fe) نانوکود آهن
Table 5- The means of evaluated traits of cowpea genotypes in the studied locations under two conditions of Nano-fertilization (-Fe, without iron; +Fe, with iron)

صفت Trait	مکان Location	نانوکود آهن Fe nano-fertilizer	ژنوتیپ Genotype												میانگین Mean	تغییر % Change	مقایسه LSD (5%)	حداقل تفاوت معنی‌دار
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad			
تعداد روز تا رسیدگی Days to maturity	کرج	-Fe	105.6	84.3	81.0	82.3	106.3	106.3	99.3	105.3	104.6	108.3	109.0	108.3	107.3	100.6		
	Karaj	+Fe	102.0	83.6	80.3	81.3	102.3	102.3	98.0	101.0	101.0	103.0	103.6	103.3	102.6	97.2	-3.3	
	دزفول	-Fe	105.0	103.0	103.6	94.0	104.3	104.0	103.6	104.3	103.6	105.0	102.3	100.3	99.3	102.4		
	Dezful	+Fe	101.0	99.3	100.6	92.0	100.0	100.3	100.6	100.6	100.6	101.3	99.0	97.6	97.3	99.2	-3.1	0.43
	خمین	-Fe	109.3	111.3	113.3	111.3	119.3	113.6	112.3	95.6	114.6	120.0	96.6	115.0	118.6	111.6	-4.6	
	Khomein	+Fe	105.0	106.0	107.0	105.6	112.3	107.6	107.3	94.3	108.3	113.0	95.3	109.3	112.6	106.4		
ارتفاع بوته Plant height (cm)	شیراز	-Fe	93.0	107.6	107.3	108.6	106.0	103.0	102.0	102.0	108.3	102.0	96.0	102.6	101.6	103.0	-2.3	
	Shiraz	+Fe	91.6	104.6	104.3	105.6	103.3	100.6	100.0	99.3	105.3	100.0	94.6	100.3	98.6	100.6		
	کرج	-Fe	99.6	73.6	80.0	53.6	106.6	107.0	106.6	89.6	102.6	99.3	105.0	99.6	113.0	95.0	6.6	
	Karaj	+Fe	108.3	82.6	89.3	61.6	114.0	115.6	110.0	95.3	105.3	106.0	111.6	103.6	115.6	101.4		
	دزفول	-Fe	54.0	45.0	42.3	43.3	56.6	47.3	52.6	46.6	49.0	50.0	52.3	54.0	50.0	49.4	7.2	0.85
	Dezful	+Fe	56.6	48.6	47.3	47.6	58.6	51.3	55.3	51.3	53.6	53.6	56.0	57.0	53.0	53.0		
تعداد شاخه فرعی Branches per plant	خمین	-Fe	58.0	56.0	67.6	76.0	59.3	81.3	46.6	50.0	54.3	51.0	48.3	57.3	53.3	58.3	3.4	
	Khomein	+Fe	60.3	58.6	68.6	76.6	60.3	81.0	50.6	54.0	56.6	53.3	50.0	60.0	55.0	60.3		
	شیراز	-Fe	50.6	43.6	44.0	41.6	51.0	48.6	44.0	56.0	40.3	46.6	44.3	48.3	51.0	46.9	6.9	
	Shiraz	+Fe	55.0	48.3	46.3	46.6	55.0	50.0	47.6	57.6	43.3	50.6	48.0	50.6	53.3	50.1		
	کرج	-Fe	5.6	5.6	4.6	3.6	4.6	4.6	5.6	4.3	5.3	3.0	4.6	3.6	6.0	4.6	15.9	
	Karaj	+Fe	6.3	6.0	5.3	4.0	6.0	6.0	6.6	4.3	6.0	4.3	5.3	4.3	6.3	5.4		
تعداد شاخه فرعی Branches per plant	دزفول	-Fe	7.6	4.6	3.3	6.3	4.6	3.3	4.3	4.3	4.0	5.0	4.0	2.0	3.3	4.3	20.6	0.23
	Dezful	+Fe	8.0	5.3	4.6	6.6	6.0	4.3	5.3	5.0	5.3	5.3	5.0	3.6	4.0	5.2		
	خمین	-Fe	8.3	5.0	6.0	5.0	7.0	5.6	6.0	7.0	7.6	8.3	8.3	8.0	7.0	6.8	8.5	
	Khomein	+Fe	8.3	6.3	7.0	6.0	7.3	7.0	6.3	7.3	8.3	8.3	8.3	9.0	7.3	7.4		
تعداد شاخه فرعی Branches per plant	شیراز	-Fe	7.0	6.0	6.3	7.0	7.0	6.0	7.6	7.0	6.3	7.3	7.3	6.3	7.0	6.7	7.2	
	Shiraz	+Fe	8.3	6.6	7.0	7.0	8.0	7.0	7.6	7.6	6.3	7.6	7.6	6.6	7.3	7.2		

ادامه جدول ۵- مقایسه میانگین صفات ژنوتیپ های لوبیا چشم بلبلی در مناطق مورد بررسی تحت شرایط مصرف (+Fe) و عدم مصرف (-Fe) نانو کود آهن
Table 5- The means of evaluated traits of cowpea genotypes in the studied locations under two conditions of Nano-fertilization (-Fe, without iron; +Fe, with iron), continued

صفت Trait	مکان Location	نانو کود آهن Fe nano-fertilizer	ژنوتیپ Genotype												میانگین Mean	درصد تغییر % Change	میانگین تفاوت معنی دار LSD (5%)
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad		
عملکرد زیست توده Biomass yield (kg ha ⁻¹)	کرج	-Fe	3362	4621	3875	3297	3765	2888	4211	3186	2566	3123	2477	3261	3915	3426	5.7
	Karaj	+Fe	3516	4783	4100	3533	3866	3076	4316	3390	2850	3366	2850	3450	4016	3624	
	دزفول	-Fe	3352	2844	2208	4002	4035	3543	3680	3844	4038	5093	4976	4252	3920	3831	3.8
	Dezful	+Fe	3456	3352	2650	3940	4200	3630	3660	3950	4250	5143	4923	4316	4233	3977	
	خمین	-Fe	3458	4031	3110	3768	3648	4070	3865	3330	3993	3643	3433	3293	3893	3656	1.9
	Khomein	+Fe	3550	3983	3183	3766	3730	4033	3906	3500	4050	3800	3566	3356	4033	3727	
شاخص برداشت Harvest index (%)	شیراز	-Fe	3490	2915	2874	3037	2941	2085	2658	2618	2251	2175	2894	2499	3134	2736	8.6
	Shiraz	+Fe	3523	3033	3053	3093	3166	2650	2883	2960	2483	2716	3066	2683	3333	2972	
	کرج	-Fe	34.4	31.7	25.9	29.6	27.8	24.3	28.3	25.1	24.6	27.3	25.2	22.6	26.3	27.1	5.6
	Karaj	+Fe	35.0	31.3	27.2	31.5	28.8	25.4	29.1	27.4	26.8	29.1	30.0	24.6	27.0	28.7	
	دزفول	-Fe	39.5	29.2	25.0	40.3	35.6	30.4	38.0	36.3	36.6	39.6	43.5	40.0	36.3	36.1	5.9
	Dezful	+Fe	42.0	31.6	30.8	41.5	37.8	36.2	39.0	37.7	38.3	41.3	45.1	40.2	36.9	38.3	
0.64	خمین	-Fe	39.2	36.9	31.9	40.3	32.9	36.1	37.8	32.5	37.1	35.6	36.1	33.1	37.0	35.8	5.6
	Khomein	+Fe	42.2	39.5	33.9	42.9	35.1	38.4	39.2	34.8	38.2	37.1	39.2	34.7	37.6	37.9	
	شیراز	-Fe	37.4	28.0	26.5	33.9	28.0	19.8	29.7	26.5	23.9	23.6	33.3	25.0	33.7	28.4	12.9
	Shiraz	+Fe	40.2	31.2	29.9	36.1	31.3	26.4	33.9	31.2	28.8	27.7	36.7	28.5	35.2	32.0	

برداشت، پتانسیل عملکرد بالا را تنها در محیطی که برای آن انتخاب شده است، تضمین کند. این موضوع ممکن است لزوماً به انعطاف‌پذیری عملکرد در هر دو شرایط نرمال و تنش‌زا منجر نشود. شاخص برداشت ممکن است به‌عنوان معیاری استفاده شود تا نشان دهد که می‌توان اقدامات بیشتری برای بهبود عملکرد انجام داد، اما برهم‌کنش بین شاخص برداشت و تغییرات محیطی پیچیده بوده و ممکن است براساس آن نتوان با عملکرد کل ارتباط برقرار کرد. به‌طور کلی، افزایش شاخص برداشت توسط هر دو عامل منبع و مقصد محدود می‌شود. از نظر تئوری، شاخص برداشت دارای یک حداکثر است و افزایش بیش از این، نیاز به زیست‌توده اندام هوایی بیشتری دارد (Smith, Rao, & Merchant, 2018).

به اعتقاد محققان، ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود آهن، محتوای آهن بیشتری را نشان می‌دهند که منجر به بهبود رشد ریشه و افزایش عملکرد ماده خشک گیاه در شرایط آهن کم می‌شود (Nogiya, Pandey, & Singh, 2016; Mishra et al., 2020). آهن نقش کلیدی در تشکیل کلروفیل و فتوسنتز داشته و از اهمیت زیادی در سیستم آنزیمی و تنفس گیاهان برخوردار می‌باشد، بنابراین کاربرد آن اثر مثبت بر تولید ماده خشک گیاه خواهد داشت (Briat, Curie, & Gaymard, 2007). نتایج آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد که ماده خشک بالا، محتوای ماده آلی خاک را به‌نفع محصول بعدی تناوب افزایش می‌دهد. در میان ژنوتیپ‌ها، رقم مشهد ماده خشک بیشتری تولید کرد. این موضوع می‌تواند به کشاورزان در بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک در صورت انتخاب برای استفاده در سیستم‌های تناوب کمک کند (Simunji, Munyinda, Lungu, & Mweetwa, 2019).

همان‌طور که در جداول ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، لاین C4 از نظر تعداد غلاف در بوته، در وضعیت بهتری نسبت به سایر لاین‌ها و رقم مشهد قرار دارد، اگرچه وزن ۱۰۰ دانه آن نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط کودی و در میانگین مناطق مورد بررسی کمتر است. عملکرد دانه این لاین در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن، با میانگین ۱۲۹۶ کیلوگرم در هکتار، در رتبه اول قرار دارد. در مجموع مناطق مورد بررسی، تنها دو لاین C4 و C11 از نظر تعداد غلاف در بوته، در شرایط مصرف نانوکود آهن نسبت به رقم مشهد برتری داشتند، اما در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن، تعداد غلاف در بوته همه لاین‌ها کمتر از رقم مشهد بود. منطقه دزفول از نظر این صفت برتری قابل توجهی نسبت به سایر مناطق داشت و در هر دو شرایط کودی بیشترین تعداد غلاف در بوته مربوط به این لاین بود. لاین C8 در منطقه خمین و در مجموع مناطق کمترین تعداد غلاف در بوته را نشان داد. در مجموع مناطق مورد بررسی، مصرف نانوکود آهن باعث افزایش ۱۷/۳ درصدی تعداد غلاف در بوته شد. بیشترین واکنش

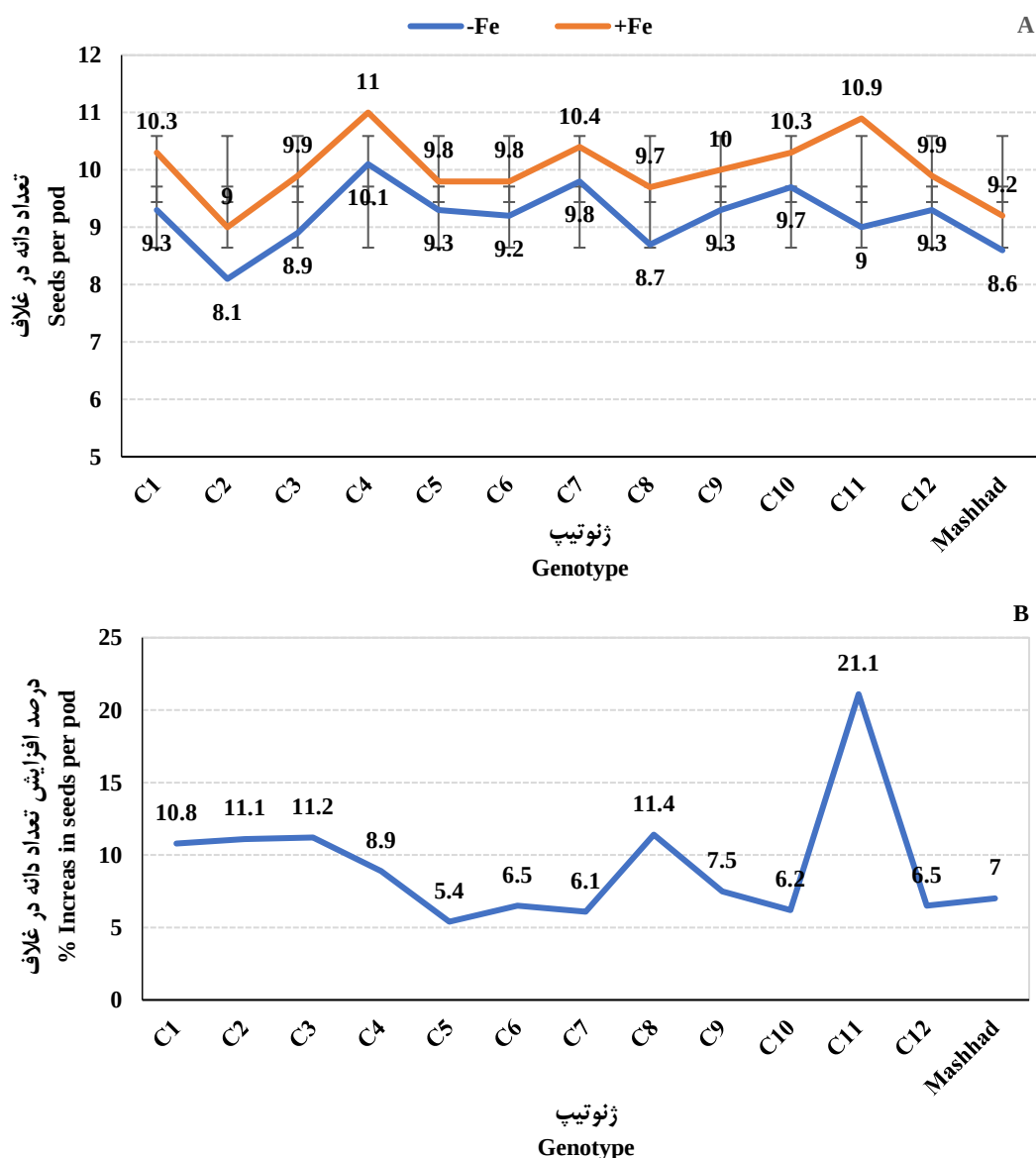
این امر با نظر فراهانی و همکاران (Farahani, Sangi, Dorri, Bamdad, & Mahdiah, 2014) در لوبیا نیز مطابقت دارد. طبق نتایج آزمایش‌های دیگری نیز که روی گیاهان اسپرس (*Onobrychis sativa*) (Tadayyon & Raiesi, 2008) و عدس (*Lens culinaris Medik.*) (Nadri, 2014) انجام شد، مصرف آهن باعث افزایش ارتفاع بوته شد. محققان دیگر نیز اعلام کردند که استفاده از کودهای حاوی ذرات نانو باعث افزایش ارتفاع گیاه گندم (*Triticum aestivum L.*) می‌شود (Xiao, Zhang, Wang, Zhang, & Zhang, 2008). از آنجاکه عنصر آهن نقش اساسی در تعداد گرانای کلروپلاست دارد، در اثر کمبود آهن اندازه کلروپلاست کاهش می‌یابد و در نهایت در اثر کاهش فرآورده‌های فتوسنتزی منجر به کاهش ارتفاع گیاه می‌شود (Ning et al., 2023). به‌نژادی برای ایجاد تاج‌پوشش و بوته‌های بلندتر ممکن است به انتخاب ارقام علوفه‌ای پرمحصول کمک کند (Digrado et al., 2022). مطالعات دیگر نیز یک همبستگی مثبت بین ارتفاع بوته و عملکرد دانه در لوبیا چشم‌بلبلی گزارش کرده‌اند (Thapa, Adhikari, Darai, & Kandel, 2021) که مد نظر قرار دادن ارتفاع بوته را به‌عنوان صفتی برای انتخاب برای بهبود عملکرد دانه پیشنهاد می‌کند (Digrado et al., 2022).

افزایش معنی‌دار ماده خشک اندام هوایی (عملکرد زیست‌توده) و شاخص برداشت ژنوتیپ‌ها در اثر مصرف نانوکود آهن در سطح احتمال یک درصد مشاهده شد (جدول ۳ و ۵). در هر دو شرایط مصرف نانوکود آهن، تنها چهار لاین (C1، C4، C7 و C11) شاخص برداشت دانه بالاتر از میانگین داشتند. لاین C3 با وجود اینکه کمترین عملکرد دانه را در هر دو شرایط کودی داشت، پس از لاین C6، از نظر شاخص برداشت دانه بیشترین واکنش مثبت (افزایش ۱۷/۴ درصد) را به مصرف نانوکود آهن نشان داد. لاین C11 در دزفول با مصرف نانوکود آهن بیشترین شاخص برداشت دانه (۴۵/۱ درصد) را داشت و کمترین مقدار این شاخص (۱۹/۸ درصد) مربوط به لاین C6 در شیراز و در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن بود. در مجموع، مناطق مورد بررسی و در هر دو شرایط کودی، لاین‌های C3 و C1 به‌ترتیب کمترین و بیشترین درصد شاخص برداشت را داشتند. همچنین مصرف نانوکود آهن باعث افزایش ۷/۳ درصدی شاخص برداشت دانه در مجموع مناطق شد (جدول ۷). طبق نتایج تحقیقات انجام‌شده، بسیاری از تغییرات مشاهده‌شده در مقادیر شاخص برداشت ناشی از طیف متنوع اقلیم و خاک است که از ویژگی‌های هر منطقه زراعی است. بنابراین، یافتن روابط بین اقلیم منطقه و شاخص برداشت ممکن است برای تغییر شاخص برداشت از نظر زمانی و مکانی استفاده شود. از آنجایی که شاخص برداشت تحت تأثیر مدیریت زراعی متفاوت است، این احتمال وجود دارد که انتخاب برای شاخص

اینکه در شرایط مصرف نانوکود آهن پس از لاین C4 تعداد دانه در غلاف بیشتری تولید کرد، اما در شرایط عدم مصرف نانوکود، کاهش قابل توجهی در تعداد دانه در غلاف نشان داد (شکل ۱A). پایین‌ترین واکنش مثبت به مصرف نانوکود آهن با ۲۱/۱ درصد افزایش تعداد دانه در غلاف مربوط به این لاین بود (شکل ۱B).

مثبت به مصرف نانوکود آهن با ۴۳ درصد افزایش، مربوط به لاین C11 و در بین مناطق مورد بررسی، با ۳۲/۵ درصد مربوط به منطقه خمین بود.

از نظر تعداد دانه در غلاف، در هر دو شرایط کودی، همه لاین‌ها به جز لاین C2 از رقم مشهد برتر بودند. لاین C4 در هر دو شرایط کودی بیشترین تعداد دانه در غلاف را داشت. لاین C11 با وجود



شکل ۱- میانگین تعداد دانه در غلاف ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در شرایط مصرف (+Fe) و عدم مصرف (-Fe) نانوکود آهن (A) و درصد افزایش آن تحت تأثیر مصرف نانوکود آهن (B)

Figure 1- No. of seeds per pod in the cowpea genotypes under two fertilization conditions (-Fe, without iron nano-fertilizer; +Fe, with iron nano-fertilizer) (A) and its increase (%) under the influence of iron nano-fertilizer application (B)

یکی از دلایل کم بودن تعداد دانه در غلاف و بوته در شرایط عدم مصرف آهن، کمبود مواد فتوسنتزی لازم برای رشد جنین و تکامل بذر است. با کاهش منبع، ظرفیت تعدادی از مخازن خالی می ماند و عملاً تعدادی از دانه ها در گیاه لوبیا سقط می شوند (Daylami & Mojaddam, 2019). صفاپور و همکاران (Safapur, Ardakani, Rejali, Khagani, & Teymuri, 2010) در بررسی های خود در گیاه لوبیا اعلام کردند که در ژنوتیپ های مختلف با تیپ رشدی متفاوت، صفت تعداد دانه در غلاف دارای اختلاف معنی دار می باشد. قنبری و طاهری مازندرانی (Ghanbari & Taheri Mazandarani, 2003) گزارش دادند که تغییرات تعداد دانه در غلاف کمتر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می گیرد و این صفت بیشتر تحت کنترل ژنتیکی است. محققان گزارش کردند که در حبوبات، تعداد دانه در بوته تقریباً موازی با تعداد غلاف تغییر می کند، زیرا تعداد دانه در غلاف تقریباً ثابت است (Tanaka, 1980).

در مطالعات مختلف تأثیر معنی دار مصرف نانوکود آهن بر بهبود عملکرد و اجزای عملکرد گیاهان زراعی گزارش شده است (Farahani et al., 2014; Ighaiee Oskoie et al., 2018; Bayat, Ghanbari, & Bayramzade, 2020). دلیل تغییرات اجزای گیاهی، تعداد بیشتر ذرات در واحد وزن و سطح ویژه ذرات نانو مقیاس می باشد که باعث تماس بیشتر کود با گیاه و در نتیجه افزایش جذب آهن می شود. علاوه بر این، نانوذرات آهن با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر، احتمالاً بازده آهن را بیشتر و حلالیت آن را در آب مؤثرتر می کند، بنابراین فعالیت نانوذرات افزایش یافته و در نتیجه عملکرد گیاه را بهبود می بخشد (Joseph & Morrison, 2006). طبق یافته های ایرانشاهی و همکاران (Iranshahi, Sajedi, & Changizi, 2013)، نانوذرات آهن بر اجزای عملکرد لوبیا (تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن دانه) و طول غلاف تأثیر مستقیم دارد. در بررسی اثرات نانوکود آهن و مقایسه آن با سولفات آهن و کلات آهن بر رشد و محصول دو رقم لوبیا چیتی، محققان به این نتیجه رسیدند که ترکیبات آهن و نوع رقم بر همه صفات مورد مطالعه اثر معنی دار داشتند و تیمار نانوکود بیشترین تأثیر را بر اجزای عملکرد نشان داد (Farahani et al., 2014). در آزمایش دیگری، استفاده از نانوکود آهن در گیاه لوبیا چشم بلبلی، تعداد غلاف در بوته و وزن ۱۰۰ دانه را به ترتیب ۴۷ و ۷۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (Delfani, Firouzabadi, Farrokhi, & Makarian, 2014).

مطابق نتایج آزمایش حاضر (جداول ۶ و ۷)، در شرایط عدم کاربرد نانوکود آهن، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و در نتیجه تعداد دانه در بوته به مقدار قابل توجهی کمتر از زمانی بود که نانوکود آهن مصرف شد. بیشترین و کمترین تعداد دانه در بوته،

به ترتیب مربوط به لاین های C4 و C2 در مناطق دزفول و خمین بود. منطقه خمین، کمترین میانگین تعداد دانه در بوته را در بین مناطق مورد بررسی و در هر دو شرایط کودی داشت. در مجموع مناطق، لاین C4 برترین ژنوتیپ از نظر تعداد دانه در بوته بود. میانگین افزایش تعداد دانه در بوته ژنوتیپ ها در اثر مصرف نانوکود آهن، ۲۶/۶ درصد بود. در آزمایش حاضر، منطقه دزفول از نظر وزن ۱۰۰ دانه نسبت به سایر مناطق برتر بود. در این صفت نیز منطقه خمین کمترین وزن ۱۰۰ دانه را در هر دو شرایط کودی داشت، اما در بین مناطق، بیشترین واکنش مثبت (۵/۴ درصد) را به مصرف نانوکود آهن نشان داد. لاین C4 با وجود اینکه کمترین وزن ۱۰۰ دانه را در هر دو شرایط کودی نشان داد، اما واکنش آن به مصرف نانوکود آهن بیش از سایر ژنوتیپ ها بود و مصرف نانوکود باعث افزایش ۱۲/۷ درصدی وزن دانه آن شد. وزن دانه یک خصوصیت ژنتیکی است که مقدار آن متأثر از شرایط دوران رشد نیز می باشد. این شرایط ممکن است موجب تغییراتی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد در وزن دانه شوند (Ighaiee Oskoie, 2018). یافته های محققان دیگر نیز نتایج مشابهی را نشان داده است، به طوری که اثر کودهای مختلف را روی گیاه لوبیا بررسی کرده و نتیجه گرفتند که وزن ۱۰۰ دانه تحت تأثیر کاربرد کود افزایش می یابد (Qadiri, Mutawakel, & Saeedi, 2023).

عملکرد دانه که به عنوان مهم ترین معیار ارزیابی و مقایسه ارقام در آزمایش های مختلف بررسی می شود، در ژنوتیپ های مورد بررسی تفاوت قابل توجهی نشان داد (جداول ۶ و ۷). در هر دو شرایط کودی، تنها سه لاین C1، C4 و C11 عملکرد بیشتری نسبت به رقم مشهد داشتند، اما نسبت به میانگین عملکرد ژنوتیپ ها، عملکرد هفت لاین بیشتر بود. در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن، میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ ها در چهار منطقه، ۱۲۹۶-۸۳۳ کیلوگرم در هکتار و در شرایط مصرف نانوکود آهن، ۱۴۰۴-۹۸۳ کیلوگرم در هکتار بود. با مصرف نانوکود آهن، درصد افزایش عملکرد دانه با میانگین ۱۰/۴ درصد، بین ۳/۶-۷/۱۹ درصد در بین مناطق متغیر بود. لاین C3 در هر دو شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن کمترین عملکرد دانه را نشان داد، اما درصد تغییر عملکرد دانه آن (۱۷/۹ درصد) در واکنش به مصرف نانوکود آهن بیشتر از سایر لاین ها و رقم مشهد بود. منطقه دزفول از نظر عملکرد دانه برترین منطقه بود و منطقه شیراز با توجه به نتایج هم زمان، در مقایسه با سایر مناطق برای تولید دانه مناسب نبود.

گیاهان برای فرآیندهای مهم بیوشیمیایی و متابولیکی به آهن نیاز دارند. کمبود یا بیشبود آهن در محیط منجر به محدودیت رشد و نمو و عملکرد گیاهان می شود. آگاهی از سیگنال ها و عوامل مؤثر بر هر یک از مراحل جذب آهن از خاک و توزیع آن در گیاه، درک ما را نسبت به تغذیه معدنی گیاه بهبود می بخشد.

جدول ۶- مقایسه میانگین عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ های لوبیا چشم بلبلی در مناطق مورد بررسی تحت شرایط مصرف (+Fe) و عدم مصرف (-Fe) نانو کود آهن
Table 6- The means of yield and its components of cowpea genotypes in the studied locations under two conditions of Nano-fertilization (-Fe, without iron; +Fe, with iron)

صفت Trait	مکان Location	نانو کود آهن Fe nano-fertilizer	ژنوتیپ Genotype												میانگین Mean	درصد تغییر % Change	حداقل تفاوت معنی دار LSD (5%)
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad		
تعداد غلاف در بوته Pods per plant	کرج Karaj	-Fe	15.0	13.7	10.5	8.6	17.9	14.6	16.6	8.6	17.6	13.0	15.7	14.7	19.3	14.2	8.0
		+Fe	16.3	14.6	11.6	11.6	18.6	16.0	17.0	10.0	18.3	14.3	17.3	15.6	19.6	15.4	
	دزفول Dezful	-Fe	9.0	13.6	18.3	25.3	12.0	14.3	15.3	9.6	14.3	15.6	12.3	12.0	17.0	14.5	18.0
		+Fe	13.0	14.0	20.0	28.3	16.6	15.6	17.3	12.3	15.6	19.0	18.3	14.3	18.3	17.2	
تعداد دانه در بوته Seeds per plant	خمین Khomein	-Fe	9.6	6.0	5.4	9.0	6.5	10.3	8.8	4.8	8.5	10.0	5.6	5.6	7.2	7.4	32.5
		+Fe	11.6	8.6	7.6	12.3	8.6	11.6	10.3	7.6	10.3	11.6	12.3	7.6	9.00	9.9	
	شیراز Shiraz	-Fe	9.6	8.3	9.0	10.0	10.6	10.0	8.6	12.6	8.0	8.6	8.0	7.0	10.0	9.2	18.3
		+Fe	12.6	10.3	10.6	12.6	11.3	10.6	10.3	13.0	10.0	10.6	11.6	8.3	10.6	10.9	
تعداد دانه در بوته Seeds per plant	کرج Karaj	-Fe	133.0	122.6	95.5	93.6	175.9	131.3	167.9	71.4	156.5	127.8	153.4	128.1	166.3	132.5	18.5
		+Fe	163.3	143.0	116.6	140.0	186.6	160.0	182.0	96.6	177.6	153.0	202.3	145.0	177.8	157.2	
	دزفول Dezful	-Fe	90.6	114.4	184.0	280.5	114.4	145.8	156.6	98.2	157.0	161.3	133.1	123.4	162.9	147.8	22.5
		+Fe	139.0	130.0	210.0	321.6	164.1	161.6	182.5	129.3	169.1	203.3	214.0	150.6	179.6	181.1	
تعداد دانه در بوته Seeds per plant	خمین Khomein	-Fe	86.9	41.9	45.2	77.1	55.6	89.0	81.2	35.2	63.6	80.2	42.9	46.0	50.6	61.1	52.3
		+Fe	121.0	68.0	74.6	124.6	80.0	106.6	101.0	66.6	93.3	109.0	123.3	72.0	72.0	93.2	
	شیراز Shiraz	-Fe	93.6	74.6	69.0	103.6	100.3	91.3	83.6	118.3	80.3	86.6	63.3	70.0	90.6	86.5	27.8
		+Fe	131.3	96.3	96.0	135.3	113.3	103.3	106.3	130.0	103.6	110.0	120.3	85.6	107.3	110.6	

4.27

ادامه جدول ۶- مقایسه میانگین عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در مناطق مورد بررسی تحت شرایط مصرف (+Fe) و عدم مصرف (-Fe) نانوکود آهن
Table 6- The means of yield and its components of cowpea genotypes in the studied locations under two conditions of Nano-fertilization (-Fe, without iron; +Fe, with iron), continued

صفت Trait	مکان Location	نانوکود آهن Fe nano-fertilizer	ژنوتیپ Genotype												میانگین Mean	درصد تغییر % Change	حداقل تفاوت معنی‌دار LSD (5%)
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad		
وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight (g)	کرج	-Fe	22.5	21.9	21.6	19.1	19.9	20.6	20.4	20.8	19.7	20.1	19.0	18.5	21.0	20.3	2.2
	Karaj	+Fe	22.8	22.1	22.1	20.3	20.3	21.0	20.8	20.8	20.1	20.6	20.0	19.1	21.1	20.8	
	دزفول	-Fe	20.4	24.9	24.9	14.5	22.6	23.6	21.7	21.6	21.6	18.7	22.3	24.0	23.2	21.8	2.4
	Dezful	+Fe	21.0	25.0	25.0	17.0	23.1	23.6	22.0	22.1	22.3	19.3	23.0	24.1	23.5	22.3	
	خمین	-Fe	13.7	14.1	13.2	14.0	13.0	12.5	14.2	14.7	13.6	12.5	14.8	12.1	13.1	13.5	5.4
	Khomein	+Fe	14.6	15.0	14.0	15.3	13.6	13.3	15.3	15.0	14.0	13.0	15.3	12.6	14.0	14.2	
	شیراز	-Fe	23.5	21.3	20.4	15.0	20.2	20.2	19.9	19.5	20.4	19.8	19.2	19.9	19.6	19.9	3.5
	Shiraz	+Fe	24.3	21.6	20.6	18.0	20.6	20.3	20.6	20.0	21.0	20.6	20.0	20.3	20.3	20.6	
	کرج	-Fe	1162	1471	1009	980	1048	704	1195	803	632	856	627	744	1032	943	10.7
	Karaj	+Fe	1233	1500	1117	1116	1119	783	1250	933	766	983	850	850	1083	1044	
عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	دزفول	-Fe	1352	827	558	1635	1452	1226	1413	1428	1525	2027	2176	1719	1453	1445	7.8
	Dezful	+Fe	1466	1058	816	1666	1600	1333	1450	1516	1666	2133	2234	1750	1583	1559	
	خمین	-Fe	1358	1498	993	1518	1215	1470	1465	1096	1483	1303	1246	1093	1443	1321	29.53
	Khomein	+Fe	1500	1583	1083	1616	1316	1550	1533	1216	1550	1416	1400	1166	1516	1418	
	شیراز	-Fe	1307	825	774	1054	841	419	824	718	541	565	984	633	1067	811	19.6
	Shiraz	+Fe	1416	950	916	1133	1000	700	1000	933	716	783	1133	766	1183	971	

بیشترین سطح نانوکلات آهن (سه در هزار) باعث تولید بیشترین عملکرد دانه (۱۰۲۱ کیلوگرم در هکتار) شد (Sabeki, Asgharipour, Ghanbari, & Miri, 2017). محققان معتقدند که بهبود عملکرد توسط نانوکود می‌تواند ناشی از کارایی ساختار نانو در رسانش و فراهمی بهینه عنصر آهن در فرآیندهای فیزیولوژیکی باشد. احتمالاً با فعال شدن فرآیندهای فیزیولوژیکی، تشکیل کلروفیل افزایش یافته که در پی آن موجب بهبود فرایند فتوسنتز شده و منجر به افزایش عملکرد می‌شود (Maghsoodi & Najafi, 2017). از طرفی، عملکرد دانه که مهم‌ترین صفت مورد مطالعه در آزمایش‌های مختلف در گیاهان زراعی است به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر ژنوتیپ قرار دارد (Ghanbari, 2022). ژنوتیپ‌های مورد بررسی در آزمایش حاضر، از نظر واکنش به مصرف نانوکود آهن تفاوت قابل توجهی داشتند.

در خصوص کمبود آهن، سرعت تثبیت دی اکسید کربن و فتوسنتز در واحد سطح برگ کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه با کاهش ذخیره نشاسته و قند در برگ‌ها، وزن دانه و عملکرد اقتصادی کاهش می‌یابد (Alvarez-Fernandez, Garcia-Lavifia, Fidalgo, Abadia, & Abadia, 2004).

مطابق نتایج آزمایش حاضر، در تحقیقات مختلف گزارش شده است که کاربرد نانوکودها باعث افزایش معنی‌دار عملکرد گیاهان زراعی در مقایسه با تیمارهای بدون مصرف نانوکود می‌شود که علت اصلی آن بهبود رشد اجزای گیاه و فرآیندهای متابولیک مانند فتوسنتز و در نتیجه تجمع بیشتر محصولات فتوسنتزی و انتقال آن‌ها به اندام‌های اقتصادی گیاه ذکر شده است (Joseph & Morrison, 2006; Dhaliwal et al., 2022).

در تحقیقی که روی گیاه لوبیا چشم‌بلبلی انجام شد، کاربرد

جدول ۷- درصد تغییرات صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در همه مناطق تحت شرایط مصرف (+Fe) و عدم مصرف (-Fe) نانوکود آهن

Table 7- Changes (%) of the studied traits cowpea genotypes in all locations under two conditions of Nano-fertilization (-Fe, without iron; +Fe, with iron)

صفت Trait	نانوکود آهن Fe nano-fertilizer	ژنوتیپ Genotype												
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad
تعداد روز تا رسیدگی Days to maturity	-Fe	103.2	101.5	101.3	99.0	108.9	106.7	104.3	101.8	107.7	108.8	100.9	106.5	106.7
	+Fe	99.9	98.3	98.0	96.1	104.4	102.7	101.4	98.8	103.8	104.3	98.1	102.6	102.7
	%Change	-3.22	-3.13	-3.21	-2.95	-4.13	-3.77	-2.71	-2.95	-3.69	-4.14	-2.82	-3.68	-3.68
ارتفاع بوته Plant height	-Fe	65.5	54.5	58.4	53.6	68.3	71.0	62.4	60.5	61.5	61.7	62.4	64.8	66.8
	+Fe	70.0	59.5	62.8	58.1	71.9	74.4	65.8	64.5	64.7	65.8	66.4	67.8	69.2
	%Change	6.86	9.12	7.52	8.34	5.27	4.82	5.48	6.61	5.12	6.72	6.28	4.63	3.59
تعداد شاخه فرعی Branches per plant	-Fe	7.1	5.3	5.0	5.4	5.8	4.8	5.8	5.6	5.8	5.9	6.0	4.9	5.8
	+Fe	7.7	6.0	5.9	5.9	6.8	6.0	6.4	6.0	6.4	6.3	6.5	5.8	6.2
	%Change	8.42	14.15	18.32	7.76	17.67	24.62	9.79	7.08	11.64	8.05	8.26	18.09	6.87
عملکرد زیست‌توده Biomass yield	-Fe	3415	3602	3016	3526	3597	3146	3603	3244	3217	3508	3445	3326	3715
	+Fe	3511	3787	3246	3583	3740	3347	3691	3450	3408	3756	3601	3451	3903
	%Change	2.80	5.13	7.62	1.62	3.98	6.38	2.44	6.33	5.94	7.06	4.54	3.76	5.07
شاخص برداشت Harvest index	-Fe	37.6	31.4	27.3	36.0	31.0	27.6	33.4	30.1	30.5	31.5	34.5	30.1	33.3
	+Fe	39.8	33.4	30.4	38.0	33.2	31.6	35.3	32.7	33.0	33.8	37.7	32.0	34.1
	%Change	5.91	6.20	11.44	5.48	7.00	14.29	5.53	8.89	8.10	7.22	9.34	6.05	2.55
تعداد غلاف در بوته Pods per plant	-Fe	10.8	10.4	10.8	13.2	11.7	12.3	12.3	8.9	12.1	11.8	10.4	9.8	13.3
	+Fe	13.3	11.8	12.4	16.2	13.7	13.4	13.7	10.7	13.5	13.8	14.8	11.4	14.3
	%Change	23.84	14.18	15.28	22.50	17.23	9.35	11.36	20.51	11.98	17.58	43.03	16.54	7.48
تعداد دانه در بوته Seeds per plant	-Fe	101.0	88.3	98.4	138.7	111.5	114.3	122.3	80.7	114.3	98.1	91.8	117.6	107.0
	+Fe	138.6	109.3	124.3	180.3	136.0	132.8	142.9	105.6	135.9	143.8	164.9	113.3	134.1
	%Change	37.24	23.71	26.29	30.05	21.92	16.20	16.86	30.76	18.85	26.19	68.04	23.32	14.09
وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight	-Fe	20.0	20.5	20.0	15.6	18.9	19.2	19.0	19.1	18.8	17.7	18.8	18.6	19.2
	+Fe	20.6	20.9	20.4	17.6	19.4	19.5	19.6	19.4	19.3	18.3	19.5	19.0	19.7
	%Change	3.25	1.82	2.00	12.78	2.51	1.69	3.28	1.70	2.79	3.38	3.98	2.15	2.60
عملکرد دانه Grain yield	-Fe	1294	1155	833	1296	1139	954	1224	1011	1045	1187	1258	1047	1248
	+Fe	1403	1272	983	1382	1258	1091	1308	1149	1174	1328	1404	1133	1341
	%Change	8.42	10.17	17.94	6.63	10.51	14.32	6.86	13.67	12.37	11.87	11.60	8.19	7.41

(& Ali, 2020).

برای تعیین واکنش ژنوتیپ‌های مورد مطالعه به محیط‌های مختلف، شاخص‌های محیطی و ژنوتیپی بررسی شدند که نتایج مربوطه در جدول ۸ آورده شده است. شاخص محیطی نشان‌دهنده وضعیت محیط آزمایش می‌باشد. به عبارت دیگر، هرچه شاخص محیطی بیشتر باشد، شرایط محیطی برای رشد و نمو محصول بهتر است. شاخص محیطی به عواملی مانند اقلیم، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، مقدار و نوع آبیاری، نحوه تغذیه، مدیریت مزرعه، آفات و بیماری‌ها و غیره بستگی دارد.

لاین C3 در هر دو شرایط کودی کمترین عملکرد دانه را تولید کرد، اما بیشترین مقدار واکنش به مصرف نانوکود آهن را به خود اختصاص داد و از این نظر کارآمدترین ژنوتیپ بود. ژنوتیپ کارآمد از نظر جذب و مصرف مواد مغذی، ژنوتیپی است که در شرایط یکسان با مقدار معینی از مواد غذایی مصرف شده یا جذب شده نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها عملکرد اقتصادی بیشتری تولید می‌کند (Dhaliwal et al., 2022). با توجه به خواص ویژه نانومواد مانند نسبت سطح به حجم بیشتر، ظرفیت جذب بالاتر، استفاده هدفمند و رهاسازی کنترل شده، مشخص شده است که نانوکودها از نظر تأمین مواد غذایی ضروری گیاهان کارآمد هستند (Tripathi, Shweta Singh, Singh, Pandey, & Chauhan, 2017; Mittal, Kaur, Singh, Yadav,

جدول ۸- عملکرد دانه و شاخص‌های ژنوتیپی و محیطی ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در مناطق مورد بررسی
Table 8- Grain yield (kg ha⁻¹) and genotypic and environmental indices of cowpea genotypes in the studied locations

ژنوتیپ Genotype	مکان Location				میانگین Mean	شاخص ژنوتیپی Genotypic index	درصد تغییر % Change
	کرج Karaj	دزفول Dezful	خمین Khomein	شیراز Shiraz			
C1	1198	1409	1429	1362	1350	160	13.44
C2	1486	957	1540	887	1218	28	2.35
C3	1063	688	1038	845	909	-281	-23.61
C4	1048	1651	1567	1093	1340	150	12.61
C5	1082	1526	1266	920	1199	9	0.76
C6	744	1280	1510	559	1023	-167	-14.03
C7	1222	1431	1499	912	1266	76	6.39
C8	868	1472	1157	825	1081	-109	-9.16
C9	700	1596	1516	629	1110	-80	-7.26
C10	919	2080	1360	674	1258	68	5.71
C11	738	2205	1323	1058	1331	141	11.85
C12	797	1734	1130	700	1090	-100	-8.40
Mashhad	1057	1518	1480	1125	1295	105	8.82
میانگین Mean	994	1504	1371	892	1190		
شاخص محیطی Environmental index	-196	314	181	-298			
درصد تغییر % Change	-16.47	26.39	15.21	-25.04			

و خمین نامناسب‌تر بود. با توجه به این شاخص، ژنوتیپ‌های مورد بررسی در دامنه مناسبی از محیط‌های مورد ارزیابی قرار گرفتند. هرچه شاخص ژنوتیپی بیشتر باشد، شرایط ژنتیکی برای رشد و نمو محصول بهتر است. شاخص ژنوتیپی به عوامل مختلفی از جمله پتانسیل ژنتیکی ژنوتیپ‌ها و میزان تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی بستگی دارد. میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در مکان‌های مختلف ۱۱۹۰ کیلوگرم در هکتار بود. میانگین عملکرد لاین C1 در مجموع مناطق ۱۳۵۰ کیلوگرم و بر این اساس شاخص ژنوتیپی آن ۱۶۰ کیلوگرم می‌باشد. این مقدار به معنی آن است که میزان عملکرد

میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در مکان‌های مورد بررسی در جدول ۸ مشخص شده است. میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در مکان‌های مورد بررسی ۱۱۹۰ کیلوگرم در هکتار بود. میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در کرج، دزفول، خمین و شیراز به ترتیب ۹۹۴، ۱۵۰۴، ۱۳۷۱ و ۸۹۲ کیلوگرم در هکتار بود. با توجه به نتایج شاخص محیطی، بهترین منطقه برای کشت این ژنوتیپ‌ها، دزفول بود. شاخص محیطی برای شیراز و کرج به ترتیب ۲۹۸- و ۱۹۶- کیلوگرم و برای دزفول و خمین به ترتیب ۳۱۴ و ۱۸۱ کیلوگرم بود. به عبارت دیگر، شرایط محیطی در شیراز و کرج نسبت به مناطق دزفول

بهتری به مصرف نانوکود آهن نشان دادند، می‌توانند به‌عنوان منابع ژنی در برنامه‌های به‌نژادی لوبیا چشم‌بلبلی استفاده شوند. با وجود اینکه مصرف نانوکود آهن باعث بهبود رشدونمو ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد، اما از آنجاکه درباره پیامدهای زیستی مصرف نانوکودها و جذب آن‌ها توسط گیاهان گزارش‌های محدود وجود دارد و سؤالات متعددی درباره سرنوشت و رفتار نانومواد در گیاهان باقی مانده است، استفاده از این نوع کودها باید با احتیاط بیشتری صورت گیرد.

سپاسگزاری

از اساتید و کارکنان دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهد و مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر که در اجرای آزمایش و تهیه این مقاله نقش داشتند، سپاسگزاری می‌گردد.

لاین C1 نسبت به میانگین کل ۱۳/۴۴ درصد بیشتر است. میانگین عملکرد رقم مشهد در مناطق، ۱۲۹۵ کیلوگرم در هکتار و شاخص ژنوتیپی آن ۱۰۵ کیلوگرم بود. این عدد معادل ۸/۸۲ درصد عملکرد بیشتر نسبت به میانگین کل می‌باشد (جدول ۸).

نتیجه‌گیری

مناطق مورد ارزیابی از نظر شاخص محیطی نسبت به یکدیگر تفاوت داشتند. بنابراین ژنوتیپ‌ها در دامنه‌ای از شرایط محیطی متفاوت کشت شدند. بر این اساس، منطقه دزفول بهترین محیط برای کشت گیاه لوبیا چشم‌بلبلی است. براساس شاخص ژنوتیپی، لاین C1 مناسب‌ترین ژنوتیپ بود و به‌همراه لاین‌های C4 و C11 که از عملکرد بالا و صفات مطلوب برخوردار بودند، می‌توانند به‌عنوان رقم برتر در اختیار کشاورزان قرار داده شوند. ژنوتیپ‌هایی که واکنش

References

1. Abbaspour, N., Hurrell, R., & Kelishadi, R. (2014). Review on iron and its importance for human health. *Journal of Research in Medical Science*, 19(2), 164-174. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24778671>
2. Abebe, B. K., & Alemayehu, M. T. (2022). A review of the nutritional use of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) for human and animal diets. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100383>
3. Alfa, A. A., Tijani, K. B., Omotoso, O. D., Junaidu, Y., & Sezor, A. A. (2020). Nutritional values and medicinal health aspects of brown, brown-black and white cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) grown in Okene, Kogi State, Nigeria. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, 14(4), 114-124. <https://doi.org/10.9734/AJARR/2020/v14i430348>
4. Aliyu, O. M., & Makinde, B. O. (2016). Phenotypic analysis of seed yield and yield components in cowpea (*Vigna unguiculata* L., Walp). *Plant Breeding and Biotechnology*, 4(2), 252-261. <https://doi.org/10.9787/PBB.2016.4.2.252>
5. Alvarez-Fernandez, A., Garcia-Lavafia, P., Fidalgo, C., Abadia, J., & Abadia, A. (2004). Foliar fertilization to control iron chlorosis in pear (*Pyrus communis* L.) trees. *Plant and Soil*, 263(1), 5-15. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047717.97167.d4>
6. Bayat, N., Ghanbari, A. A., & Bayramzade, V. (2020). Nanoprimering a method for improving crop plants performance: A case study of red beans. *Journal of Plant Nutrition*, 44(2), 1-10. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1806304>
7. Briat, J. F., Curie, C., & Gaymard, F. (2007). Iron utilization and metabolism in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(3), 276-282. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.003>
8. Cruz, C. D., Regazzi, A. J., & Carneiro, P. C. S. (2014). *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. 4th Edition, Editora UFV, Viçosa, 514 p.
9. Cui, H. X., Sun, C. J., Liu, Q., Jiang, J., & Gu, W. (2010). *Applications of nanotechnology in agrochemical formulation, perspectives, challenges and strategies*. International Conference on Nanoagri. Sao Pedro, Brazil.
10. Daylami, S., & Mojaddam, M. (2019). Studying the effect of application time of humic acid foliar spraying on qualitative and quantitative characteristics of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) under different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1), 85-94. (in Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2018.1056.1209>
11. Delfani, M., Firouzabadi, M. B., Farrokhi, N., & Makarian, H. (2014). Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45, 530-540. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>
12. Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Verma, V., Kaur, M., Shivay, Y. S., Nisar, S., Gaber, A., Brestic, M., Barek, V., Skalicky, M., Ondrisik, P., & Hossain, A. (2022). Biofortification-A frontier novel approach to enrich micronutrients in field crops to encounter the nutritional security. *Molecules*, 27, 1340. <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>
13. Digrado, A., Gonzalez-Escobar, E., Owston, N., Page, R., Baba Mohammed, S., Umar, M. L., Boukar, O., Ainsworth, E. A., & Carmo-Silva, E. (2022). Cowpea leaf width correlates with above ground biomass across

- diverse environments. *Legume Science*, 4(4), e144. <https://doi.org/10.1002/leg3.144>
14. Fageria, N. K., & Santos, A. B. (2008). Yield physiology of dry bean. *Journal of Plant Nutrition*, 31, 983-1004. <https://doi.org/10.1080/01904160802096815>
15. FAO (2022). FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
16. Farahani, M., Sangi, M., Dorri, H. R., Bamdad, F., & Mahdieh, M. (2014). *Investigating the effect of iron oxide nanoparticles and comparing it with other iron sources on bean growth and yield*. 5th Iranian Pulses Symposium, Karaj, Iran.
17. Farshadfar, E. (1998). *Application of quantitative genetics in plant breeding*. Razi University, Kermanshah, Iran, 396 p. (in Persian).
18. Farshadfar, E., & Sutka, J. (2006). Biplot analysis of genotype-environment interaction in durum wheat using the AMMI model. *Acta Agronomica Hungarica*, 54(4), 459-467.
19. Gancales, P. S., Bortoletto, N. A., Mellomartins, L., Costa, R. B., & Gallo, P. B. (2003). Genotype-environment interaction and phenotypic stability for girth growth and rubber yield hevea clones in saopaulo state, Brazil. *Genetics and Molecular Biology*, 26, 441-448. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572003000400007>
20. Gerrano, A. S., Jansen van Rensburg, W. S., & Adebola, P. O. (2017). Nutritional composition of immature pods in selected cowpea *Vigna unguiculata* (L.) Walp. genotypes in South Africa. *Australian Journal of Crop Science*, 11(2), 134-141. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.02.p72>
21. Ghanbari, A. A. (2022). Grain yield efficiency index, a criterion for selecting the best bean genotypes in drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(4), 63-71. (in Persian with English abstract).
22. Ghanbari, A. A., & Taheri Mazandarani, M. (2003). Effects of planting arrangement and weed control on yield and yield components of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Akhtar. *Seed and Plant Journal*, 19(1), 37-47. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/spij.2017.110938>
23. Ghanbari, A. A., Dorri, H. R., Sheikh, F., Sekhavat, R., & Darvishi, B. (2018). *Technical instructions for the production of irrigated pulses seeds (common beans, fava bean, mung bean, cowpea)*. AREEO, SPII, Karaj, Iran, 38 p. (in Persian).
24. Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2022). Plant Responses and Tolerance to Salt Stress: Physiological And Molecular Interventions. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 4810. <https://doi.org/10.3390/ijms23094810>
25. Hutchinson, M. J., Muniu, F. K., Ambuko, J., Mwakangalu, M., Mwang'ombe Okello, A. W., Olubayo, J. J., & Kirimi, J. (2017). Morphological and agronomic characterization of local vegetable cowpea accessions in coastal Kenya. *African Journal of Horticultural Science*, 11, 47-58.
26. Ighaiee Oskoie, A. (2018). *Evaluation of the effects of iron nanoparticles (green, chemical, magnetic) on the growth stages and quantitative and qualitative yield of bean genotypes*. Faculty of Agriculture, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran, 105 p. (in Persian).
27. Ighaiee Oskoie, A., Ghanbari, A. A., & Mirhadi, M. J. (2018). *The effect of iron nano-particles (magnetic, green, and chemical) on the germination characteristics of common bean genotypes*. 15th National Iranian Crop Science Congress. Karaj, Iran.
28. Iranshahi, S., Sajedi, N., & Changizi, M. (2013). *The effect of different sources of iron fertilizer on the quality characteristics of pinto beans*. 5th Iranian Pulses Symposium. Karaj, Iran.
29. Joseph, T., & Morrison, M. (2006). *Nanotechnology in agriculture and food*. Nanoforum Report. European Nanotechnology Gateway.
30. Khajepoor, M. R. (2000). *Principles of Agronomy*. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 404 p. (in Persian).
31. Khalaj, H., Baradaran Firouzabadi, M., & Delfani, M. (2020). Effect of nano iron and magnesium chelate fertilizers on growth and grain yield of *Vigna sinensis* L. *Plant Process and Function*, 9(35), 161-177. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222727.1399.9.35.8.9>
32. Maghsoodi, M., & Najafi, N. (2017). Effects of nano-micronutrient fertilizers on plant nutrition. *Land Management Journal*, 4(2), 115-132. (in Persian with English abstract).
33. Malakooti, M. J., & Tehrani, M. M. (2005). *The role of micronutrients in increasing yield and improving the quality of agricultural products*. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 301 p. (in Persian).
34. Maphosa, Y., & Jideani, V. A. (2017). *The Role of Legumes in Human Nutrition*. pp. 103-121. In Hueda, M. C. ed. *Functional Food - Improve Health through Adequate Food*. Tecnalia, Spain.
35. Márquez-Quiroz, C., De-la-Cruz-Lázaro, E., Osorio-Osorio, R., & Sánchez-Chávez, E. (2015). Biofortification of cowpea beans with iron: Iron's influence on mineral content and yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(4), 839-847. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162015005000058>
36. Mir, Y., Daneshvar, M., Nazarian, F., & Khosravi, H. (2016). Effect of foliar application nano iron chelate on yield and growth traits of chickpea cultivars. *Journal of Plant Ecophysiology*, 8(24), 183-195. (in Persian with English abstract).
37. Mishra, A., Shamim, M., Siddiqui, M. W., Singh, A., Srivastava, D., & Singh, K. N. (2020). Genotypic variation

- in spatial distribution of Fe in rice grains in relation to phytic acid content and ferritin gene expression. *Rice Science*, 27(3), 227-36. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2020.04.005>
38. Mittal, D., Kaur, G., Singh, P., Yadav, K., & Ali, S. A. (2020). Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advances and future outlook. *Frontiers in Nanotechnology*, 2, 579954. <https://doi.org/10.3389/fnano.2020.579954>
 39. Nadri, Y. (2014). *The effect of iron chelate nanofertilizer on agronomic traits of lentil genotypes under environmental conditions of Khorramabad*. Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran, 117 p. (in Persian).
 40. Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z., & Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1190768. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190768>
 41. Nkhoma, N., Shimelis, H., & Laing, M. D. (2020). Assessing the genetic diversity of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) germplasm collections using phenotypic traits and SNP markers. *BMC Genetics*, 21, 110. <https://doi.org/10.1186/s12863-020-00914-7>
 42. Nogiya, M., Pandey, R. N., & Singh, B. (2016). Physiological basis of iron chlorosis tolerance in rice (*Oryza sativa*) in relation to the root exudation capacity. *Journal of Plant Nutrition*, 39(11), 1536-1546. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1161786>
 43. Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K. H., & Chakrabarty, I. (2022). Nanofertilizers: A smart and sustainable attribute to modern agriculture. *Plants*, 11, 2587. <https://doi.org/10.3390/plants11192587>
 44. Pouresmael, M., Saneinejad, A. A., Ghanbari, A. A., & Sekhavat, R. (2021). Assessment of agro-morphological traits diversity in local cowpea accessions. *Journal of Crop Breeding*, 13(38), 95-106. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.52547/jcb.13.38.95>
 45. Qadiri, A., Mutawakel, A., & Saeedi, M. (2023). Effect of organic and inorganic fertilizers on yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Badakhshan, Afghanistan. *Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 2(2), 253-258. <https://doi.org/10.55544/jrasb.2.2.36>
 46. Sabeki, M., Asgharipour, M., Ghanbari, A., & Miri, K. (2017). The effect of nano-iron chelate fertilizer on ecomorphological characteristics of pearl millet- cowpea intercropping. *Journal of Agroecology*, 7(1), 96. (in Persian).
 47. Safapur, M., Ardakani, M. R., Rejali, F., Khagani, S., & Teymuri, M. (2010). Effect of co-inoculation of mycorrhiza and rhizobium on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *New Finding in Agriculture*, 5, 21-35. (in Persian with English abstract).
 48. Sekhavat, R. (2006). *Selection of superior lines from the local cowpea population in Khuzestan*. AREEO, Safiabad, Iran, 51 p. (in Persian).
 49. Sekhavat, R., Ghanbari Birgani, D., & Mirzashahi, K. (2018). Instructions for planting, growing, and harvesting cowpeas in Khuzestan. AREEO, Safiabad, Iran, 24 p. (in Persian).
 50. Sheykhabaglou, R., Sedghi, M., Tajbakhsh Shishevan, M., & Sharifi, R. (2010). Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(2), 112-113. <https://doi.org/10.15835/nsb224667>
 51. Simunji, S., Muniyinda, K. L., Lungu, O. I., Mweetwa, A. M., & Phiri, E. (2019). Evaluation of cowpea (*Vigna unguiculata* L. walp) genotypes for biological nitrogen fixation in maize-cowpea crop rotation. *Sustainable Agriculture Research*, 8(1), 82-93. <https://doi.org/10.5539/sar.v8n1p82>
 52. Singh, S. P. (2007). Drought resistance in the race Durango dry bean landraces and cultivars. *Agronomy Journal*, 99, 1219-1225. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0301>
 53. Smith, M. R., Rao, I. M., & Merchant, A. (2018). Source-sink relationships in crop plants and their influence on yield development and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1889. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01889>
 54. Tadayyon, A., & Raiesi, F. (2008). The response of various ecotypes of common sainfoin (*Onobrychis viciifolia* L.) to the foliar application of nitrogen, iron and zinc in a cold climate of Chaharmahal va Bakhtyari province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(1), 41-48. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v6i1.1174>
 55. Tamuk, P., Pandey, R. N., Purakayastha, T. J., Barman, M., Chakraborty, D., Gurung, B., Choudhury, S., Trivedi, A., & Singh, B. (2024). Grain and shoot iron (Fe) content and root phytosiderophore release are the major determinants of Fe-deficiency tolerance index (FeDTI) and the reliable screening markers to breed Fe-efficient rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 9, 1-25. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2320212>
 56. Tanaka, A. (1980). *Source and sink relationship in crop production*. ASPAC Food and Fertilizer Technical Center, Taipei city, Taiwan, 23 p.
 57. Thapa, B., Adhikari, N. R., Darai, R., & Kandel, B. P. (2021). Genotypic variability of exotic cowpea genotypes for agro-morphological traits in mid-western region of Nepal. *Alinteri Journal of Agricultural Sciences*, 36(1), 47-

- 54.
58. Tripathi, D. K., Shweta Singh, S., Singh, S., Pandey, R., & Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation, and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.030>
59. Vaezi, S. (2010). *Collection, restoration and evaluation of agromorphological diversity of cowpea in Iran*. ARREO, SPII, Karaj, Iran, 74 p. (in Persian).
60. Valdes-Miramontes, E. H., Rodriguez-Macias, R., & Ruiz-Lopez, M. (2019). *Vegetal Sources of Iron*. pp. 1-23. in Rodrigo, L. ed. Iron deficiency anemia. University of Oviedo, Spain.
61. Vaneeckhaute, C., Ghekiere, G., Michels, E., Vanrolleghem, P. A., Tack, F. M. G., & Meers, E. (2014). Assessing nutrient use efficiency and environmental pressure of macronutrients in biobased mineral fertilizers: A review of recent advances and best practices at field scale. *Advances in Agronomy*, 128, 137-180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00004-4>
62. Xiao, Q., Zhang, F., Wang, Y., Zhang, J., & Zhang, S. (2008). Effects of slow/controlled release fertilizers felted and coated by Nano-materials on nitrogen recovery and loss of crops. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 14(4), 779-785. <https://doi.org/10.11674/zwyf.2008.0425>
63. Xiong, H., Shi, A., Mou, B., Qin, J., Motes, D., Lu, W., Ma, J., Weng, Y., Yang, W., & Wu, D. (2016). Genetic diversity and population structure of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). *Plos One*, 11, e0160941. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160941>
64. Zhu, H., Han, J. Q., & Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of Environmental Monitoring*, 10, 713-717. <https://doi.org/10.1039/b805998e>
65. Zuluaga, M. Y. A., Cardarelli, M., Roupahel, Y., Cesco, S., Pii, Y., & Colla, G. (2023). Iron nutrition in agriculture: From synthetic chelates to biochelates. *Scientia Horticulturae*, 312, 111833. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111833>



Investigating How Seed Yield is Influenced by Different Agronomic Traits in Local Sesame (*Sesamum indicum* L.) Lines Through the Utilization of Path Analysis and Principal Components Analysis

B. Masoudi^{1*}, M. Abbasali¹, A. Aien², S. Saif Amiri³

- 1- Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
- 2- Seed and Plant Improvement Research Department, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Jiroft, Iran
- 3- Seed and Plant Improvement Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Ardabil, Iran

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

How to cite this article:

Received: 25 December 2024
Revised: 22 February 2025
Accepted: 01 March 2025
Available Online: 13 April 2025

Masoudi, B., Abbasali, M., Aien, A., & Saif Amiri, S. (2025). Investigating How Seed Yield is Influenced by Different Agronomic Traits in Local Sesame (*Sesamum indicum* L.) Lines Through the Utilization of Path Analysis and Principal Components Analysis. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 461-478. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.91336.1368>

Introduction

The importance of sesame (*Sesamum indicum* L.) as a key crop in numerous regions can be attributed to its adaptability to dry climates, the nutritional value of its oil, and its health advantages. The necessity of improving the sesame plant is important by its comparatively low yield. The use of improved cultivars by plant breeding and breeding methods has resulted in a higher yield and higher quality of crops, which in the case of sesame plants include a greater increase in the seed yield and improvement in its quality. In a breeding program, increasing genetic diversity enhances the ability to select superior genotypes, and a more efficient selection process contributes to greater breeding success. The use of local sesame cultivars is particularly valuable because of their potential to generate improved genotypes. Understanding the relationships between yield and other related traits allows these traits to be used more effectively as selection indicators for genetic improvement. The nature of the relationship between yield and its components determines what appropriate traits should be used in plant breeding.

Materials and Methods

To discover the correlations among seed yield and some important agricultural traits in order to determine the direct and indirect effects of each trait on seed yield and finally to choose the ideal genotypes in terms of various characteristics, a total of 36 local sesame cultivars were evaluated in 3 regions (Karaj, Moghan and Jiroft) by using a randomized complete block design for two years (2017-2018). A total of 14 quantitative traits were studied in this study, including measurements like the number of days from germination to the beginning of flowering, the number of days from germination to the beginning of maturity, the height of the first capsule from the plant crown, the height of the plant, the number of branches, the number of capsules in one plant, the number of seeds in one Capsule, seed weight of one capsule, the weight of 1000 seeds, capsule length, capsule width, capsule diameter, biological performance and seed yield.



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.2025.91336.1368>

Results and Discussion

The calculation of simple correlation coefficients showed that the height of the first pod from the plant crown, seed weight of a capsule, biological yield, number of seeds in a capsule and plant height have the highest correlation coefficients with seed yield. The height of the first capsule from the plant crown, the number of seeds in the capsule and the height of the plant were demonstrated by path analysis had the most positive direct effect and the number of days until the start of maturity had the most negative direct effect on seed yield and it is suggested that they be used as selection indicators for the improvement of seed yield. Five components were identified through the results of the principal components analysis which explained 77.92% of the variations in the data. Out of all the genotypes analyzed in terms of yield, genotypes 78-730, 78-229, and 78-570, displayed the greatest seed yield on the biplot generated by the first and second components. All evaluated traits led to the identification of four separate groups through cluster analysis. Overall, the results indicated that the cultivars in the first group were late-flowering types characterized by tall plants and high yield. The second group consisted of late-flowering cultivars with few capsules and low yield. The third group included early-flowering, early-maturing cultivars with long capsules, while the fourth group comprised cultivars with small capsules but a high number of seeds.

Conclusion

It was shown by cluster analysis that there was no connection between the classification of genotypes and their geographical placement and predominantly, the genotypes were classified by their physical distinctions and morphological differences. It can be concluded from the results that principal components analysis and cluster analysis exhibit similarities in their ability to segregate cultivars and genotypes. Their analysis outcomes give us a better understanding of the genetic structure and helps identifying specific genetic populations that have the potential to improved breeding programs.

Keywords: Biplot, Geographic distribution, Relationships between traits, Selection indices, Yield improvement

بررسی رابطه بین عملکرد دانه و چندین صفت زراعی لاین‌های بومی کنجد (*Sesamum indicum* L.) با استفاده از روش تجزیه علیت و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

بهرام مسعودی^{۱*}، محمد عباسعلی^۱، احمد آئین^۲، صابر سیف امیری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

چکیده

جهت مشخص کردن روابط بین عملکرد دانه با برخی صفات مهم زراعی و انتخاب بهترین ارقام از نظر صفات مختلف، تعداد ۳۶ رقم بومی کنجد (*Sesamum indicum* L.) در سه منطقه کرج، مغان و جیرفت در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به مدت دو سال از نظر ۱۴ صفت کمی ارزیابی شدند. نتایج ضرایب همبستگی نشان داد که ارتفاع اولین غلاف از طوقه گیاه، وزن دانه‌های یک کپسول، عملکرد بیولوژیک، تعداد دانه در یک کپسول و ارتفاع بوته بالاترین ضرایب همبستگی را با عملکرد دانه دارا بودند. تجزیه علیت نشان داد که ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه، تعداد دانه در کپسول و ارتفاع بوته بیشترین اثر مستقیم مثبت و تعداد روز تا شروع رسیدگی بیشترین اثر مستقیم منفی را روی عملکرد دانه داشتند و پیشنهاد می‌شود که به‌عنوان شاخص‌های انتخاب برای پیشرفت عملکرد دانه به کار روند. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که در ژنوتیپ‌های مورد بررسی پنج مؤلفه در مجموع ۷۷/۹۲ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه کردند. از لحاظ عملکرد به‌ترتیب ژنوتیپ‌های ۷۸-۷۳۰، ۷۸-۲۲۹ و ۷۸-۵۷۰ دارای بالاترین عملکرد دانه در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی در بای پلات حاصل از مؤلفه اول و دوم بودند. براساس تجزیه خوشه‌ای برای کلیه صفات مورد ارزیابی، چهار گروه تشخیص داده شد. نتایج تجزیه خوشه‌ای نشان داد که دسته‌بندی ژنوتیپ‌ها با توزیع جغرافیایی ژنوتیپ‌ها ارتباطی نداشته و اکثر ژنوتیپ‌ها براساس تفاوت‌های ریخت‌شناختی گروه‌بندی شدند. ارقام بومی که از لحاظ عملکرد دارای برتری بودند، همگی در خوشه شماره یک قرار گرفتند که از آن‌ها می‌توان برای پروژه‌های دورگ‌گیری استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: بای پلات، پیشرفت عملکرد، توزیع جغرافیایی، روابط بین صفات، شاخص‌های انتخاب

مقدمه

کنجد (*Sesamum indicum* L.) یک محصول حیاتی است که به‌دلیل مزایای سلامتی و پایداری روغن آن و همچنین سازگاری آن با آب‌وهوای خشک شناخته شده است. کشت کنجد نه تنها از امنیت

غذایی حمایت می‌کند، بلکه از لحاظ اقتصادی نیز روغن آن ارزش بالایی دارد. تقریباً ۷۰ درصد تولید کنجد در آسیا انجام می‌شود و کشور ایران واردات قابل توجهی از کشورهای هند و پاکستان دارد (Davoodi Zanjani, Ghasemi Afshar, & Adeli Milani, 2020). کنجد نسبت به شرایط آب‌وهوایی بسیار حساس است و رشد مطلوب آن نیازمند دمای بین ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. گرما و سرمای شدید (بالاتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد یا کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد) به‌دلیل عقیمی‌گرده و کاهش محتوای روغن به‌شدت بر عملکرد تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، الگوهای بارندگی نامنظم و آب بیش از حد می‌تواند بر رشد تأثیر منفی بگذارد و منجر به بازده کمتر شود (Ranganatha et al., 2010). بیشتر کنجد تحت شرایط دیم در زمین‌های حاشیه‌ای با شیوه‌های مدیریت ضعیف کشت می‌شود. این فقدان نهاده‌ها و تکنیک‌های کشاورزی بهینه، محدودیت‌های عملکرد را تشدید می‌کند (Ranganatha et al., 2010; Langham, 2010).

- ۱- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- ۲- بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران
- ۳- بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران

(Email: bmasoudi@gmail.com)

(*)- نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.91336.1368>

(Riney, Smith, & Wiemers, 2008).

عملکرد به نسبت پایین کنگد در ایران (۶۹۰ کیلوگرم در هکتار) یکی از دلایل مهمی است که ضرورت اصلاح این گیاه را دوجندان نموده است (Yol, Karaman, Furat, & Uzun, 2010). استفاده از ارقام اصلاح شده می تواند موجب افزایش تولید و کیفیت محصولات زراعی از جمله افزایش کمی و کیفی روغن در گیاه کنگد گردد. میزان موفقیت در یک برنامه به نژادی و برنامه های انتخاب بستگی به دو عامل وجود تنوع ژنتیکی و انتخاب مؤثر ژنوتیپ های مطلوب دارد (Falconer & Mackey, 1996). از دست دادن ژن های مفید به ویژه در زمینه های کشاورزی نگران کننده است. بسیاری از گونه های گیاهی با چند رقم پرمحصول جایگزین شده اند که منجر به از دست رفتن قابل توجه تنوع ژنتیکی شده است. این کاهش، گزینه های برنامه های اصلاحی را با هدف بهبود مقاومت در برابر آفات و بیماری ها یا سازگاری با تغییرات آب و هوایی محدود می کند. گونه های محلی برای انعطاف پذیری سیستم های کشاورزی ضروری هستند و اغلب با شرایط منطقه سازگاری بهتری دارند و در برابر آفات و بیماری ها مقاومت می کنند (Winstead & Jacobson, 2024). ارقام محلی کنگد به دلیل امکان استفاده از آن ها در توسعه ژنوتیپ های برتر در برنامه های اصلاحی اهمیت دارند. در ایران، تنوع ژنتیکی قابل توجهی در بین ژنوتیپ های کنگد مشاهده شده است که نشان می دهد کشور ما یک کانون بالقوه تنوع برای این محصول است و تنوع ژنتیکی بالایی در ژنوتیپ های محلی آن نسبت به ژنوتیپ های وارداتی مشاهده می شود (Tabatabaei et al., 2011). وجود این تنوع برای بهبود صفاتی مانند تحمل به خشکی و بیماری هایی مانند فیلودی کنگد و حفظ عملکرد محصول تحت شرایط محیطی مختلف اهمیت بوم شناختی و کشاورزی این ارقام را برجسته می کند (Gharib-Eshghi, Mozafari, & Azizov, 2016; Salehi, Esmailzadeh Hosseini, Salehi, & Bertaccini, 2017). استفاده از خویشاوندان وحشی و بومی کنگد برای هیبریداسیون می تواند صفات مفیدی مانند تحمل به خشکی و مقاومت در برابر بیماری را به ارقام اصلاحی انتقال داده و انعطاف پذیری ارقام جدید را در برابر شرایط آب و هوایی افزایش دهد (Yadav et al., 2022; Ranganatha et al., 2010). علاوه بر دستیابی به ارقام متحمل به ریزش در کنگد، یکی از اصلی ترین اهداف اصلاحی در کنگد افزایش عملکرد بوده که با انتخاب بوته های دارای شاخه فرعی بیشتر و با تعداد کپسول در بوته بیشتر و افزایش تعداد برچه در کپسول می توان به این هدف دست یافت (Baydar, 2005). همچنین تیپ رشدی محدود و متحمل به ریزش برای برداشت مکانیزه بسیار مورد علاقه است (Ashri, 1998). اساساً استفاده از شاخص های انتخاب زمانی می تواند اثربخش باشد که درک کاملی از رابطه بین عملکرد و اجزای آن وجود داشته باشد (Mohammadi, Prasanna, & Singh, 2003). ماهیت رابطه بین

عملکرد و اجزای آن مشخص می کند که چه ویژگی های مناسبی باید در اصلاح نبات مورد استفاده قرار گیرند. مطالعات همبستگی در درک روابط بین ویژگی های عملکردی مختلف و سایر ویژگی ها ضروری است و محققان را قادر می سازد تا میزان ارتباط نزدیک متغیرهای مختلف را اندازه گیری کنند و بینش هایی را در مورد اثرات مستقیم و غیرمستقیم ارائه دهند. ضرایب مسیر امکان تجزیه و تحلیل دقیق ضرایب همبستگی را با تفکیک آن ها به اثرات مستقیم و غیرمستقیم فراهم می کند. این تجزیه برای تعیین سهم هر صفت در عملکرد کلی بسیار مهم است. یکی دیگر از روش های تحلیلی مورد استفاده، تجزیه به مؤلفه های اصلی است. این تکنیک چندین متغیر همبسته را به مجموعه ای از متغیرهای غیرهمبسته که به عنوان مؤلفه اصلی شناخته می شوند، تجزیه می کند. برخلاف تجزیه به عامل ها، تجزیه به مؤلفه های اصلی شامل چرخش عاملی نمی شود، و آن را به یک رویکرد ساده برای شناسایی شاخص های مستقل از یک مجموعه داده تبدیل می کند. مؤلفه های اصلی می توانند جنبه های مختلف داده ها را برجسته کنند و به محققان این امکان را می دهند تا روی صفات خاص بدون دخالت همبستگی ها تمرکز کنند (Manly, 2004).

تحقیقات نشان داده است که در کنگد، صفت عملکرد دانه با صفات تعداد کپسول در گیاه، وزن هزار دانه، ارتفاع گیاه (Wang et al., 2024)، تعداد دانه در کپسول (Kante, Wadikar, Sargar, & Patil, 2022; Kalaiyarasi, Rajasekar, Lokeshkumar, Priyadharshini, & Mohanraj, 2019) و طول کپسول (et al., 2022) همبستگی مثبت و معنی داری دارد. ینگ زونگ و یشو (Yingzhong & Yishou, 2002) با بررسی ۳۰ رقم کنگد با توجه به نه خصوصیت تعداد روز تا ۵۰ درصد گل دهی، ارتفاع گیاه، ارتفاع نخستین کپسول، تعداد کپسول در گیاه، طول کپسول، عرض کپسول، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه و عملکرد دانه در گیاه نشان دادند که تعداد کپسول در گیاه و ارتفاع گیاه همبستگی مثبت معنی دار با عملکرد دانه در گیاه دارد. ۶۴ ژنوتیپ کنگد به منظور همبستگی بین عملکرد و شش خصوصیت تشکیل دهنده عملکرد به وسیله کومارسون و همکاران (Kumaresan & Nadarajan, 2003) مورد بررسی قرار گرفتند. به غیر از تعداد روز تا ۵۰ درصد گل دهی و میزان روغن، بقیه خصوصیات مطالعه شده همبستگی مثبت و معنی داری با عملکرد دانه نشان دادند. فاضل و همکاران (Fazal et al., 2015) با بررسی ۱۳ ژنوتیپ کنگد نتیجه گیری کردند که عملکرد دانه تک بوته بیشترین همبستگی مثبت را با تعداد کپسول در گیاه دارد. تجزیه علیت نشان داد که ارتفاع گیاه دارای اثر مستقیم منفی روی عملکرد دانه بود، در حالی که دارای اثرات غیرمستقیم مثبت از طریق تعداد کپسول در گیاه، تعداد شاخه های فرعی و تعداد دانه در کپسول بود. تعداد کپسول در یک بوته بیشترین اثر مستقیم مثبت را روی عملکرد دانه داشت. محققان دیگر نیز به اثر مستقیم و مثبت تعداد کپسول در یک بوته

(به‌ترتیب نماینده منطقه معتدل، گرم شمال و گرم جنوب) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به‌مدت دو سال کشت شدند. نام و منشاء هر کدام از ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در **جدول ۱** ارائه شده است. منطقه کرج به‌دلیل داشتن ۱۵۰ تا ۱۸۰ روز خشک، جزء مناطق آب‌وهوایی مدیترانه‌ای گرم و خشک و با داشتن زمستان سرد و مرطوب و تابستان گرم و خشک جزء رژیم رطوبتی خشک محسوب می‌شود و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۲۱ متر است. براساس اطلاعات ۳۰ ساله هواشناسی کرج، متوسط بارندگی منطقه ۲۴۳ میلی‌متر در سال است. مغان دارای آب‌وهوای گرم و مرطوب است و به‌طور متوسط ۴۵ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. در زمستان دمای هوا به زیر صفر درجه می‌رسد و در تابستان دما تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. میزان بارندگی سالیانه تقریباً ۳۰۰ میلی‌متر است. مشخصات اقلیمی جیرفت عبارت است از ارتفاع از سطح دریا ۶۲۷ متر، متوسط بارندگی ۱۷۰ میلی‌متر، رطوبت نسبی ۵۵ تا ۶۵ درصد، حداکثر درجه حرارت ۴۸ درجه سلسیوس و حداقل درجه حرارت یک درجه سلسیوس که در بعضی از سال‌ها به یک تا دو درجه زیر صفر نیز می‌رسد.

زمین آزمایشی با انجام عملیات زراعی شامل شخم پاییزه و بهاره، دو دیسک عمودبرهم، تسطیح با لندولر و کوددهی براساس آزمون خاک (**جدول ۲**) به‌صورت ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار از منبع کود اوره به‌صورت تقسیط‌شده در دو مرحله، نیمی در مرحله آماده‌سازی زمین و مابقی به‌صورت جای‌گذاری کنار ردیف‌های کاشت قبل از گل‌دهی در مناطق جیرفت و کرج و ۸۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار در مغان به کار برده شد. همچنین ۵۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار از منبع کود سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم پتاسیم خالص در هکتار از منبع کود پتاسیم سولفات قبل از کاشت در هر سه منطقه استفاده گردید. جوی و پشته به فواصل ۶۰ سانتی‌متر تهیه شد. هر ژنوتیپ در سه خط ۱/۵ متری با فاصله دو بوته روی هر خط ۸-۷ سانتی‌متر کشت گردید. تاریخ کاشت در مناطق کرج و مغان در اواخر خرداد و در جیرفت در اواسط تیرماه بود. در طی فصل رشد، مراقبت‌های زراعی لازم از جمله آبیاری، مبارزه با آفات و علف‌های هرز انجام پذیرفت. دور آبیاری در منطقه کرج هر هشت روز یک بار، در جیرفت هر هفته و در مغان نیز هر ۱۰ روز یک بار صورت پذیرفت. اندازه‌گیری صفات با استفاده از پنج بوته تصادفی از وسط هر کرت با حذف حاشیه انجام پذیرفت. صفاتی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند، عبارت از تعداد روز از جوانه‌زنی تا شروع گل‌دهی، تعداد روز از جوانه‌زنی تا شروع رسیدگی، ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه، ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد کپسول‌های یک بوته، تعداد دانه در یک کپسول (میانگین دانه تعداد ۱۰ کپسول از ناحیه وسط شاخه اصلی در پنج بوته)، وزن دانه‌های یک کپسول (میانگین وزن دانه ۱۰ کپسول از ناحیه وسط شاخه اصلی در پنج بوته)، وزن هزار دانه، طول

روی عملکرد دانه تک بوته اشاره کرده‌اند (Kavitha & Sethupathi-Ramalingam, 2000; Arulmozhi, Santha, & Mohammed, 2001; Sankar & Kumar, 2003).

در یک مطالعه، هفتاد ژنوتیپ کنجد از نظر ۱۴ صفت بررسی و توسط تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، چهار مؤلفه اصلی (PCs) شناسایی شدند که تقریباً ۶۸/۶ درصد از کل تنوع را تشکیل می‌دادند. در مؤلفه اول صفات روز تا ۵۰ درصد گل‌دهی، ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه، ارتفاع گیاه تعداد روز تا رسیدگی، تعداد شاخه‌های ثانویه و عملکرد دانه دارای بالاترین ضرایب بودند. در مؤلفه دوم صفات تعداد کپسول در گیاه، تعداد محور برگ روی شاخه اصلی، طول کپسول و محتوی روغن دارای بالاترین ضرایب بودند. در مؤلفه سوم صفات تعداد روز تا جوانه‌زنی، تعداد روز تا پایان گل‌دهی، تعداد شاخه‌های ثانویه و طول کپسول دارای بالاترین ضرایب بودند. در مؤلفه چهارم نیز صفات تعداد شاخه‌های اولیه، طول کپسول و محتوی روغن دارای بالاترین ضرایب بودند (Mukthambica, Bisen, & Ramya, 2023). مطالعه دیگری، ۹۶ لاین کنجد را از نظر ۱۵ صفت مورد بررسی قرار داد و پنج مؤلفه اصلی شناسایی نمود که حدود ۶۴ درصد از کل تغییرات را تشکیل می‌دهند. در مؤلفه اول صفات ارتفاع گیاه، تعداد شاخه‌های اولیه، تعداد شاخه‌های ثانویه، تعداد شاخه‌های بارور در گیاه، تعداد کپسول در گیاه، تعداد کپسول در شاخه اصلی و عملکرد تک بوته دارای بالاترین ضرایب بودند. در مؤلفه دوم صفات وزن هزار دانه، محتوی روغن، عملکرد تک بوته و عملکرد در هکتار دارای بالاترین ضرایب بودند. در مؤلفه سوم صفات تعداد روز تا شروع گل‌دهی، تعداد روز تا رسیدگی، ارتفاع گیاه، تعداد شاخه‌های زایا، تعداد کپسول در روی شاخه اصلی، تعداد دانه در کپسول و محتوی روغن دارای بالاترین ضرایب بودند. در مؤلفه چهارم نیز صفات تعداد روز تا رسیدگی، تعداد کپسول روی شاخه اصلی، طول کپسول و وزن هزار دانه دارای بالاترین ضرایب بودند. در مؤلفه پنجم تعداد روز تا رسیدگی و طول میان‌گره دارای بالاترین ضرایب بودند (Hemanth et al., 2024).

هدف از این تحقیق، بررسی روابط بین صفات عملکرد دانه با برخی از صفات زراعی و تعیین ارقام مناسب از نظر عملکرد و دیگر صفات با استفاده از نمودار بای پلات و گروه‌بندی این لاین‌ها به‌منظور استفاده از آن‌ها در برنامه‌های به‌نژادی است که در سه منطقه کرج، مغان و جیرفت به‌مدت دو سال (۱۳۹۶-۱۳۹۷) کشت شدند.

مواد و روش‌ها

تعداد ۳۶ ژنوتیپ کنجد (دریافت‌شده از بانک ژن ملی مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر) در سه منطقه کرج، مغان و جیرفت

وسط شاخه اصلی در پنج بوته)، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه بودند. در پایان دوره رشد و پس از رسیدگی فیزیولوژیکی، عملکرد دانه هر ژنوتیپ برآورد و براساس کیلوگرم در هکتار گزارش شد.

کپسول (میانگین طول ۱۰ کپسول از ناحیه وسط شاخه اصلی در پنج بوته)، عرض کپسول (میانگین عرض ۱۰ کپسول از ناحیه وسط شاخه اصلی در پنج بوته)، قطر کپسول (میانگین قطر ۱۰ کپسول از ناحیه

جدول ۱- نام و مبدأ ژنوتیپ‌های مورد بررسی
Table 1- Name and origin of the studied genotypes

شماره ژنوتیپ	نام ژنوتیپ	مبدأ	شماره ژنوتیپ	نام ژنوتیپ	مبدأ
Genotype No.	Genotype name	Origin	Genotype No.	Genotype name	Origin
1	TN78-23	مازندران Mazandaran	20	TN78-440	فارس Fars
2	TN78-41	فلسطین اشغالی Palestine	21	TN78-446	فارس (سروستان) Fars (Sarvestan)
3	TN78-76	کرمان (جیرفت) Kerman (Jiroft)	22	TN78-449	فارس (داراب) Fars (Darab)
4	TN78-84	خراسان (طبس) Khorasan (Tabas)	23	TN78-464	فارس (زرقان) Fars (Zarqan)
5	TN78-159	بوشهر (دشتستان) Bushehr (Dashtestan)	24	TN78-551	مازندران Mazandaran
6	TN78-164	بوشهر (دشتستان) Bushehr (Dashtestan)	25	TN78-560	یزد Yazd
7	TN78-166	بوشهر (دشتستان) Bushehr (Dashtestan)	26	TN78-570	یزد Yazd
8	TN78-220	کرمان (جیرفت) Kerman (Jiroft)	27	TN78-572	یزد Yazd
9	TN78-229	هرمزگان (حاجی آباد) Hormozgan (Hajjiabad)	28	TN78-573	یزد Yazd
10	TN78-230	هرمزگان (حاجی آباد) Hormozgan (Hajjiabad)	29	TN78-714	زنجان Zanjan
11	TN78-66	خراسان (سبزوار) Khorasan (Sabzevar)	30	TN78-730	آذربایجان غربی West Azerbaijan
12	TN78-369	هرمزگان (بندرعباس) Hormozgan (Bandar Abbas)	31	داراب ۱ Darab1	
13	TN78-384	فارس (داراب) Fars (Darab)	32	دشتستان Dashtestan	
14	TN78-389	فارس (ارسنجان) Fars (Arsanjan)	33	هلیل Halil	
15	TN78-390	فارس (نی ریز) Fars (Neyriz)	34	ناز Naz	
16	TN78-393	کرمان (کرمان) Kerman (Kerman)	35	اولتان Oltan	
17	TN78-400	فارس (آباده) Fars (Abadeh)	36	یلووایت Yellow white	
18	TN78-415	فارس (زرقان) Fars (Zarqan)			
19	TN78-418	فارس (زرقان) Fars (Zarqan)			

ضرایب همبستگی ساده بین صفات و تجزیه خوشه‌ای با استفاده از نرم‌افزار SPSS، تجزیه علیت برای عملکرد دانه توسط نرم‌افزار Path74 و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از نرم‌افزار Stat Graphics به دست آمد.

نتایج مربوط به عملکرد دانه ارقام برای هر منطقه به‌طور جداگانه مورد تجزیه واریانس قرار گرفت و در ادامه عملکرد دانه ارقام برای کلیه مناطق و سال‌ها مورد تجزیه واریانس مرکب قرار گرفت. در نهایت، از میانگین کل داده‌های مناطق و سال‌ها استفاده شد و

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 2- Physical and chemical characteristics of the soil where the experiment was carried out

مناطق	عمق	درصد مواد آلی	درصد کل نیتروژن	پتاسیم	فسفر	روی	آهن	اسیدیته	هدایت الکتریکی	بافت
Locations	Depth (cm)	Organic materials %	Total N %	K (ppm)	P (ppm)	Zn (ppm)	Fe (ppm)	pH	EC (dS m ⁻¹)	Texture
کرج	0-30	0.40	0.09	198	11.5	0.38	2.12	7.5	1.1	Clay loam
Karaj	30-60	0.55	0.07	160	10.9	0.30	2.01	7.0	1.1	Clay loam
جیرفت	0-30	0.31	0.05	205	12.7	1.07	2.3	8.2	2.3	Sandy loam
Jiroft	30-60	0.34	0.06	212	12.2	1.02	2.21	7.8	2.1	Sandy loam
مغان	0-30	0.53	0.12	242	11.8	0.83	2.2	7.7	1.6	Loam clay
Moghan	30-60	0.58	0.14	251	11.1	0.78	2.12	7.2	1.5	Loam clay

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد نشان داد که بین سال‌ها، مکان‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف اختلاف معنی‌داری وجود داشت.

همبستگی

کپسول اغلب با بلوغ زودتر مرتبط است. این رابطه نشان می‌دهد که گیاهانی که منابع را به توسعه کپسول‌های بلندتر اختصاص می‌دهند، ممکن است سریع‌تر به بلوغ برسند. برعکس، گیاهانی که بالغ شدن آن‌ها بیشتر طول می‌کشد، ممکن است به دلیل راهبردهای تخصیص منابع مختلف یا زمینه‌های ژنتیکی، کپسول‌های کوتاه‌تری داشته باشند (Durge et al., 2022).

صفت عرض کپسول همبستگی‌های مثبت و معنی‌داری با صفات طول کپسول ($R^2=0.32$)، قطر کپسول ($R^2=0.31$) و وزن هزار دانه ($R^2=0.25$) داشت. قطر کپسول نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفات طول ($R^2=0.31$) و عرض کپسول ($R^2=0.31$) نشان داد. همبستگی عرض کپسول در کنگد با صفات دیگر از جمله طول کپسول، ضخامت کپسول و وزن هزار دانه در تحقیقات دیگر نیز گزارش شده است و نشان می‌دهد که عرض کپسول به‌طور مثبت با طول کپسول و تعداد دانه در کپسول مرتبط است که عوامل حیاتی برای بهبود عملکرد دانه در برنامه‌های اصلاحی کنگد هستند (Kante et al., 2022; Kalaiyarasi et al., 2019).

ارتفاع گیاه همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفات وزن خشک اندام‌های هوایی ($R^2=0.27$) و عملکرد دانه ($R^2=0.16$) داشت. همچنین ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه همبستگی مثبت و معنی‌داری با روز تا شروع گل‌دهی ($R^2=0.19$) و عملکرد دانه ($R^2=0.35$) داشت. تحقیقات نشان داده است که برخی از ژنوتیپ‌های کنگد ارتفاع بیشتری از خود نشان می‌دهند که می‌تواند بر تولید کلی آن‌ها تأثیر بگذارد (Teklu, Shimelis, & Abady, 2022). به‌عنوان مثال، در یک تحقیق ژنوتیپ‌های PI-154304 و PI-175907 نه‌تنها

ضرایب همبستگی فنوتیپی صفات اندازه‌گیری‌شده روی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نشان داد که بین تعداد کپسول در بوته با صفت تعداد شاخه فرعی همبستگی مثبت ($R^2=0.24$) و معنی‌داری وجود دارد (جدول ۳). محققان دیگر نیز بین تعداد کپسول در بوته و تعداد شاخه در بوته همبستگی مثبت و معنی‌دار گزارش کرده‌اند (Kalaiyarasi et al., 2019; Yol et al., 2010). تعداد کپسول در بوته به‌عنوان یک صفت اصلی جهت انتخاب ژنوتیپ‌های پرمحصول به‌شمار می‌آید و با افزایش تعداد شاخه‌های ثانویه، پتانسیل برای کپسول‌های بیشتر افزایش می‌یابد که برای بهبود عملکرد دانه بسیار مهم است (Durge, Geethanjali, & Sasikala, 2022; Hemanth et al., 2024). این روابط نشان می‌دهد که انتخاب برای افزایش شاخه‌های جانبی می‌تواند منجر به تولید کپسول بیشتر شود (Hemanth et al., 2024; Baraki et al., 2020).

بین صفت طول کپسول با صفات عرض کپسول ($R^2=0.32$) و قطر کپسول ($R^2=0.31$) همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد و همچنین همبستگی منفی و معنی‌داری بین طول کپسول و روز تا شروع رسیدگی ($R^2=0.21$) به دست آمد. در کنگد، بیشتر بودن طول

با افزایش وزن دانه در کپسول، وزن هزار دانه افزایش می‌یابد، یعنی با افزایش تعداد دانه در کپسول، وزن آن نیز افزایش می‌یابد (Kante et al., 2022; Emamgholizadeh, Parsaeian, & Baradaran, 2015) و چنین ارتباطی بین وزن دانه در کپسول و وزن هزار دانه در تحقیق حاضر مشاهده نشد.

وزن هزار دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفت عرض کپسول ($R^2=0.25$) داشت. تحقیقات نشان می‌دهد که وزن هزار دانه به‌طور قابل توجهی با صفات ریخت‌شناختی مختلف از جمله عرض کپسول مرتبط است. این رابطه نشان می‌دهد که افزایش عرض کپسول می‌تواند باعث این شود که تعداد دانه‌های بیشتر یا دانه‌های بزرگ‌تری در یک کپسول قرار گیرند و در نتیجه وزن کلی دانه افزایش یابد (Kante et al., 2022; Wang et al., 2024).

به ارتفاع قابل توجهی (بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر) رسیدند، بلکه عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه بالاتری را نشان دادند (Ahmed et al., 2023). سازوکارهای فیزیولوژیکی زیربنایی این همبستگی‌ها می‌تواند شامل تخصیص منابع و کارایی فتوسنتزی باشد. گیاهان بلندتر معمولاً سطح برگ بیشتری دارند که می‌تواند فتوسنتز و در نتیجه تجمع زیست‌توده را افزایش دهد. این افزایش زیست‌توده می‌تواند منجر به گیاهان سنگین‌تر و کپسول‌های وسیع‌تر شود، زیرا منابع بیشتری برای رشد در دسترس است (Durge et al., 2022; Aye et al., 2024). صفت وزن دانه در کپسول همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفت تعداد دانه در کپسول ($R^2=0.59$) و عملکرد دانه ($R^2=0.25$) داشت. انتظار این است که با افزایش تعداد دانه در کپسول باید وزن دانه‌ها کمتر شود، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، چنین رابطه‌ای در این تحقیق مشاهده نشد. همچنین محققان دیگری نیز گزارش داده‌اند که

جدول ۳- نتایج همبستگی ساده بین صفات

Table 3- Results of simple correlation between traits

	NCP	CL	CW	CD	PH	FCH	SWC	TSW	NSC	NB	PW	DF	DM	SY
NCP	1.00													
CL	0.07	1.00												
CW	0.21	0.57**	1.00											
CD	0.34*	0.56**	0.56**	1.00										
PH	-0.05	-0.22	-0.20	-0.06	1.00									
FCH	-0.06	0.11	0.14	-0.23	0.07	1.00								
SWC	-0.02	-0.01	0.06	-0.11	0.09	0.16	1.00							
TSW	0.18	0.15	0.50**	0.39*	0.25	0.00	0.08	1.00						
NSC	0.08	-0.20	-0.15	-0.30	0.16	0.06	0.77**	-0.06	1.00					
NB	0.49**	-0.26	-0.07	0.05	0.22	-0.05	0.09	0.20	0.21	1.00				
PW	0.00	0.28	0.36*	0.25	0.52**	0.31	0.21	0.39*	-0.01	0.11	1.00			
DF	-0.09	-0.30	-0.29	-0.47**	0.07	0.44**	-0.24	-0.06	-0.05	-0.11	-0.18	1.00		
DM	0.24	-0.46**	-0.29	-0.46**	0.23	0.07	-0.17	0.11	0.24	0.25	-0.29	0.64**	1.00	
SY	-0.05	0.01	0.08	-0.11	0.40*	0.59**	0.50**	0.11	0.46**	0.16	0.49**	0.06	-0.05	1.00

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد

NCP: تعداد کپسول‌های یک بوته، CL: طول کپسول، CW: عرض کپسول، CD: قطر کپسول، PH: ارتفاع بوته، FCH: ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه، SWC: وزن دانه‌های یک کپسول، TSW: وزن هزار دانه، NSC: تعداد دانه در یک کپسول، NB: تعداد شاخه‌های فرعی در یک بوته، PW: وزن یک بوته (عملکرد بیولوژیک)، DF: تعداد روز تا شروع گل‌دهی، DM: تعداد روز تا شروع رسیدگی، SY: عملکرد دانه

*and **: significant at the five and one percent levels, respectively.

NCP: number of capsules per plant, CL: capsule length, CW: capsule width, CD: capsule diameter, PH: plant height, FCH: first capsule height from crown, SWC: seeds weight in one capsule, TSW: 1000 seeds weight, NSC: number of seeds in one capsule, NB: number of branches in one plant, PW: plant weight (biological performance), DF: number of days to flowering, DM: number of days to maturity, SY: seed yield

تجزیه علیت

برای تفسیر واضح‌تر و دقیق‌تر نتایج به‌دست‌آمده از همبستگی ساده بین صفات، تجزیه علیت برای عملکرد دانه انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. برای عملکرد دانه با توجه به نتایج چنین بر می‌آید که ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه، تعداد دانه در کپسول و ارتفاع بوته بیشترین اثر مستقیم مثبت و تعداد روز تا شروع رسیدگی بیشترین اثر مستقیم منفی را دارد.

محققان دیگر نیز گزارش داده‌اند که ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه و ارتفاع کلی گیاه بیشترین تأثیر مثبت مستقیم را بر عملکرد دانه دارند. این نشان می‌دهد که گیاهان بلندتر با کپسول‌های بالاتر احتمالاً دانه‌های بیشتری تولید می‌کنند که نشان‌دهنده رابطه قوی بین ریخت‌شناسی گیاه و موفقیت تولیدمثل است (Bitaraf, Khodambashi, & Houshmand, 2010). ارتفاع بوته به‌طور مداوم یک همبستگی مثبت با عملکرد دانه نشان می‌دهد و بر اهمیت

شاخه‌ها و کپسول‌های بیشتری را پشتیبانی کنند (Navaneetha et al., 2018; Sasipriya, 2019; al., 2019). افزایش ارتفاع بوته باعث افزایش سطح برگ شده که می‌تواند منجر به بهبود ظرفیت فتوسنتزی و تولید دانه بیشتر شود (Sabag, Pnini, Morota, & Peleg, 2024; Ranganatha et al., 2010).

تعداد دانه تولیدشده در هر کپسول یکی از عوامل تعیین‌کننده عملکرد در کنجد است. افزایش تعداد دانه در هر کپسول به‌طور مستقیم تولید کل دانه را افزایش می‌دهد، زیرا تعداد دانه بیشتر در بوته منجر به عملکرد کلی بالاتر می‌شود. تغییرات در ژنوتیپ‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر این صفت تأثیر بگذارد، به‌طوری‌که برخی از واریته‌ها دانه‌های بیشتری نسبت به بقیه تولید می‌کنند (Ahmed et al., 2022; Yadav et al., 2023; al., 2023). تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش تعداد دانه در هر کپسول می‌تواند عملکرد کلی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Ranganatha et al., 2010; Ferreira et al., 2017).

آن در انتخاب‌های اصلاحی تأکید شده است (Kante et al., 2022; Khairmar & Monpara, 2013).

ارتفاعی که اولین کپسول در آن تشکیل می‌شود برای به حداکثر رساندن عملکرد دانه بسیار مهم است. قرار گرفتن کپسول در قسمت‌های بالاتر می‌تواند تلفات ناشی از خطر آسیب در حین برداشت را کاهش دهد و اجازه نفوذ نور و دسترسی بهتر به نور خورشید و کاهش رقابت برگ‌های پایین‌تر را می‌دهد (Kumar, Sinha, 2024; Gedifew, 2024; Sinha, Singh, & Singh, 2022). ارتفاع اولین کپسول با عملکرد دانه همبستگی مثبت دارد که نشان می‌دهد کپسول‌های بالاتر ممکن است به عملکرد بهتر منجر شود (Navaneetha, Murugan, & Parameswari, 2019; Ramazani, 2016). مطالعات نشان می‌دهد که شیوه‌های کاشت بهینه می‌تواند ارتفاع اولین کپسول را تغییر داده و منجر به عملکرد کلی بهتر شود (Nadeem et al., 2015; Ferreira, Pereira, 2008; Macedo, & Soares, 2017; Langham et al., 2008).

گیاهان بلندتر تمایل به تولید زیست‌توده بیشتر داشته که می‌تواند

جدول ۴- نتایج تجزیه علیت برای عملکرد دانه

Table 4- Results of path analysis for grain yield

Table 4. Results of path analysis for grain yield														
اثر مستقیم Direct effect		NCP	CL	CW	CD	PH	FCH	SWC	TSW	NSC	NB	PW	DF	DM
NCP	-0.04	.....	-0.01	0.01	0.01	-0.02	-0.03	0.00	0.01	0.04	0.05	0.00	-0.01	-0.08
CL	-0.06	0.00	.....	0.02	0.02	-0.06	0.06	0.00	0.01	-0.10	-0.03	0.02	-0.02	0.14
CW	0.04	-0.01	-0.03	.....	0.02	-0.06	0.07	0.00	0.02	-0.07	-0.01	0.03	-0.02	0.09
CD	0.03	-0.01	-0.03	0.02	.....	-0.02	-0.12	0.01	0.02	-0.15	0.01	0.02	-0.02	0.14
PH	0.27	0.00	0.01	-0.01	0.00	.....	0.04	-0.01	0.01	0.08	0.02	0.04	0.00	-0.07
FCH	0.53	0.00	-0.01	0.01	-0.01	0.02	.....	-0.01	0.00	0.03	-0.01	0.03	0.02	-0.02
SWC	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.08	.....	0.00	0.38	0.01	0.02	-0.01	0.05
TSW	0.05	-0.01	-0.01	0.02	0.01	0.07	0.00	-0.01	.....	-0.03	0.02	0.03	0.00	-0.03
NSC	0.50	0.00	0.01	-0.01	-0.01	0.04	0.03	-0.05	0.00	.....	0.02	0.00	0.00	-0.07
NB	0.10	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.06	-0.03	-0.01	0.01	0.11	.....	0.01	-0.01	-0.08
PW	0.09	0.00	-0.02	0.02	0.01	0.14	0.17	-0.01	0.02	-0.01	0.01	.....	-0.01	0.09
DF	0.05	0.00	0.02	-0.01	-0.01	0.02	0.23	0.01	0.00	-0.03	-0.01	-0.02	.....	-0.20
DM	-0.31	-0.01	0.03	-0.01	-0.01	0.06	0.04	0.01	0.01	0.12	0.02	-0.03	0.03	.....
اثر باقی مانده Residual effect			0.55											

NCP: تعداد کپسول‌های یک بوته، CL: طول کپسول، CW: عرض کپسول، CD: قطر کپسول، PH: ارتفاع بوته، FCH: ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه، SWC: وزن دانه‌های یک کپسول، TSW: وزن هزار دانه، NSC: تعداد دانه در یک کپسول، NB: تعداد شاخه‌های فرعی در یک بوته، PW: وزن یک بوته (عملکرد بیولوژیک)، DF: تعداد روز تا شروع گل‌دهی، DM: تعداد روز تا شروع رسیدگی، SY: عملکرد دانه

NCP: number of capsules per plant, CL: capsule length, CW: capsule width, CD: capsule diameter, PH: plant height, FCH: first capsule height from crown, SWC: seeds weight in one capsule, TSW: 1000 seeds weight, NSC: number of seeds in one capsule, NB: number of branches in one plant, PW: plant weight (biological performance), DF: number of days to flowering, DM: number of days to maturity, SY: seed yield

کیفیت و کمیت محصول را کاهش دهد (Sabag et al., 2024; Islam, Sultana, Rashid, & Rahim, 2024). علاوه بر این، دوره‌های رشد طولانی‌مدت ممکن است منجر به استفاده ناکارآمد از منابع شود، به‌ویژه در محیط‌هایی که شرایط رشد بهینه به‌طور مداوم

جالب توجه است که تعداد روز تا رسیدگی اثر مستقیم منفی بر عملکرد دانه نشان داد. تحقیقات نشان داده است که دوره‌های رسیدگی طولانی‌تر می‌تواند منجر به افزایش حساسیت به شرایط نامساعد جوی، آفات و بیماری‌ها شود که در نهایت ممکن است

در دسترس نیست (Ranganatha et al., 2010). مدت زمان رسیدگی طولانی‌تر می‌تواند برداشت را به تأخیر بیندازد و عملکرد دانه را کاهش دهد، همان‌طور که در چندین مطالعه نیز همبستگی‌های منفی بین این صفات گزارش شده است (Ramazani, 2016; Khairnar & Monpara, 2013).

در این تحقیق، اثرات باقی‌مانده برای تجزیه علیت عملکرد دانه بالا بود (۰/۵۵) که نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که صفات مهم دیگری نیز بر عملکرد دانه تک بوته تأثیرگذار هستند که در تجزیه علیت وارد نشده‌اند و گنجاندن این صفات می‌تواند به درک جامع‌تری از عوامل تعیین‌کننده عملکرد دانه منجر شود. این نتیجه با نتایج محققان دیگر مطابق است (Sumathi, Muralidharan, & Manivannan, 2007; Goudappagoudra, Lokesh, & Ranganatha, 2010).

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

نتایج تجزیه به مؤلفه‌ها نشان داد که در ژنوتیپ‌های مورد بررسی پنج مؤلفه که دارای ریشه مشخصه بزرگ‌تر از یک بود، در مجموع ۷۷/۹۲ درصد از کل واریانس متغیرها را توجیه می‌کنند (جدول ۵). به‌طور کلی با توجه به نتایج، در مؤلفه اصلی اول صفات عملکرد دانه، وزن دانه‌های یک کپسول، تعداد دانه در یک کپسول، تعداد شاخه فرعی، وزن خشک اندام هوایی و روز تا شروع رسیدگی دارای ضرایب مثبت بالایی بودند. بسیاری از صفات مورد تجزیه و تحلیل به هم مرتبط هستند و به‌طور جمعی به عملکرد و عملکرد کلی گیاه کنجد کمک می‌کنند. به‌عنوان مثال، عملکرد دانه در بوته اغلب تحت تأثیر تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در هر کپسول است که نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین این متغیرها است. ارتفاع بوته می‌تواند بر ارتفاع اولین کپسول و وزن خشک شاخه‌ها تأثیر بگذارد، زیرا گیاهان بلندتر ممکن است شاخه‌ها و کپسول‌های بیشتری را دارا باشند. این همبستگی‌ها اجازه می‌دهد تا این صفات با هم در یک مؤلفه اصلی گروه‌بندی شوند و بخش قابل توجهی از واریانس مجموعه داده‌ها را توضیح دهد (Gupta, Muralia, Khandelwal, & Nehra, 2021). در یک مطالعه، اولین مؤلفه اصلی دارای بارهای مثبت بالا برای عملکرد دانه در بوته و صفات مرتبط مانند طول کپسول‌های بارور و دانه در هر کپسول بود که نشان می‌دهد این صفات با اینکه نسبت به هم متفاوت هستند، اما می‌توانند بیان‌کننده یک مؤلفه منفرد باشند (Sasipriya, 2018). نتایج این مؤلفه تقریباً مشابه مؤلفه اول اکبر و همکاران (Akbar, Rabbani, Shinwari, & Khan, 2011) و منظیر (Menzir, 2012) می‌باشد.

در مؤلفه دوم صفات طول و عرض و ضخامت یک کپسول به همراه وزن هزار دانه دارای بالاترین ضرایب بودند که بالا بودن ضرایب این صفات نیز عادی بود، زیرا با افزایش طول و عرض و

ضخامت، تعداد دانه‌های بیشتر و با اندازه بزرگ‌تر مشاهده می‌شود و در نتیجه وزن هزار دانه افزایش خواهد یافت. ابعاد کپسول شامل طول، عرض و ضخامت کپسول برای تعیین اندازه و شکل بذریه‌ای هستند که به‌طور مستقیم بر عملکرد تأثیر می‌گذارند (Mei et al., 2023). وزن کپسول‌ها ارتباط نزدیکی با عملکرد دانه دارد، زیرا کپسول‌های سنگین‌تر معمولاً حاوی دانه‌های بیشتری هستند (Adebisi, 2004). مطالعات سایر محققان نیز نشان داده است که صفات مرتبط با کپسول بخش قابل توجهی از تنوع ژنتیکی کنجد را تشکیل می‌دهند و آن‌ها را به شاخص‌های قابل اعتمادی برای انتخاب در برنامه‌های اصلاحی تبدیل می‌کند (Adebisi, 2004).

در مؤلفه سوم صفات روز تا شروع گل‌دهی و ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه با علامت مثبت و صفات تعداد کپسول در بوته و تعداد شاخه فرعی با علامت منفی دارای بالاترین ضرایب بودند. در کنجد، صفاتی مانند زمان گل‌دهی و ارتفاع کپسول ممکن است به‌دلیل وابستگی‌های متقابل بیولوژیکی آن‌ها همبستگی قوی نشان دهند. به‌عنوان مثال، زود گل‌دهی می‌تواند بر سرعت رشد و توسعه کپسول‌ها تأثیر بگذارد، بنابراین این دو صفت را در یک مؤلفه وارد می‌شوند (Mukthambica et al., 2023; Durge et al., 2022). در چندین مطالعه، تعداد روز تا گل‌دهی و ارتفاع بوته در یک مؤلفه قرار گرفتند و تأثیر جمعی آن‌ها بر عملکرد دانه برجسته شده است (Hemanth et al., 2024; Sonaniya, Bisen, & Sonaniya, 2023). ارتباط مثبتی بین زودگل‌دهی و عملکرد بیشتر دانه توسط محققان دیگر گزارش شده است (Ezhilarasi, Mahalingam, & Manivannan, 2024).

در مؤلفه چهارم صفات وزن دانه در کپسول، تعداد دانه در کپسول و طول و عرض کپسول با علامت منفی و روز تا شروع رسیدگی و تعداد شاخه فرعی با علامت مثبت دارای بالاترین ضرایب بودند. مؤلفه پنجم شامل صفات تعداد کپسول در بوته، روز تا رسیدگی و ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه با علامت منفی و وزن خشک اندام هوایی و ارتفاع بوته با علامت مثبت دارای ضرایب بالایی بودند. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد که صفاتی که با هم همبستگی مثبت دارند، ممکن است در یک مؤلفه اصلی با علائم متفاوت از هم قرار گیرند که می‌تواند به‌دلیل روابط متقابل پیچیده بین صفات باشد. این پدیده به این دلیل اتفاق می‌افتد که تجزیه به مؤلفه‌های اصلی واریانس داده‌ها را ثبت می‌کند و امکان شناسایی الگوهای اساسی را فراهم می‌کند که ممکن است با همبستگی‌های مستقیم همسو نباشند. در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، صفاتی مانند روز تا گل‌دهی و بلوغ علی‌رغم ارتباط مثبت آن‌ها با عملکرد دانه، علامت منفی را در یک مؤلفه ممکن است گرفته باشند. این روابط نشان‌دهنده این مطلب می‌تواند باشد که در عین حال که این صفات به‌طور مثبت به عملکرد کمک می‌کنند، ممکن است زمان‌بندی آن‌ها

بر پویایی رشد کلی تأثیر معکوس بگذارد (Ezhilarasi et al., 2024).
معمولاً در برنامه‌های اصلاحی بیشتر توجه محققان روی صفت عملکرد می‌باشد، یعنی هدف برنامه‌های اصلاحی این است که با تغییر و اصلاح صفات دیگر که ارتباط نزدیکی با عملکرد دارند، بتوانند صفت عملکرد را بهبود ببخشند. در هر مؤلفه با توجه به جداول مشاهده می‌شود که اکثراً صفاتی که بیشترین ضرائب همبستگی را با هم داشته‌اند، در مؤلفه مورد نظر قرار گرفته‌اند و از این صفات می‌توان در انتخاب غیرمستقیم استفاده نمود و انتظار می‌رود که آن مؤلفه نیز با این روش اصلاح شود.

جدول ۵- نتایج تجزیه به مؤلفه‌ها برای کلیه صفات مورد اندازه‌گیری در لاین‌های بومی مورد بررسی

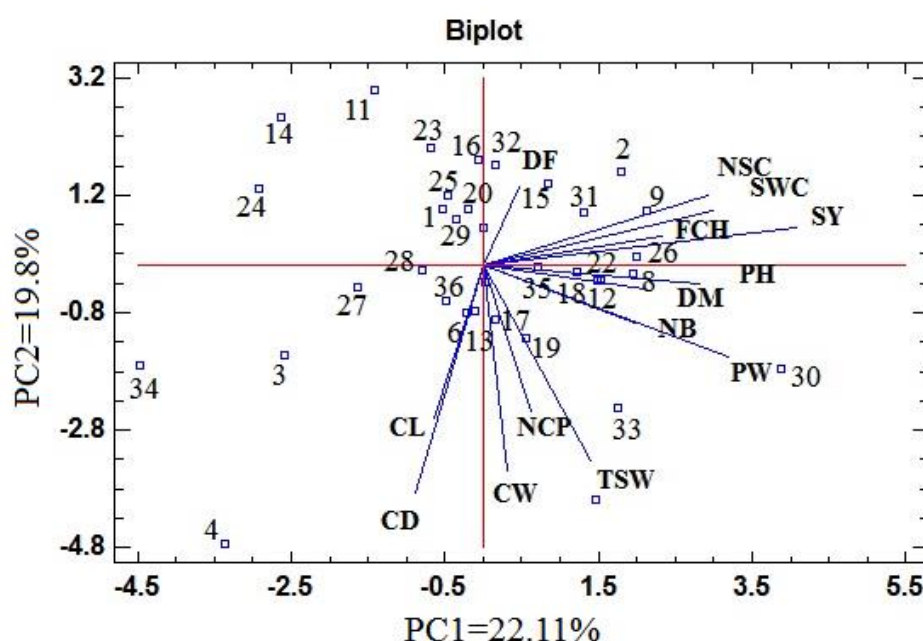
Table 5- The results of principal components analysis for all the traits measured in the studied native lines

صفات Traits	مؤلفه اول First principal	مؤلفه دوم Second principal	مؤلفه سوم Third principal	مؤلفه چهارم Fourth principal	مؤلفه پنجم Fifth principal
عملکرد دانه Seed yield	0.49*	0.08	0.16	-0.05	-0.06
تعداد کپسول در بوته Number of capsules/plant	0.08	-0.32*	-0.30*	0.17	-0.40*
طول کپسول Capsule length	-0.08	-0.34*	0.27	-0.25	-0.20
عرض کپسول Capsule width	0.04	-0.45*	0.18	-0.23	-0.17
ضخامت کپسول Capsule diameter	-0.11	-0.50*	-0.05	-0.04	0.05
ارتفاع بوته Plant height	0.34*	-0.04	0.01	0.19	0.57*
ارتفاع اولین کپسول از طوقه گیاه First capsule height from crown	0.28*	0.07	0.46*	0.02	-0.30*
وزن دانه‌ها در کپسول Seeds weight in one capsule	0.36*	0.12	-0.17	-0.48*	-0.09
وزن هزار دانه 1000 seeds weight	0.17	-0.43*	0.05	-0.04	0.22
تعداد دانه در کپسول Number of seeds in one capsule	0.35*	0.15	-0.28	-0.42*	-0.14
تعداد شاخه فرعی Number of branches in one plant	0.24*	-0.13	-0.40*	0.33	-0.12
وزن خشک اندامهای هوایی Plant weight	0.38*	-0.20	0.23	0.12	0.31*
روز تا شروع گل‌دهی Number of days to flowering	0.06	0.17	0.46*	0.31*	-0.27
روز تا شروع رسیدگی Number of days to maturity	0.25*	-0.05	-0.17	0.44*	-0.31*
مقدار ویژه Eigen value	3.09	2.77	2.07	1.62	1.36
درصد واریانس Percentage of variance	22.11	19.80	14.76	11.56	9.70
درصد تجمعی واریانس Cumulative percentage of variance	22.11	41.90	56.66	68.22	77.92

به‌عنوان مثال، برای صفت عملکرد دانه با توجه به شکل در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی، ژنوتیپ‌های شماره ۳۰، ۹ و ۲۶ (به ترتیب ۷۸-۷۳۰، ۷۸-۲۲۹ و ۷۸-۵۷۰) دارای بالاترین تصویرهای مثبت برای این صفت بوده و بنابراین می‌توان آن‌ها را به‌عنوان ارقام با عملکرد بالا در شکل حاصل از مؤلفه اول و دوم انتخاب نمود. به همین صورت، ژنوتیپ‌های شماره ۳۴، ۴ و ۳ (به ترتیب ناز، ۷۸-۸۴ و ۷۸-۷۶) دارای بیشترین تصویرهای، اما در جهت عکس برای صفت عملکرد بوده و در نتیجه عملکرد دانه پایینی در شکل حاصل از مؤلفه اول و دوم دارند.

محققان می‌توانند با مجتمع کردن چندین صفت همبسته به مؤلفه‌های اصلی کمتر، مجموعه داده‌های پیچیده را ساده‌سازی کنند و شناسایی ژنوتیپ‌هایی با ویژگی‌های مطلوب برای برنامه‌های اصلاحی را آسان‌تر کنند. این رویکرد، انتخاب غیرمستقیم برای بهبود صفات عملکرد را براساس امتیاز مؤلفه‌ها به جای ارزیابی هر صفت به‌صورت جداگانه تسهیل می‌کند (Mukthambica et al., 2023; Ahmed et al., 2023). این روش نه تنها به درک تنوع ژنتیکی کمک می‌کند، بلکه کارایی انتخاب را در برنامه‌های اصلاح کنجد افزایش می‌دهد.

شکل ۱ محل قرارگیری صفات مختلف و ژنوتیپ‌های مورد بررسی را در پلات حاصل از مؤلفه اول و دوم نشان می‌دهد و همان‌طور که مشخص است، جهت نمودارها برای صفات مرتبط با هم در یک جهت و همسو بوده و برای صفاتی که رابطه عکس با یکدیگر دارند، غیرهمسو می‌باشد. به‌عنوان مثال، صفات تعداد دانه در یک کپسول، وزن دانه‌های یک کپسول، عملکرد دانه و ارتفاع اولین غلاف از طوقه گیاه در یک جهت قرار گرفته‌اند و همچنین صفات طول، عرض و قطر یک کپسول هم جهت با هم هستند. با توجه به این شکل می‌توان ژنوتیپ‌های مختلف را با توجه به صفات مختلف انتخاب کرد. بدین صورت که از صفت مربوطه خطی به مبدا مختصات رسم کرده و سپس خط دیگری که از مبدا مختصات رد شود و عمود بر این خط باشد، رسم شود و ژنوتیپ‌هایی که بالاترین تصویر را روی خط اول داشته باشند و در سمت قرارگیری صفت مورد نظر نسبت به خط عمود باشند دارای بالاترین مقدار در رابطه با آن صفت بوده و ژنوتیپ‌هایی که بالاترین تصویر را روی خط اول داشته باشند و در سمت عکس قرارگیری صفت مورد نظر نسبت به خط عمود باشند دارای کمترین مقدار در رابطه با آن صفت خواهند بود.



شکل ۱- بای پلات عامل اول و دوم حاصل از تجزیه به مؤلفه‌ها برای لاین‌های محلی مورد بررسی و محل لاین‌های قرار گرفته در آن
Figure 1- The biplot of the first and second component resulting from the principal components analysis for the studied local lines

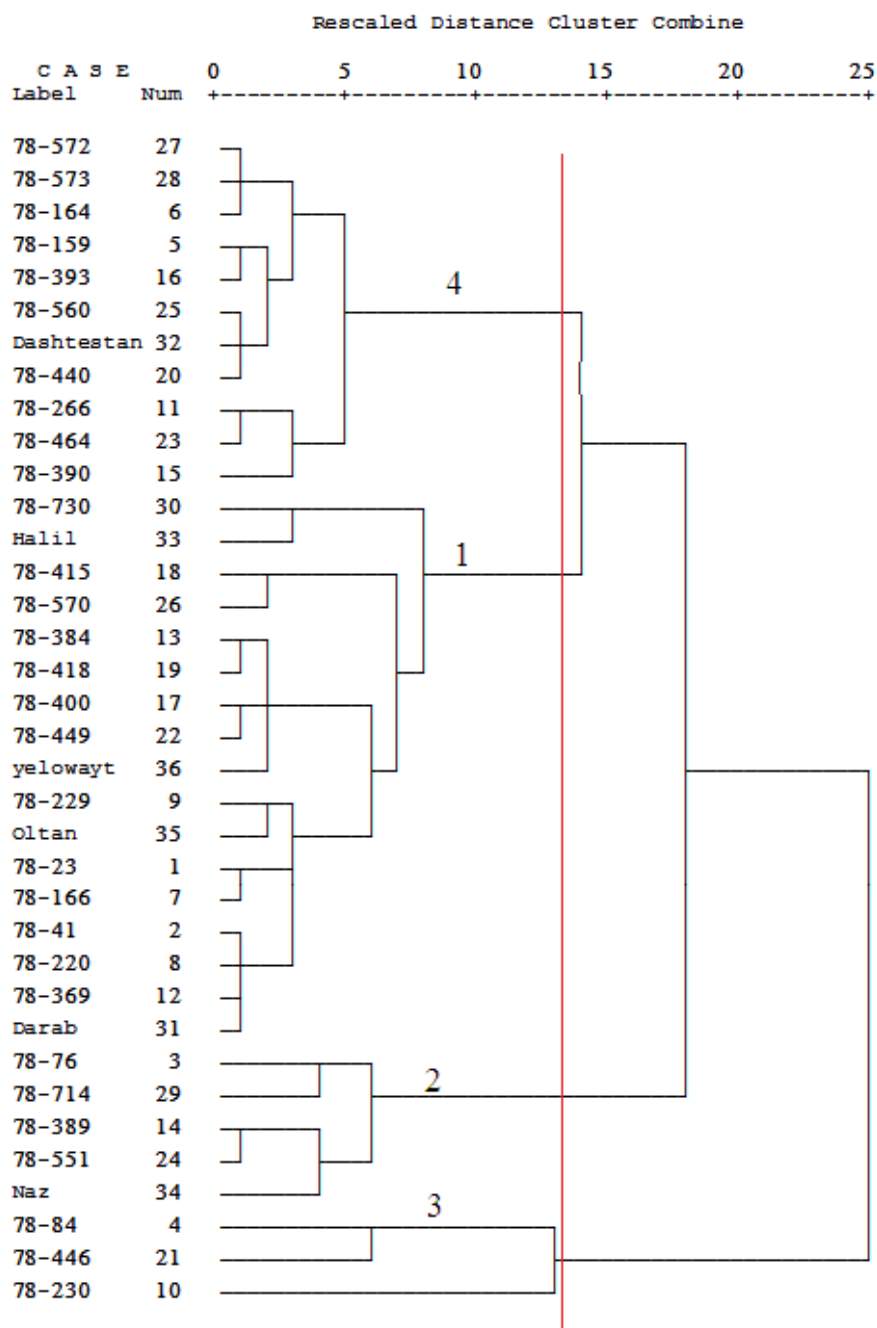
تجزیه خوشه‌ای

تجزیه خوشه‌ای براساس کلیه صفات با استفاده از اندازه‌گیری فاصله اقلیدسی و با استفاده از روش وارد (Masoudi & Ahmadi, 2019) و با استاندارد سازی داده‌ها (Z-score) انجام شد و انتخاب

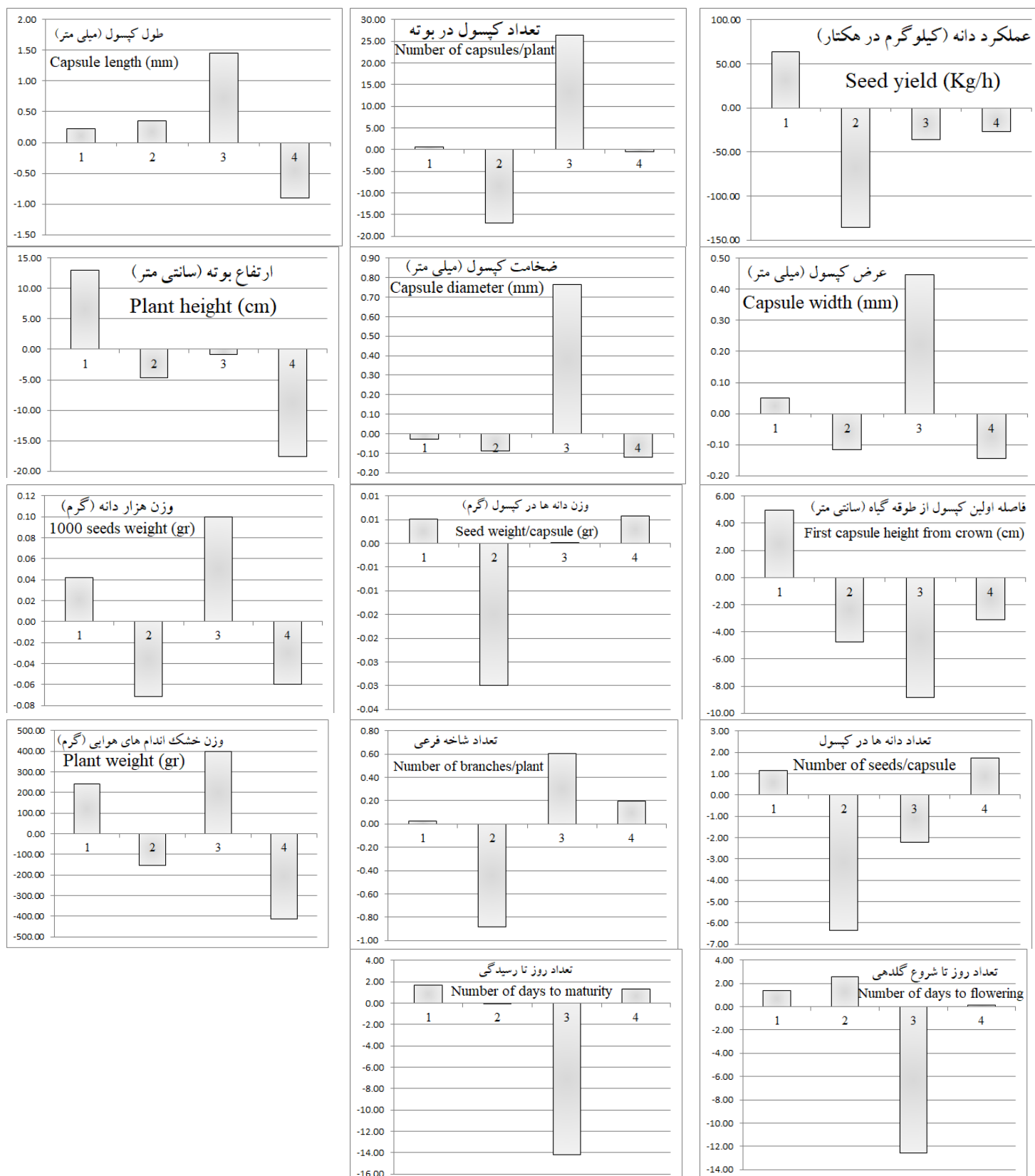
نقطه برش براساس تجزیه واریانس صورت گرفت و در نهایت چهار گروه براساس دندوگرام حاصله انتخاب شدند (شکل ۲). برای مشخص شدن اندازه هر یک از صفات مورد بررسی در هر یک از گروه‌ها، میانگین هر گروه برای هر صفت و مقدار اختلاف آن از

به‌عنوان والدین تلاقی‌ها مد نظر قرار گیرند. خوشه یک شامل ۱۷ ژنوتیپ می‌شد. این خوشه از نظر عملکرد دانه، ارتفاع بوته، فاصله اولین کپسول از طوقه گیاه و تعداد روز تا رسیدگی بیشترین مقدار را در بین خوشه‌ها به خود اختصاص داده بود (شکل ۳).

میانگین جامعه اصلی در همان صفت محاسبه شد (شکل ۳). بدین ترتیب، هرجا که میانگین صفت در یک گروه از میانگین کل جامعه در آن صفت بالاتر باشند، آن گروه ارزش بیشتری از نظر انتخاب والدین دارد. در نهایت دو گروهی که بیشترین فاصله را از هم داشته باشند، ژنوتیپ‌های آن گروه‌ها می‌توانند برای دستیابی به هتروزیس بیشتر



شکل ۲- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای لاین‌های محلی کنجد مورد بررسی
Figure 2- Dendrogram resulting from the cluster analysis of studied local sesame lines



شکل ۳- انحراف هر خوشه از میانگین کل برای صفات مختلف در گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای

Figure 3- Deviation of each cluster from the total mean for different traits in the groups resulting from cluster analysis

عوامل جغرافیایی ممکن است همچنان در چشم‌انداز ژنتیکی کلی، به‌ویژه از نظر سازگاری‌های محیطی نقش داشته باشند. ژنوتیپ‌ها به پنج گروه طبقه‌بندی شدند که تأیید می‌کند که تجزیه خوشه‌ای به‌طور مؤثری تنوع ژنتیکی را براساس تنوع صفت منعکس می‌کند (Masoudi & Ahmadi, 2019).

یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب والدین متنوع برای اصلاح باید بر فاصله ژنتیکی متمرکز شود تا منشأ جغرافیایی، زیرا ممکن است اثرات هتروزیس در برنامه‌های هیبریداسیون را افزایش دهد (Ashfaq, Rani, Padmaja, Yadav, & Betha, 2023). محققان استدلال می‌کنند که منشأ جغرافیایی هنوز می‌تواند در انتخاب اولیه ژنوتیپ‌ها نقش داشته باشد، زیرا مناطق خاصی ممکن است صفات خاصی را که برای شرایط محلی مفید هستند، تطبیق داده باشند. بااین‌حال، شواهد حاصل از تجزیه و تحلیل‌های خوشه‌ای نشان می‌دهد که تنوع ژنتیکی از مرزهای جغرافیایی فراتر می‌رود و پیچیدگی اصلاح کنگد را برجسته می‌کند.

نتیجه‌گیری

کنجد دارای تنوع ژنتیکی قابل توجهی در صفات مختلف زراعی از جمله عملکرد دانه، ارتفاع بوته و تعداد شاخه در بوته است. این تنوع برای انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب در برنامه‌های اصلاحی ضروری است. شناسایی اینکه کدام صفات بیشتر بر عملکرد تأثیرگذار هستند به اصلاحگران اجازه می‌دهد تا بر روی آن‌هایی تمرکز کنند که بهره‌وری کلی انتخاب را افزایش دهند. اصلاحگران نبات با تمرکز بر صفات خاصی که به‌طور قابل توجهی بر عملکرد تأثیر می‌گذارند مانند تعداد کپسول در هر بوته و ارتفاع بوته می‌توانند راهبردهای هدفمندی را اجرا کنند که احتمال دستیابی به واریته‌های پرمحصول را افزایش می‌دهد. این رویکرد، خطر انتخاب ژنوتیپ‌هایی را که تحت شرایط محیطی مختلف عملکرد خوبی ندارند، به حداقل می‌رساند. در تحقیقات مختلف، هر دو روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر براساس صفات خاص مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای مثال، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی می‌تواند صفات کلیدی را برجسته کند که به تنوع عملکرد کمک می‌کنند، درحالی‌که تجزیه خوشه‌ای می‌تواند ژنوتیپ‌ها را در گروه‌هایی دسته‌بندی کند که ویژگی‌های مطلوبی مانند عملکرد بالا یا مقاومت به بیماری را نشان می‌دهند (Akinyode, 2023). در تحقیق حاضر نیز ارقام بومی که از لحاظ عملکرد دانه دارای برتری بودند (ارقام ۷۸-۷۳۰، ۷۸-۲۲۹ و ۷۸-۵۷۰) و توسط تجزیه به مؤلفه‌های اصلی شناسایی شده بودند، همگی در خوشه شماره یک قرار گرفتند و بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که نتایج حاصل از این روش‌ها

خوشه دوم شامل چهار ژنوتیپ می‌شد. این خوشه از لحاظ عملکرد دانه، تعداد کپسول در بوته، وزن دانه در کپسول، وزن هزار دانه، تعداد دانه در کپسول، تعداد شاخه‌های فرعی نسبت به میانگین این صفات در سایر خوشه‌ها کمتر بود و از لحاظ صفت روز تا شروع گل‌دهی بیشترین مقدار را در بین خوشه‌ها به خود اختصاص داده بود. خوشه سوم شامل سه ژنوتیپ بود که از لحاظ تعداد کپسول در بوته، طول کپسول، عرض کپسول، ضخامت کپسول، وزن هزار دانه، تعداد شاخه فرعی و وزن خشک اندام هوایی بیشترین مقدار را نسبت به میانگین این صفات در سایر خوشه‌ها به خود اختصاص داده بود. همچنین این خوشه از نظر فاصله اولین کپسول از طوقه گیاه، تعداد روز تا شروع گل‌دهی و تعداد روز تا رسیدگی کمترین مقدار را نسبت به میانگین این صفات در سایر خوشه‌ها به خود اختصاص داده بود. خوشه چهارم شامل ۱۱ ژنوتیپ بود که از لحاظ وزن دانه در کپسول و تعداد دانه در کپسول بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده بود و از لحاظ طول کپسول، عرض کپسول، ضخامت کپسول، ارتفاع بوته و وزن خشک اندام هوایی کمترین مقدار را به خود اختصاص داده بود.

تحقیقات محققان نشان داده است که تجزیه خوشه‌ای توزیع جغرافیایی ژنوتیپ‌ها را منعکس نمی‌کند. این یافته نشان می‌دهد که عوامل مؤثر بر تنوع ژنتیکی ممکن است فراتر از مجاورت جغرافیایی گسترش یابد، که احتمالاً شامل شرایط محیطی و شیوه‌های اصلاحی تاریخی می‌شود (Gupta et al., 2021). در تحقیق حاضر نیز نتایج تجزیه خوشه‌ای نشان داد که دسته‌بندی ژنوتیپ‌ها با توزیع جغرافیایی ژنوتیپ‌ها ارتباطی نداشتند و ارقام اکثراً براساس تفاوت‌های ریخت‌شناختی گروه‌بندی شدند. به‌عنوان مثال، سه لاین بومی بوشهر در گروه‌های چهار و یک قرار گرفتند، لاین‌های بومی فارس در همه گروه‌ها پراکنده شدند، اکثر لاین‌های بومی یزد در گروه چهارم و لاین‌های بومی هرمزگان در گروه‌های یک و سه قرار گرفتند. اکبر و همکاران (Akbar et al., 2011) نیز با تجزیه خوشه‌ای ۱۰۵ ژنوتیپ کنگد نتیجه‌گیری نمودند که دسته‌ها با توزیع جغرافیایی ژنوتیپ‌ها ارتباطی نداشتند. تجزیه و تحلیل جداگانه ۲۰ ژنوتیپ کنگد در شرایط تنش نیز از تجزیه خوشه‌ای برای تمایز بین انواع پرمحصول و کم‌بازده استفاده کرد. نتایج نشان داد که صفات ریخت‌شناختی به‌طور معنی‌داری بر گروه‌بندی تأثیر می‌گذارد که بیشتر از این ایده حمایت می‌کند که صفات مشابه منجر به خوشه‌بندی می‌شوند (Nikfekar, Kazemitabar, Ranjbar, Hashemi-Petroudi, & Mehraban Joubani, 2023). مطالعه دیگری که شامل ۹۱ ژنوتیپ کنگد بود نشان داد که گروه‌بندی تحت تأثیر توزیع جغرافیایی نیست، بلکه بیشتر تحت تأثیر تفاوت‌های ریخت‌شناختی قرار دارد و تفاوت‌های ریخت‌شناختی اغلب به‌دلیل فشارهای بوم‌شناختی ایجاد می‌شوند، اما

این پژوهش براساس نتایج حاصل از اجرای پروژه مصوب به شماره ۰۰۳-۰۳-۹۵۱۵۰ مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر است. بدینوسیله از مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر به‌خاطر تأمین هزینه‌های اجرای این پروژه صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

مشابهت‌های زیادی در تفکیک ارقام و ژنوتیپ‌ها دارند. هر دو تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای ابزارهای مؤثری برای ارزیابی تنوع ژنتیکی در جمعیت‌ها هستند. آن‌ها بینشی در مورد ساختار ژنتیکی ارائه می‌دهند و به شناسایی گروه‌های ژنتیکی متمایز کمک می‌کنند که ممکن است برای پروژه‌های دورگ‌گیری مفید باشند (Zewdu, Mekonnen, & Geleta, 2024).

سپاسگزاری

References

- Adebisi, M. A. (2004). Variation, stability and correlation studies in seed quality and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.). Ph.D. Thesis, University of Agriculture, Abeokuta. 123 pp.
- Ahmed, J., Qadir, G., Ansar, M., Wattoo, F. M., Javed, T., Ali, B., & Rahimi, M. (2023). Shattering and yield expression of sesame (*Sesamum indicum* L) genotypes influenced by paclobutrazol concentration under rainfed conditions of Pothwar. *BMC Plant Biology*, 23(1), 137. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04145-7>
- Akbar, F., Rabbani, M. A., Shinwari, Z. K., & Khan, S. J. (2011). Genetic divergence in sesame (*Sesamum indicum* L.) landraces based on qualitative and quantitative traits. *Pakistan Journal of Botany*, 43(6), 2737-2744.
- Akinyode, E. T. (2023). Principal component and cluster analysis as a tool in assessment of genetic diversity of tomato genotypes (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Nigerian Journal of Horticultural Science*, 27(4), 74-80.
- Arulmozhi, N., Santha, S., & Mohammed, S. E. N. (2001). Correlation and path co-efficient analysis in sesame. *Journal of Ecology*, 13(3), 229-232.
- Ashfaq, M., Rani, K. J., Padmaja, D., Yadav, P., & Betha, U. K. (2023). Assessment of genetic diversity in sesame genotypes based on morphological characters. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 1104-1111. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i113260>
- Ashri, A. (1998). Sesame breeding. *Plant Breeding Reviews*, 16, 179-228.
- Aye, K. M., Sreewongchai, T., Phumichai, C., Mathayattaworn, W., Kumdee, O., Ratanapongsai, Y., & Kaedphol, R. (2024). Assessment of genetic diversity, correlation and path coefficients analysis in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Science & Technology Asia*, 29(2), 225-236. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/SciTechAsia/article/view/252391>
- Baraki, F., Gebregergis, Z., Belay, Y., Berhe, M., Teame, G., Hassen, M., Gebremedhin, Z., Abadi, A., Negash, W., Atsbeha, A., & Araya, G. (2020). Multivariate analysis for yield and yield-related traits of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *Heliyon*, 6(10), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05295>
- Baydar, H. A. S. A. N. (2005). Breeding for the improvement of the ideal plant type of sesame. *Plant Breeding*, 124(3), 263-267. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2005.01080.x>
- Bitaraf, N., Khodambashi, N., & Houshmand, S. (2010). Correlation and path analysis of grain yield and its components for lentil under Shahrekord climate. *Iranian Journal of Pulses Research*, 1(1), 51-56. <https://doi.org/10.22067/ijpr.v1i1.6345>
- Davoodi Zanjani, N., Ghasemi Afshar, P., & Adeli Milani, M. (2020). Evaluation of the composition and oxidative stability of cold-pressed sesame oils in the market of Zanzan province, Iran (2019). *Journal of Human Environment and Health Promotion*, 6(4), 159-166.
- Durge, B. D., Geethanjali, S., & Sasikala, R. (2022). Assessment of genetic variability for seed yield and its components in sesame (*Sesamum indicum* L.) based on multivariate analysis. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 13(3), 974-982.
- Emamgholizadeh, S., Parsaeian, M., & Baradaran, M. (2015). Seed yield prediction of sesame using artificial neural network. *European Journal of Agronomy*, 68, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.010>
- Ezhilarasi, T., Mahalingam, A., & Manivannan, N. (2024). 1. Assessment of genetic diversity in Indian sesame (*Sesamum indicum* L.) germplasm. *Ecology, Environment & Conservation*, 30(4), 344-348. <https://doi.org/10.53550/eec.2024.v30i03s.059>
- Falconer, D. S., & Mackey, T. F. C. (1996). Introduction to quantitative genetics. Longman Group Ltd. Harlow, UK, p. 187-246.
- Fazal, A., Mustafa, H. S. B., Hasan, E., Anwar, M., Tahir, M. H. N., & Sadaqat, H. A. (2015). Interrelationship and path coefficient analysis among yield and yield related traits in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Nature and Science*, 13(5), 27-32.
- Ferreira, E. I., Pereira, M. D., Macedo, A. R. D., & Soares, E. R. (2017). Effect of fertilization on the physiological maturation of sesame seeds. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 47(2), 202-210.

- <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4745715>
19. Gedifew, S. (2024). Multivariate analyses of shattering and seed yield related morphological traits reveal high yielding sesame genotypes exhibit low degree of shattering. *Middle East Research Journal of Biological Sciences*, 4(3), 58-71. <https://doi.org/10.36348/merjbs.2024.v04i03.002>
20. Gharib-Eshghi, A. M. I. R., Mozafari, J. A. V. A. D., & Azizov, i. B. R. A. H. I. M. (2016). *Genetic Diversity Among Sesame Genotypes under Drought Stress Condition by Drought Implementation*. CABI Databases. 89-108.
21. Goudappagoudra, R., Lokesh, R., & Ranganatha, A. R. G. (2011). Trait association and path coefficient analysis for yield and yield attributing traits in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 2(3), 448-452.
22. Gupta, D., Muralia, S., Khandelwal, V., & Nehra, A. (2021). Assessing diversity of sesame genotypes using cluster analysis and principal component analysis. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(01), 304-312. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.038>
23. Hemanth, S., Patil, L. C., Manoj, S. H., Naveen, A., Bhargavi, H. A., & Kotegoudra, H. (2024). Unravelling the genetic variability of seed yield and its components in sesame (*sesamum indicum* l.) through multivariate analysis. *Plant Archives*, 24(1), 237-242. <https://doi.org/10.51470/plantarchives.2024.v24.no.1.034>
24. Islam, M. N., Sultana, S., Rashid, M. U., & Rahim, M. A. (2024). Determination of the potentiality of different sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes: Potentiality of different sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *Bangladesh Journal of Agriculture*, 49(1), 52-67.
25. Kalaiyarasi, R., Rajasekar, R., Lokeshkumar, K., Priyadharshini, A., & Mohanraj, M. (2019). Correlation and path analysis for yield and yield traits in sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(11), 1251-1257. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.811.147>
26. Kante, S., Wadikar, P. B., Sargar, P. R., & Patil, S. S. (2022). Correlation analysis for seed yield and its related attributes in genotypes of sesame (*Sesamum indicum* L.). *International Journal of Plant and Environment*, 8(01), 87-90. <https://doi.org/10.18811/ijpen.v8i01.11>
27. Kavitha, M., & Sethupathi-Ramalingam, R. (2000). Path analysis in segregating population of sesame. *Madras agricultural Journal*, 5(1-3), 158-159.
28. Khairnar, S. S., & Monpara, B. A. (2013). Identification of potential traits and selection criteria for yield improvement in sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes under rainfed conditions. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2(2), 1-8. (in Persian with English abstract)
29. Kumar, V., Sinha, S., Sinha, S., Singh, R. S., & Singh, S. N. (2022). Assessment of genetic variability, correlation and path analysis in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 13(1), 208-215.
30. Kumaresan, D., & Nadarajan, N. (2003). Genetic divergence analysis in sesame (*sesamum indicum* L.). *Sesame and Office Newsletter*, 18, 15-19.
31. Langham, D. R., Riney, J., Smith, G., & Wiemers, T. (2008). Sesame grower guide. *Sesaco Corp*, 30(331), 3.
32. Manly, B. F. J. (2004). *Multivariate statistical methods, A primer*. Chapman and Hall, London. Third edition, 224 p. <https://doi.org/10.1201/b16974>
33. Masoudi, B., & Ahmadi, M. (2019). Evaluation of genetic diversity of agronomic and morphological traits of sesame genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 11(31), 78-91. <https://doi.org/10.29252/jcb.11.31.78>
34. Mei, H., Cui, C., Liu, Y., Du, Z., Wu, K., Jiang, X., Zheng, Y., & Zhang, H. (2023). QTL analysis of traits related to seed size and shape in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Plos One*, 18(11), e0293155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293155>
35. Menzir, A. (2012). Phenotypic variability, divergence analysis and heritability of characters in sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *Nature and Science*, 10(10), 117-126.
36. Mohammadi, S. A., Prasanna, B. M., & Singh, N. N. (2003). Sequential path model for determining interrelationships among grain yield and related characters in maize. *Crop Science*, 43(5), 1690-1697. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1690>
37. Mukhthambica, K., Bisen, R., & Ramya, K. T. (2023). Principal component analysis for yield and yield related traits in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Biological Forum – An International Journal*, 15(3), 227-232.
38. Nadeem, A., Kashani, S., Ahmed, N., Buriro, M., Saeed, Z., Mohammad, F., & Ahmed, S. (2015). Growth and yield of sesame (*Sesamum indicum* L.) under the influence of planting geometry and irrigation regimes. *American Journal of Plant Sciences*, 6(07), 980. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.67104>
39. Navaneetha, J. S., Murugan, E., & Parameswari, C. (2019). Correlation and path analysis for seed yield and its components in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 10(3), 1262-1268. <https://doi.org/10.5958/0975-928x.2019.00161.3>
40. Nikfekar, R., Kazemitabar, S. K., Ranjbar, G., Hashemi-Petroudi, S. H., & Mehraban Joubani, P. (2023). Study of genetic diversity and evaluation of some sesame genotypes under salinity stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(3), 575-586. <https://doi.org/10.22077/escs.2022.4516.2037>

41. Ramazani, S. H. R. (2016). Surveying the relations among traits affecting seed yield in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 19, 303-309. <https://doi.org/10.1007/s12892-016-0053-0>
42. Ranganatha, A. R. G., Jyotishi, A., Deshmukh, M. R., Bisen, R., Panday, A. K., & Gupta, K. N. (2010). Improved technology for maximizing production of sesame. Indian Council of Agricultural Research, Jabalpur, IND. 1-17.
43. Sabag, I., Pnini, S., Morota, G., & Peleg, Z. (2024). Refining flowering date enhances sesame yield independently of day-length. *BMC Plant Biology*, 24(1), 711. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05431-8>
44. Salehi, M., Esmailzadeh Hosseini, S. A., Salehi, E., & Bertaccini, A. (2017). Genetic diversity and vector transmission of phytoplasmas associated with sesame phyllody in Iran. *Folia Microbiologica*, 62, 99-109. <https://doi.org/10.1007/s12223-016-0476-5>
45. Sankar, P. D., & Kumar, C. A. (2003). Character association and path coefficient analysis in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Agricultural Scientist Digestion*, 23, 17-19.
46. Sasipriya, S. (2018). Correlation and path analysis for seed yield and its components in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 9(4), 1594-1599.
47. Sonaniya, R., Bisen, R., & Sonaniya, P. (2023). Assessment of Exotic Sesame (*Sesamum indicum*) Accessions through Principal Component Analysis. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 282-290. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i113170>
48. Sumathi, P., Muralidharan, V., & Manivannan, N. (2007). Trait association and path coefficient analysis for yield and yield attributing traits in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Madras Agriculture Journal*, 94, 174-178. <https://doi.org/10.29321/maj.10.100660>
49. Tabatabaei, I., Pazouki, L., Bihamta, M. R., Mansoori, S., Javaran, M. J., & Niinemets, U. (2011). Genetic variation among Iranian sesame (*Sesamum indicum* L.) accessions vis-a-vis exotic genotypes on the basis of morpho-physiological traits and rapd markers. *Australian Journal of Crop Science*, 5(11), 1396-1407.
50. Teklu, D. H., Shimelis, H., & Abady, S. (2022). Genetic improvement in sesame (*Sesamum indicum* L.): Progress and outlook: A review. *Agronomy*, 12(9), 2144. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092144>
51. Wang, C., Niu, J., Miao, H., Li, C., Duan, Y., Ju, M., Cao, H., Wei, L., Wang, H., & Zhang, H. (2024). Genetic variation, correlation, and association mapping of seed yield and its component traits in sesame. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(2), 603-619. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01644-2>
52. Winstead, D. J., & Jacobson, M. G. (2024). Storable, neglected, and underutilized species of Southern Africa for greater agricultural resilience. *Plant-Environment Interactions*, 5(4), e70004. <https://doi.org/10.1002/pei3.70004>
53. Yadav, R., Kalia, S., Rangan, P., Pradheep, K., Rao, G. P., Kaur, V., & Siddique, K. H. (2022). Current research trends and prospects for yield and quality improvement in sesame, an important oilseed crop. *Frontiers in Plant Science*, 13, 863521. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.863521>
54. Yingzhong, Z., & Yishou, W. (2002). Genotypic correlations and path coefficient analysis in sesame. *Sesame and Sofflower Newsletter*, 17, 10-12.
55. Yol, E., Karaman, E., Furat, S., & Uzun, B. (2010). Assessment of selection criteria in sesame by using correlation coefficients, path and factor analyses. *Australian Journal of Crop Science*, 4(8), 598-602.
56. Zewdu, D., Mekonnen, F., & Geleta, N. (2024). Cluster and principal component analysis for yield and yield related traits of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *AGBIR*, 40(2) 962-967.



Research Article

Vol. 23, No. 4, Winter 2025, p. 479-495

Improving Antioxidant Enzyme Activities, Seed and Oil Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) with Brassinolide Foliar Application under Different Irrigation Regimes

M. Ghasemi¹, Sh. Jahanbin¹, H. Latifmanesh^{1*}, A. Mirshekari¹, H. Alahdadi¹

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

(*- Corresponding author's Email: h.latifmanesh@yu.ac.ir)**How to cite this article:**

Received: 30 December 2024

Revised: 10 March 2025

Accepted: 17 March 2025

Available Online: 13 April 2025

Ghasemi, M., Jahanbin, Sh., Latifmanesh, H., Mirshekari, A., & Alahdadi, H. (2025). Improving Antioxidant Enzyme Activities, Seed and Oil Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) with Brassinolide Foliar Application under Different Irrigation Regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 479-495. (In Persian with English abstract)<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.91417.1372>

Introduction

Sunflower (*Helianthus annuus* L.) is one of the most significant oilseed crops, valued for its high content of unsaturated fatty acids, which contributes to the production of high-quality oil. Although this plant exhibits relative adaptability to Iran's climatic conditions, it demonstrates moderate sensitivity to drought stress. Drought stress poses a major challenge to crop production by directly affecting plant growth and yield. While sunflowers can tolerate mild drought conditions, severe drought significantly disrupts their physiological responses. Reduced regulation of transpiration and limited leaf expansion are key factors contributing to the plant's vulnerability to severe drought. This stress condition results in excessive production of reactive oxygen species (ROS), intensifying oxidative stress. Consequently, oxidative stress leads to chloroplast degradation, decreased photosynthetic capacity, leaf shrinkage and thickening, reduced leaf area, and morphological alterations such as impaired stomatal movement. Brassinolides, which belong to the class of plant steroid hormones, play a crucial role in regulating plant growth and development, including cell division and elongation, organogenesis, delayed leaf senescence, and enhanced resistance to environmental stress. By modulating plant responses to drought, brassinolides can mitigate the adverse effects of oxidative stress and improve overall plant performance.

Materials and Methods

To investigate the effect of brassinolide under water deficit conditions on antioxidant enzyme activity and certain agronomic traits of the sunflower cultivar Oscar, an experiment was conducted in a split-plot design based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The main factor consisted of irrigation regimes at three levels (full irrigation at 100% field capacity, moderate drought at 75% field capacity, and severe drought at 50% field capacity based on Class A pan evaporation). The sub-factor included brassinolide foliar application at three concentrations (0 (distilled water), 0.1 and 0.5 mg L⁻¹). In this study, traits such as relative water content (RWC) of leaves, antioxidant enzyme activities (catalase, peroxidase, and superoxide dismutase), leaf area index (LAI), filled and unfilled capitulum weight, seed yield, and oil yield were evaluated.

Results and Discussion

The results indicated that drought stress and brassinolide foliar application significantly affected the morphophysiological indices and agronomic performance of sunflower. Severe stress led to a reduction in



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.2025.91417.1372>

relative leaf water content (by 18.79%) and an increase in antioxidant enzyme activity. At this stress level, leaf area index, grain yield, and oil yield decreased by 57.48%, 61.56%, and 70.01%, respectively, compared to full irrigation. This reduction highlights disruptions in water uptake and retention as well as diminished grain-filling capacity under drought conditions. On the other hand, the simple effect of foliar application of 0.5 mg/L brassinolide increased catalase and peroxidase activities by 18.58% and 36.40%, respectively. This increase highlights the role of brassinolide in alleviating oxidative stress and enhancing the plant's physiological condition. Furthermore, the highest leaf area index was recorded under full irrigation combined with a 0.5 mg/L brassinolide foliar application. Under severe stress conditions, grain yield and oil yield at the highest level of brassinolide application increased by 83.57% and 66.66%, respectively, compared to the treatment without foliar application.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that brassinolide foliar application, particularly under drought stress conditions, can be an effective strategy for enhancing both the quantitative and qualitative performance of sunflower. Brassinolide enhances antioxidant enzyme activities, mitigates the negative effects of oxidative stress, and improves plant physiological traits, thereby preserving photosynthetic potential and promoting vegetative and reproductive growth. Based on the results, foliar application of brassinolide at 0.5 mg L⁻¹ yielded the most significant improvements in leaf area index, seed yield, and oil yield, underscoring its effectiveness in optimizing plant growth even under limited water availability. Therefore, the application of brassinolide under optimal irrigation regimes, particularly during moderate to severe drought stress, is recommended as a viable approach to enhancing sunflower productivity and sustainability.

Keywords: Catalase, Drought stress, Leaf area index, Relative water content of leaves

بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، عملکرد دانه و روغن آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) با محلول‌پاشی براسینولید تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

مرضیه قاسمی^۱، شاهرخ جهانبین^۱، حجت‌اله لطیف‌منش^۱ ID،*، امین میرشکاری^۱ ID، حمید اله‌دادی^۱ ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

چکیده

بررسی تأثیر براسینولید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) (رقم اسکار) می‌تواند به درک بهتری از سازوکارهای دفاعی گیاه در برابر تنش خشکی کمک کند و به معرفی راهکارهای لازم برای افزایش تاب‌آوری در شرایط کم‌آبیاری منجر شود. بنابراین آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. عامل اصلی شامل رژیم آبیاری در سه سطح (بدون تنش (۱۰۰ درصد آبیاری کامل)، تنش متوسط (۷۵ درصد آبیاری کامل) و تنش شدید (۵۰ درصد آبیاری کامل)) با توجه به تشک تبخیر کلاس A و عامل فرعی شامل محلول‌پاشی براسینولید در سه سطح (صفر (آب مقطر)، ۰/۱ و ۰/۵ میلی گرم بر لیتر) بود. براساس مقایسه میانگین، تنش شدید سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ (۱۸/۷۹ درصد) و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد. در این سطح تنش، شاخص سطح برگ، عملکرد دانه و عملکرد روغن به‌ترتیب با کاهش ۵۷/۴۸، ۶۱/۵۶ و ۷۰/۰۱ درصد نسبت به آبیاری کامل مواجه شدند. از سوی دیگر، اثر ساده محلول‌پاشی ۰/۵ میلی گرم بر لیتر براسینولید موجب افزایش ۱۸/۵۸ و ۳۶/۴۰ درصدی کاتالاز و پروکسیداز گردید. همچنین بیشترین میزان شاخص سطح برگ از تیمار آبیاری کامل + محلول‌پاشی ۰/۵ میلی گرم بر لیتر براسینولید به دست آمد. عملکرد دانه و عملکرد روغن نیز تحت بالاترین سطح محلول‌پاشی براسینولید در شرایط تنش شدید با افزایش ۸۳/۵۷ و ۶۶/۶۶ درصدی نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی + تنش شدید روبه‌رو بود. نتایج پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی ۰/۵ میلی گرم بر لیتر براسینولید جهت بهبود عملکرد آفتابگردان تحت شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی مناسب خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، شاخص سطح برگ، کاتالاز، محتوای نسبی آب برگ

مقدمه

خشکی را چالش برانگیزترین عامل محدودکننده در مسیر تولید محصولات زراعی برمی‌شمارند (Balestrini, Chitarra, Antoniou, Ruocco, & Fotopoulos, 2018). اگرچه آفتابگردان قادر به تحمل تنش خشکی متوسط است، اما در برابر خشکی شدید حساسیت نشان می‌دهد. این حساسیت عمدتاً به دلیل کاهش توانایی گیاه در تنظیم تعرق و آماس برگ است (García-López, Lorite, García-Ruiz, & Domínguez, 2014).

تنش خشکی تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند سوپراکسید و هیدروژن پراکسید را افزایش داده و تنش اکسیداتیو را تشدید می‌کند، در نتیجه سبب ایجاد اختلال در فعالیت‌های فیزیولوژیک یاخته‌ها (Tiwari et al., 2021) از جمله کاهش فرآیند فتوسنتز ناشی از تخریب کلروپلاست‌ها (Woodson, 2022)، کاهش سطح برگ و کوچک و ضخیم شدن برگ‌ها (Hu et al., 2020)، کاهش هدایت

آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی محسوب می‌شود که به دلیل داشتن درصد بالایی از اسیدهای چرب غیراشباع، از کیفیت روغن مرغوبی برخوردار است (Ansarifard, Mostafavi, Khosroshahli, Bihamta, & Ramshini, 2020). اگرچه اشاره شده است که این گیاه به‌خوبی با شرایط اقلیمی ایران سازگار بوده (Gholizadeh, Ghaffari, Payghamzadeh, & Kia, 2021)، با این حال نسبت به خشکی تحمل متوسطی دارد (Hassan & Mohamed, 2019). پژوهشگران با توجه به پاسخ گیاهان به تنش‌های محیطی و تغییرات اقلیمی، تنش

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
(Email: h.latifmanesh@yu.ac.ir)

*) نویسنده مسئول: <https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.91417.1372>

براسینولیدها متعلق به دسته‌ای از هورمون‌های استروئیدی گیاهی هستند که در تنظیم فرآیندهای رشدنمو از جمله تقسیم و کشیدگی سلولی، اندام‌زایی، پیری برگ و واکنش به تنش‌های محیطی نقش کلیدی ایفا می‌کنند (Hassanuzzaman, Nahar, Alam, Ahmad, & Fujita, 2015). این هورمون‌ها در بسیاری از گیاهان وجود دارند و حتی در غلظت‌های بسیار پایین نیز فعالیت بالایی دارند. مطالعات نشان داده است که براسینولیدها در رشد و توسعه جنین و تعامل با سایر هورمون‌های گیاهی اولیه و اسیدجاسمونیک و اسیدسالیسیلیک تأثیر گذارند. تعامل این هورمون‌ها با اسیدآبسیزیک در بسته شدن روزنه‌ها و افزایش تحمل به خشکی از طریق مسیرهای پیام‌رسانی نیتریک اکسید، به گیاه در مقابله با تنش‌های غیرزیستی کمک می‌کند. براسینولیدها همچنین با تنظیم بیان ژن‌های مشترک با اسیدآبسیزیک، فرآیندهای مرتبط با رشد و پاسخ به تنش خشکی را هماهنگ می‌کنند (Planas-Riverona et al., 2019). نتایج یافته‌های حجیری و پازکی (Hajiri & Pazoki, 2023) نشان داد که کاربرد براسینولید متناسب با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش میزان نشت مواد یونی سبب بهبود محتوای نسبی آب برگ در لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L. Pinto) شد. این هورمون‌ها از طریق افزایش فتوسنتز، تنظیم فعالیت آنزیم رویسکو و چرخه کالوین، کارایی دریافت دی‌اکسید کربن و سرعت کربوکسیلاسیون را بهبود بخشیده و در توسعه آوند چوبی، تشکیل لوله کرده و تمایز بافت‌های آوندی نقش دارند (Sirohi & Kapoor, 2020). کمبود براسینولید همچنین باعث کاهش جوانه‌زنی، کوتولگی، تأخیر در گل‌دهی و کاهش باروری می‌شود، درحالی‌که افزایش بیان ژن‌های مربوط به بیوسنتز براسینولیدها، رشد و تحمل گیاه را بهبود می‌بخشد (Chaghakaboodi, Mousavi, & Kakaei, 2024). تأثیر نقش مثبت براسینولید در افزایش عملکرد دانه و عملکرد روغن (Hamed El-Beltagi, El-Sherif, & Abdullah, 2022)، درصد روغن (El-Metwally, 2019)، شاخص سطح برگ و محتوای کلروفیل (AL Bakri & AL-Zubaidy, 2023) در آفتابگردان نیز مطرح شده است.

کاهش شدید و افت سطح منابع آب‌های زیرزمینی، کاهش بارندگی‌ها طی چند سال اخیر و کمبود آب در اکثر مناطق کشور، لزوم بازنگری در روش‌های کشت محصولات زراعی را با در نظر گرفتن صرفه‌جویی در مصرف آب بخش کشاورزی ضروری می‌نماید. بنابراین، در این پژوهش محلول‌پاشی هورمون براسینولید به‌عنوان پیشنهادی مطلوب برای بهبود تحمل به تنش خشکی جهت ارزیابی برخی خصوصیات فیزیولوژیک و زراعی آفتابگردان تحت رژیم‌های مختلف آبیاری مورد بررسی قرار گرفت.

روزنه‌ای (Liu et al., 2022) و تغییرات مورفولوژیک در گیاهان می‌شود. برخی از این واکنش‌ها نوعی پاسخ سازگاری برای کاهش تعرق و از دست دادن کمتر آب می‌باشد، اما سرانجام با کاهش عملکرد کمی و کیفی گیاهان همراه خواهد بود (Gao et al., 2020). بررسی یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که تنش خشکی، محتوای نسبی آب برگ (Omidi Nasab, Meskarbashee, & Rahnama Ghahfarokhi, 2024) و محتوای کلروفیل (Ghasemi, Jahanbin, Latifmanesh, Farajee, & Mirshekari, 2021) آفتابگردان را به‌صورت معنی‌داری کاهش داده است. از سوی دیگر، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز (Motiei, Sirousmehr, Khammari, & Naderi, 2023)، پراکسیداز (Sheikh Mamo, Rahnama, & Hassibi, 2023) و سوپراکسید دیسموتاز (Yazdandoost Hamedani, Ghobadi, Ghobadi, Jalali, Honarmand, & Saeidi, 2022) نیز متأثر از سطوح تنش خشکی با افزایش محسوسی در آفتابگردان همراه بوده است. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با تبدیل سوپراکسید به پراکسید هیدروژن، نخستین خط دفاعی گیاه در برابر گونه‌های فعال اکسیژن است، درحالی‌که کاتالاز به حذف هیدروژن پراکسید از طریق تجزیه آن به آب و اکسیژن کمک می‌کند و پراکسیداز نیز با نقش‌آفرینی در پایداری دیواره سلولی و تنظیم رشد، H_2O_2 را از سلول‌ها حذف می‌کند (Huchzermeyer, Menghani, Khardia, & Shilu, 2022). افزایش هماهنگ فعالیت این آنزیم‌ها نقش حیاتی در کاهش آسیب اکسیداتیو، حفظ ساختار غشاء سلولی و بهبود تحمل گیاه به تنش خشکی دارد. عرب و همکاران (Arab, Yadavi, Balouchi, & Alahdadii, 2023) اظهار نمودند که تأخیر در آبیاری پس از ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر موجب کاهش ۳۷/۵ درصدی عملکرد دانه و ۳۰ درصدی عملکرد زیستی آفتابگردان شد. همچنین پژوهشگران ابراز داشته‌اند که بروز تنش خشکی سبب کاهش درصد روغن دانه (Omidinasab, Meskarbashee & Rahnama Ghahfarokhi, 2023)، عملکرد روغن (Karami Borzabad, Peykarestan & Baghbani, 2022)، شاخص سطح برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (Motiei et al., 2023) در آفتابگردان شده است. بنابراین اتخاذ راهبردهای لازم جهت بهبود سازگاری گونه‌های مقاوم به خشکی و کم‌آبی به‌دلیل تطابق‌های فیزیولوژیک، ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک، اهمیت دوچندان می‌یابد. کم‌آبیاری به‌عنوان یک راهکار بهینه و رویکرد هشیارانه، نقش مهمی در تولید محصولات کشاورزی در شرایط کمبود آب ایفا می‌کند. این روش با هدف افزایش بهره‌وری آب از طریق کاهش حجم آبیاری در هر نوبت یا حذف آبیاری‌هایی که توان بازدهی کمتری دارند، به مدیریت بهتر منابع آبی کمک می‌کند (Abaszadeh, Fanaee, & Bakhshi, 2024).

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر در سال زراعی ۱۳۹۷ در منطقه نورآباد ممسنی، استان فارس با مشخصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی، در ارتفاع ۹۲۰ متری از سطح دریا اجرا گردید. منطقه آزمایش براساس تقسیمات اقلیمی به‌روش کوپن (Köppen, 1936) جزئی از مناطق نیمه‌خشک می‌باشد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. عامل اصلی آزمایش شامل رژیم آبیاری در سه سطح (بدون تنش (۱۰۰ درصد آبیاری کامل)، تنش متوسط (۷۵ درصد آبیاری کامل) و تنش شدید (۵۰ درصد آبیاری کامل) با توجه به تبخیر از تشت تبخیر کلاس A) و عامل فرعی شامل محلول‌پاشی هورمون براسینولید (محصول شرکت شیمی دانش آزمای تهران) در سه سطح (صفر (آب مقطر)، ۰/۱ و ۰/۵ میلی گرم بر لیتر) بود.

به‌منظور اجرای آزمایش، عملیات آماده‌سازی زمین و بستر خاک با استفاده از وسایل مکانیزه (گاواهن و دیسک) در هفته اول تیر ماه صورت گرفت. جهت آماده‌سازی مراحل اولیه، هیچ نوع علف‌کش، آفت‌کش و یا قارچ‌کش استفاده نشد. پس از انجام عملیات خاک‌ورزی، کرت‌هایی به‌طول پنج متر و عرض چهار متر ایجاد شد. هر کرت شامل شش ردیف به‌فاصله ۶۰ سانتی‌متر بود. فاصله بین کرت‌های فرعی ۱/۵ متر و فاصله بین کرت‌های اصلی نیز سه متر در نظر گرفته شد. قبل از انجام عملیات زراعی، به‌منظور تعیین میزان حاصل‌خیزی خاک و نیاز کودی، از ۱۰ نقطه زمین آزمایشی، نمونه خاکی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری تهیه شد (جدول ۱). براساس نتایج آزمون خاک، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن از منبع اوره طی سه مرحله (یک سوم همزمان با شخم، یک سوم در زمان شش برگگی و یک سوم در زمان ستاره‌ای شدن طبق‌ها به‌صورت نواری) اعمال گردید. کود فسفر نیز از منبع سوپر فسفات تربیل (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) قبل از کشت به خاک اضافه شد.

رقم آفتابگردان انتخابی در این آزمایش، اسکار بود. این رقم که

هیبریدی زودرس با دوره رشد ۱۱۰ روزه، مقاوم در برابر بیماری‌ها ورس و خشکی، حاوی ۴۸ تا ۵۱ درصد روغن، پایدار در عملکرد و سازگار با شرایط محیطی مختلف است از شرکت نگین سبز برنا تهیه شد. کاشت به‌صورت جوی و پشته‌ای و هیرم‌کاری انجام گرفت. فرآیند کاشت به‌صورت دستی با توجه به اندازه بذور در عمق پنج تا هفت سانتی‌متری، به‌حالت کپه‌ای (کشت دو تا سه بذور در هر کپه) و با رعایت فاصله ۲۵ سانتی‌متری روی ردیف در ۲۵ تیرماه انجام شد. در مرحله دو تا سه برگگی، عمل تنک‌کاری انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کشت انجام گرفت. تا زمان خروج گیاهچه‌ها از خاک، مزرعه هر سه روز یک بار آبیاری گردید، سپس بعد از مرحله سبز شدن هر شش روز یک بار انجام گرفت. زمانی که گیاه به مرحله گل‌دهی رسید، تیمارهای تنش خشکی اعمال شد. در این آزمایش، دور آبیاری آفتابگردان با استفاده از تشتک تبخیر (از جمله مشخصه‌های هواشناسی که در ایستگاه‌های هواشناسی به‌طور روزانه اندازه‌گیری می‌شود و اثرات کلیه عوامل آب‌وهوایی از جمله دما، باد، رطوبت و تشعشع را نشان می‌دهد) تعیین گردید. از ابتدای کشت تا هنگام برداشت، روزانه داده‌های تبخیر از تشت تبخیر کلاس A یادداشت‌برداری گردید تا زمان آبیاری مشخص گردد. همچنین با در نظر گرفتن ضریب گیاهی K_c ، میزان تبخیر و تعرق مشخص و براساس تخلیه رطوبتی و طبق تیمارهای مذکور تا رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی، میزان آب مورد نیاز محاسبه و حجم آب مورد نیاز هر کرت توسط کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. حجم آب مصرفی در هر نوبت آبیاری برای تیمارهای مختلف و تعداد دفعات آبیاری آن‌ها به‌شرح جدول ۲ می‌باشد.

محلول‌پاشی براسینولید نیز در دو مرحله رشد رویشی یعنی چهار و هشت برگگی (با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ میلی گرم بر لیتر) برای هر کرت انجام شد. به‌منظور جذب بهتر، از ماده سورفکتانت (pH شاهد) جهت بهتر خیس نمودن برگ‌ها استفاده گردید. برداشت نمونه‌ها پس از رسیدگی فیزیولوژیکی آفتابگردان در ۱۰ آبان ماه از سطح سه مترمربع (پس از حذف حاشیه‌ها) در هر کرت انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Physicochemical properties of the soil at the test site

پتاسیم قابل جذب Available K (ppm)	فسفر قابل جذب Available P (ppm)	نیتروژن کل Nitrogen total (%)	کربن آلی Organic carbon (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	اسیدیته pH	بافت Texture	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)
220	15	0.07	0.60	1.0	7.23	لوم سیلتی Silty loam	16	64	20

جدول ۲- حجم آب مصرفی در سطوح مختلف تیمار آبیاری

Table 2- Water consumption volume at different irrigation treatment levels

تعداد آبیاری	آب مصرفی در کرت	سطوح تیمار
Number of irrigations	Water consumption in the plot ($m^3 ha^{-1}$)	Treatment levels
13	2.2	آبیاری ۱۰۰ درصد 100 Percent irrigation
13	1.6	آبیاری ۷۵ درصد 75 Percent irrigation
13	1.06	آبیاری ۵۰ درصد 50 Percent irrigation

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز: مخلوط واکنش در حجم نهایی چهار میلی لیتر تهیه شد و شامل ۶۳ میکرومولار نیتروبلوترازولیوم (NBT)، ۱۳ میلی مولار متیونین، ۰/۱ میلی مولار EDTA، ۱۳ میکرومولار ریوفلاوین، ۰/۵ مولار سدیم کربنات و ۰/۵ میلی لیتر عصاره آنزیمی بود. لوله های آزمایش در زیر لامپ لوله ای فلئورسنت ۱۵ وات به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند و پس از آن به مدت ۲۰ دقیقه در تاریکی نگهداری شدند. مقدار جذب در طول موج ۵۶۰ نانومتر اندازه گیری شد (Beauchamp & Fridovich, 1971).

شاخص سطح برگ: از هر کرت آزمایشی ۵۰۰ گرم برگ تر از دو ردیف میانی به صورت تصادفی برداشت شد. پس از خشک کردن نمونه ها در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت، سطح برگ نمونه ها به وسیله دستگاه Leaf Area Meter (Delta T) اندازه گیری شد. سپس نسبت سطح ویژه برگ (SLA) به عنوان نسبت مساحت برگ به وزن خشک نمونه محاسبه گردید. شاخص سطح برگ با استفاده از سطح ویژه برگ و وزن خشک کل برگ ها در هر مترمربع زمین محاسبه شد (Ravi & Indira, 1999).

عملکرد دانه و وزن طبق: سه مترمربع از وسط هر کرت انتخاب و پس از کفبردن ساقه ها، تمامی طبق ها از ساقه جدا شد. سپس کلیه دانه ها از طبق ها به روش دستی جدا گردید و پس از کاهش رطوبت تا سطح ۱۴ درصد توزین شدند.

عملکرد روغن: جهت اندازه گیری درصد روغن دانه از روش جوهانسون و اولریچ (Johnson & Ulrich, 1959) به کمک دستگاه سوکسله استفاده شد. عملکرد روغن از حاصل ضرب عملکرد دانه در درصد روغن به دست آمد.

تجزیه واریانس داده های آزمایشی با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 انجام شد. مقایسه میانگین اثرات اصلی به روش LSD در سطح احتمال پنج درصد و با معنی دار شدن برهم کنش عامل های آزمایش، مقایسه میانگین برش دهی با رویه L.S.Means مورد مقایسه آماری قرار گرفت. برای ترسیم نمودارها از نرم افزار اکسل (Microsoft Excel 2016) استفاده گردید.

محتوای نسبی آب: نمونه برداری به کمک قیچی از برگ مرجع (آخرین برگ توسعه یافته) در مرحله گل دهی (کد ۶۵ براساس مقیاس BBCH) انجام و نمونه ها بلافاصله درون یخ قرار گرفته و وزن تر آن ها در آزمایشگاه با ترازوی دقیق (با دقت ۰/۰۰۰۱) اندازه گیری شد. سپس تمامی نمونه ها در آب مقطر قرار داده شده و به مدت ۲۴ ساعت در سردخانه با دمای چهار درجه سانتی گراد قرار گرفتند. وزن اشباع برگ ها بعد از ۲۴ ساعت اندازه گیری شد. سپس برگ ها به مدت ۲۴ ساعت دیگر در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته و وزن خشک یادداشت گردید. در نهایت، محتوای نسبی آب از رابطه (۱) محاسبه گردید (Ritchie & Nguyen, 1990).

$$RWC = \frac{F_w - D_w}{S_w - D_w} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، F_w : وزن تر برگ بلافاصله بعد از نمونه برداری، D_w : وزن خشک برگ بعد از قرار گرفتن در آون و S_w : وزن اشباع برگ بعد از قرار گرفتن در آب مقطر است.

اندازه گیری آنزیم های آنتی اکسیدانتی

فعالیت آنزیم کاتالاز: کمپلکس واکنشی شامل ۱/۵ میلی لیتر از بافر پتاسیم فسفات ۱۰۰ میلی مولار (pH 7)، ۰/۵ میلی لیتر از هیدروژن پراکسید ۷/۵ میلی مولار و ۵۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی بود و حجم نمونه ها با اضافه کردن آب مقطر به سه میلی لیتر رسانده شد. جذب کمپلکس واکنشی در طول موج ۲۹۰ نانومتر یادداشت و میزان فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی ۳۶/۶ میلی مول بر سانتی متر محاسبه شد (Aebi, 1984).

فعالیت آنزیم پراکسیداز: مخلوط واکنش شامل ۸۱ میلی لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی مولار با pH=۶/۶، ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی نمونه و ۹۰ میکرولیتر گوئییکول یک درصد به عنوان الکترون دهنده مورد استفاده قرار گرفت. قبل از اندازه گیری سرعت واکنش، ۹۰ میکرولیتر هیدروژن پراکسید سه درصد به عنوان پذیرنده الکترون به مخلوط واکنش اضافه شد و مقدار جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه گیری گردید (MacAdam, Nelson, & Sharp, 1992).

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش دوگانه آبیاری $\times$ براسینولید در سطح احتمال پنج درصد بر میزان محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار شد (جدول ۳). بر مبنای مقایسه میانگین، با افزایش سطوح تنش خشکی، میزان محتوای نسبی آب نیز کاهش یافت. اعمال تنش خشکی با آبیاری ۵۰ درصد محتوای این صفت را به میزان ۱۸/۷۹ درصد در مقایسه با آبیاری کامل کاهش داد (شکل ۱). تنش خشکی باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ (RWC) و ایجاد عدم تعادل در متابولیسم سلولی می‌شود. کاهش محتوای نسبی آب برگ به عنوان شاخصی برای وضعیت آبی گیاه منجر به کاهش فشار تورژسانس، اختلال در فرآیند فتوسنتز و محدودیت در رشد سلولی می‌شود. به عبارت دیگر، در راستای افزایش میزان شدت تنش خشکی با کاهش رطوبت خاک و محدودیت پتانسیل آب برگ، محتوای نسبی آب برگ نیز کاهش یافته و در پی آن هدایت روزنه‌ای و ورود دی‌اکسید کربن به داخل برگ کمتر می‌شود (Zhou et al., 2017). پژوهشگران در آفتابگردان نیز کاهش محتوای نسبی آب برگ را تحت تنش خشکی ابراز داشته‌اند (Ashraf & Siddiqi, 2024).

کاربرد محلول‌پاشی براسینولید تحت شرایط تنش خشکی روند مثبتی را نشان داد، به گونه‌ای که اعمال محلول‌پاشی ۰/۵ میلی گرم بر لیتر براسینولید در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب موجب افزایش ۱۳/۹۸، ۱۴/۸۸ و ۳۵/۰۹ درصدی محتوای نسبی آب برگ در

مقایسه با تیمار عدم کاربرد براسینولید شد (شکل ۱). در شرایط تنش خشکی، کاربرد براسینولید می‌تواند به دلیل تأثیر بر محتوای پروتئین‌ها، فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز، تولید اتیلن، ذخیره پلی‌آمین‌ها و محتوای نسبی آب باعث افزایش جذب و نگهداری آب در سلول‌های گیاهی شود (Talaat & Shawky, 2016). براسینولید ممکن است در تنظیم عملکرد روزنه‌ها نقش داشته باشد. روزنه‌ها وظیفه کنترل میزان آب و گازهای موجود در گیاهان را بر عهده دارند. افزایش فعالیت روزنه می‌تواند منجر به بهبود تعادل آب در گیاه شود. این هورمون همچنین تأثیرگذاری خود را به واسطه تنظیم فعالیت آنزیم‌های مرتبط با فرآیند متابولیسم آب و حفظ تعادل آبی گیاهان اعمال می‌کند. علاوه بر این از طریق سنتز سلولز، استحکام دیواره سلولی را افزایش داده که اولین خط دفاعی در برابر تنش‌های محیطی به شمار می‌آیند (Bartwal & Arora, 2020).

فعالیت آنزیم کاتالاز

مطابق با جدول تجزیه واریانس، اثرات ساده آبیاری و براسینولید در سطح احتمال یک درصد بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار شد. باین‌حال برهم‌کنش دوگانه تأثیر معنی‌داری را در پی نداشت (جدول ۳). مقایسه میانگین نشان داد که واکنش آنزیم کاتالاز با افزایش در سطوح تنش ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری مطلوب، به میزان ۴۵/۷۴ و ۸۱/۹۱ درصد به نسبت تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد افزایش یافت (جدول ۴).

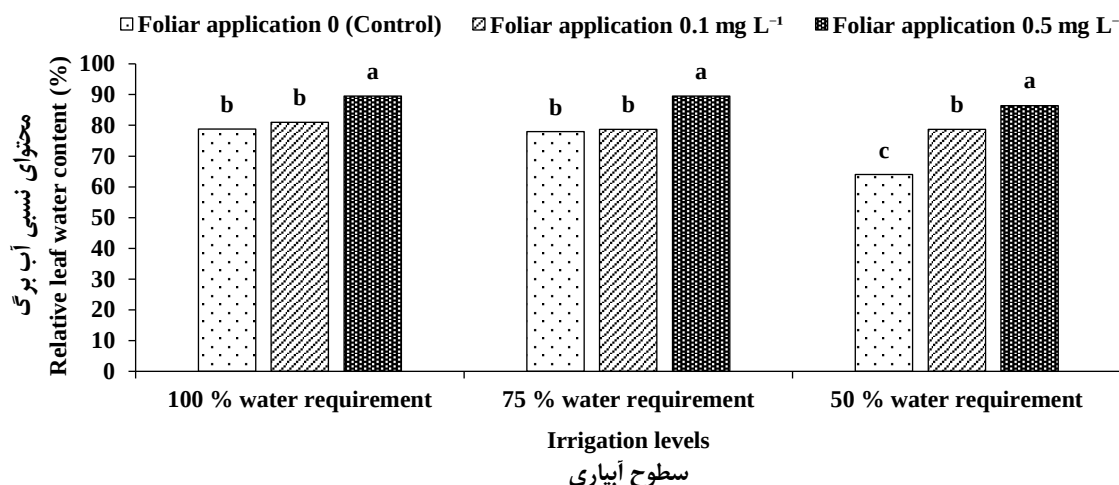
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر آبیاری و براسینولید برای برخی از صفات فیزیولوژیک آفتابگردان

Table 3- Analysis of variance of the effect of irrigation and brassinolide for some physiological traits of sunflower

منابع تغییر	درجه آزادی	محتوای نسبی آب برگ	آنزیم کاتالاز	آنزیم پراکسیداز	آنزیم سوپراکسید دیسموتاز
S.O.V	df	Relative water content	Catalase	Peroxidase	Superoxide dismutase
تکرار	2	259.76	0.08	0.87	0.50
Replication					
آبیاری	2	120.84*	1.33**	36.66**	25.45**
Irrigation (I)					
خطای اصلی	4	24.93	0.01	0.06	0.11
Main plot error					
براسینولید	2	515.83**	0.12**	5.33**	6.79**
Brassinolide (B)					
I $\times$ B	4	15.31*	0.01 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.31*
خطای فرعی	12	15.79	0.01	0.24	0.05
Sub plot error					
ضریب تغییرات		4.9	7.4	9.9	7.7
CV (%)					

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

ns, ** and *: indicate nonsignificant and significant at the 1 and 5 percent error probability levels, respectively.



شکل ۱- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در سطوح رژیم آبیاری برای محتوای نسبی آب برگ در آفتابگردان
Figure 1- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for relative leaf water content in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure.

کاتالاز را از طریق فعال‌سازی مسیرهای سیگنالی مربوط به پروتئین کینازها و فسفاتازها افزایش دهد (Yaqoob, Jan, Raman, Siddique, & John, 2022). تشدید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمارشده با براسینولید به‌واسطه افزایش بیان ژن‌های مربوطه و تسریع سنتز این آنزیم‌ها رخ می‌دهد (Planas-Riverona et al., 2019). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز تحت کاربرد براسینولید در لوبیا چیتی نیز عنوان شده است (Hajiri & Pazoki, 2023).

فعالیت آنزیم پراکسیداز

براساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات ساده آبیاری و محلول‌پاشی براسینولید در سطح احتمال یک درصد بر میزان پراکسیداز معنی‌دار گردید، اما برهم‌کنش آن‌ها برای صفت مذکور معنی‌دار نشد (جدول ۳). مقایسه میانگین سطوح آبیاری نشان داد که بیشترین میزان پراکسیداز در تیمار تنش شدید (۵۰ درصد آبیاری مطلوب) با میانگین ۷/۰۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ و کم‌ترین میزان پراکسیداز در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد آبیاری مطلوب) با میانگین ۳/۰۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ به دست آمد و از این جهت، فعالیت پراکسیداز با افزایش ۱/۳۲ برابری مواجه شد (جدول ۴). تنش خشکی، مشابه سایر تنش‌های زیستی و غیرزیستی منجر به انباشت گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در سلول‌های گیاهی می‌شود.

احتمالاً انسداد روزنه‌ها در پاسخ به تنش خشکی موجب افزایش دمای برگ شده که این امر شرایط را برای تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن تسهیل می‌کند. در نتیجه آن، تخریب ساختارهای فتوسنتزی، فرآیند پراکسیداسیون لیپیدها، تخریب پروتئین‌های غشایی و اکسیداسیون ترکیبات زیستی حیاتی تشدید می‌شود. در چنین شرایطی، آنزیم‌های اکسیداتیو از جمله کاتالاز به‌صورت القایی فعال شده و با تجزیه هیدروژن پراکسید و سایر گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن، نقش مؤثری در کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی ایفا می‌کنند (Huchzermeyer et al., 2022). هم‌سو با نتایج حاضر، یافته‌های احمد و همکاران (Ahmad et al., 2014) نیز نشان داد که افزایش فعالیت کاتالاز متناسب با افزایش سطوح تنش خشکی بود.

مقایسه میانگین سطوح محلول‌پاشی براسینولید نشان داد که بیشترین میزان کاتالاز (۱/۴۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در تیمار ۵/۰ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید به دست آمد که با تیمار ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید (۱/۳۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) تفاوت معنی‌داری نداشت، اما در مقایسه با شاهد (عدم محلول‌پاشی) با اختلاف ۱۸/۸۵ درصدی همراه بود (جدول ۴). براسینولیدها از طریق القاء تولید مولکول‌های واسطه نظیر نیتریک اکسید و تنظیم بیوسنتز اسیدآبسیزیک، با افزایش غلظت داخلی این هورمون موجب فعال‌سازی مسیرهای آنتی‌اکسیدانی می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که نیتریک اکسید قادر است فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری و براسینولید برای کاتالاز و پراکسیداز در آفتابگردان

تیمار آزمایش	سطوح تیمار	فعالیت کاتالاز Catalase (mg g ⁻¹ FW)	فعالیت پراکسیداز Peroxidase (mg g ⁻¹ FW)
Experimental treatment	Treatment levels		
آبیاری Irrigation	آبیاری ۱۰۰ درصد 100 percent irrigation	0.94 ^{c*}	3.04 ^c
	آبیاری ۷۵ درصد 75 percent irrigation	1.37 ^b	4.89 ^b
	آبیاری ۵۰ درصد 50 percent irrigation	1.71 ^a	7.07 ^a
براسینولید Brassinolide (mg L ⁻¹)	0	1.22 ^b	4.23 ^c
	0.1	1.35 ^a	5.00 ^b
	0.5	1.45 ^a	5.77 ^a

* حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال خطا پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

* Similar letters in each column are not significantly different from each other based on the LSD test at the 5% error probability level.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

تجزیه واریانس داده‌ها نشان از معنی‌داری برهم‌کنش آبیاری × براسینولید در سطح احتمال خطای پنج درصد بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز داشت (جدول ۳). یافته‌ها نشان می‌دهد که بروز تنش خشکی در سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب با افزایش ۲/۵۰ و ۴/۳۹ برابری فعالیت سوپراکسید دیسموتاز نسبت به آبیاری مطلوب همراه بود (شکل ۲). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر سوپراکسید دیسموتاز نقش حیاتی در حفاظت از غشاهای سلولی و ماکرومولکول‌های زیستی در برابر آسیب اکسیداتیو ایفا کرده و غلظت هیدروژن پراکسید و سوپراکسید سلول را تنظیم می‌کنند. سوپراکسید با تغییر تعامل پروتئین‌ها و لیپیدها، غشاء را در معرض اکسیژن قرار داده و به عملکرد آن آسیب می‌زند. بنابراین تحت این شرایط، تولید رادیکال پراکسید افزایش می‌یابد (Bogati & Walczak, 2022).

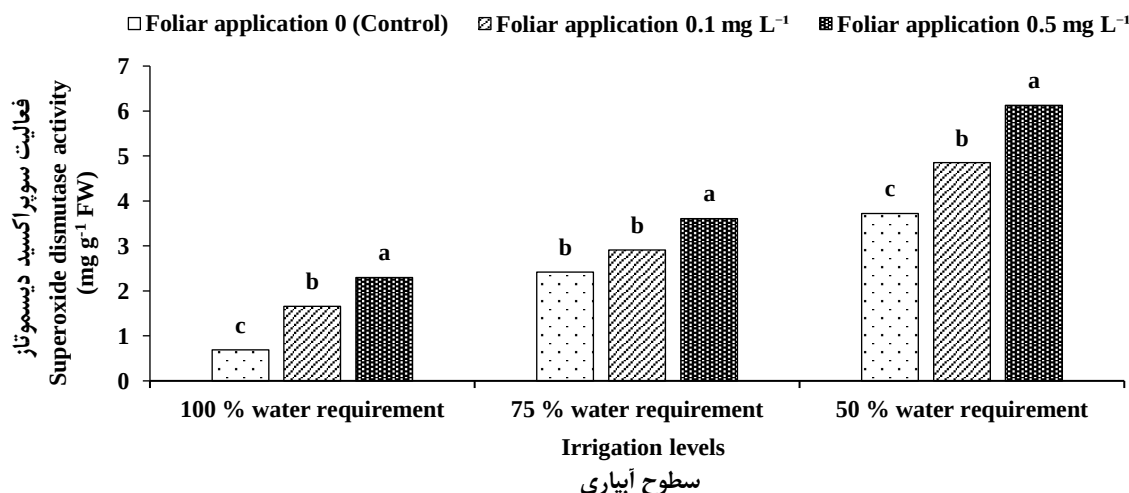
نتایج این تحقیق با یافته‌های اشرف و صدیقی (Ashraf & Siddiqi, 2016) در افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تحت تیمارهای تنش آبی در آفتابگردان مطابقت دارد. نتایج مقایسه میانگین نشانگر آن است که میزان فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در هر یک از سطوح آبیاری با افزایش محلول‌پاشی هورمون براسینولید افزایش یافت، به گونه‌ای که در سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری، اعمال محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید به ترتیب عامل افزایش ۲/۳۳ برابری و ۴۹/۱۷ و ۶۵ درصدی فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (در مقایسه با عدم محلول‌پاشی هورمون) شد (شکل ۲). براسینولید به‌طور غیرمستقیم (از طریق بیان ژن‌های NCED و پیش‌سازهای آنزیمی) بر متابولیسم اسیدآسیزیک تأثیر می‌گذارد. افزایش سطح اسیدآسیزیک در پاسخ به براسینولید، به‌ویژه در شرایط تنش‌های محیطی مانند خشکی، می‌تواند فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی در گیاهان را تحریک کند. یکی از اثرات مهم

این تجمع می‌تواند باعث ایجاد تنش اکسیداتیو و آسیب به ساختارهای حیاتی سلولی گردد. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در سیستم دفاعی، نقش مهمی در کاهش اثرات تنش اکسیداتیو و حفاظت از گیاهان در شرایط خشکی ایفا می‌کند. این آنزیم از طریق تجزیه هیدروژن پراکسید و خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن، به حفظ تعادل اکسیداتیو و پایداری سلولی کمک کرده و به عنوان یک نشانگر زیستی در مطالعات مرتبط با تحمل گیاه به تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته است (Ghassemi-Golezani, Ghassemi, & Zehtab-Salmasi, 2018).

مقایسه میانگین سطوح محلول‌پاشی براسینولید گواه آن بود که بیشترین میزان پراکسیداز (۵/۷۷ میلی‌گرم بر وزن تر برگ) در تیمار ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید و کمترین میزان این صفت (۴/۲۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در شاهد به دست آمد. در واقع، محلول‌پاشی براسینولید موجب افزایش ۳۶/۴۰ درصدی فعالیت پراکسیداز گردید (جدول ۴). براسینولید با تحریک مسیرهای سیگنالی وابسته به کینازهای پروتئین، مانند مسیرهای مرتبط با پروتئین کیناز وابسته به کلسیم (Ca²⁺-PKC) و پروتئین کیناز فعال شده توسط براسینولید (BRI1)، می‌تواند به‌طور غیرمستقیم بر بیان ژن‌هایی که مسئول سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی هستند، تأثیر بگذارد. این مسیرها ممکن است به افزایش بیان ژن‌های پراکسیداز و سایر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی منجر شوند. به این ترتیب، براسینولید می‌تواند از طریق تنظیم سطح بیان ژن پراکسیداز، سنتز این آنزیم را در گیاهان افزایش دهد (Hafeez et al., 2021). در این زمینه مطرح شده است که کاربرد براسینواستروئید فعالیت پراکسیداز را در آفتابگردان افزایش داده و کاهش تنش اکسیداتیو را در پی داشته است (El-Beltagi & El-Metwally, 2017).

همین رابطه، پژوهشی در آفتابگردان نشان داد که کاربرد براسینواستروئید عامل افزایش سوپراکسید دیسموتاز تحت تیمارهای تنش خشکی بوده است (El-Beltagi & El-Metwally, 2017).

اسیدآبسیزیک، تحریک تولید آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز است که مسئول خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد اکسیژن و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو در سلول‌ها هستند (Gao et al., 2024). در



شکل ۲- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در هر سطح رژیم آبیاری برای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در آفتابگردان
Figure 2- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for superoxide dismutase in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری، حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure.

شاخص سطح برگ

تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش دوگانه آبیاری × براسینولید در سطح حتمال پنج درصد برای میزان شاخص سطح برگ معنی‌دار شد (جدول ۵). اعمال تیمار تنش موجب کاهش ۷/۳۶ و ۵۷/۴۸ درصدی شاخص سطح برگ در سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد به نسبت آبیاری ۱۰۰ درصد شد (شکل ۳). کاهش محتوای رطوبتی خاک و گیاه منجر به تنش خشکی و تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که به غشاها، پروتئین‌ها و کلروفیل آسیب اکسیداتیو وارد می‌کند. این فرآیند باعث تخریب سلول‌های مزوفیل و کاهش شاخص سطح برگ‌های (LAI) می‌شود. بسته شدن روزنه‌ها و کوچک شدن برگ‌ها به عنوان سازوکار دفاعی برای حفظ آب، اگرچه از تعرق جلوگیری می‌کند، اما فتوسنتز را محدود کرده و در ادامه تولید زیست‌توده را کاهش می‌دهد (Abaszadeh et al., 2024).

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه تحت سطوح آبیاری نشان‌دهنده بهبود شاخص سطح برگ با افزایش کاربرد محلول‌پاشی

براسینولید بود. در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۵۰ درصد، اعمال ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید موجب افزایش ۱۲/۲۶ و ۴۵/۴۱ درصدی شاخص سطح برگ در مقایسه با عدم محلول‌پاشی شد (شکل ۳). با این وجود تیمارهای محلول‌پاشی هورمون در سطح آبیاری ۷۵ درصد تفاوت آماری با شاهد (عدم محلول‌پاشی) نشان ندادند (شکل ۳). براسینولیدها از طریق فعال‌سازی ژن‌های مرتبط با تقسیم و توسعه سلولی باعث تحریک رشد برگ‌ها می‌شوند (Hassanuzzaman et al., 2015). همچنین می‌توانند با افزایش فعالیت آنزیم‌های مربوط به بیوسنتز کلروفیل و کاهش تجزیه آن، یا به عبارت دیگر از طریق مهار ژن‌های مرتبط با پیری برگ و فعال‌سازی آنتی‌اکسیدان‌ها، از تجزیه زودرس برگ‌ها جلوگیری کرده و سطح برگ را در طول دوره تنش خشکی حفظ کنند. این امر منجر به ذخیره بیشتر مواد تغذیه‌ای شده و فرآیند رشد را بهبود می‌بخشد (Vardhini & Anjum, 2015). گزارش شده است براسینولید سبب افزایش شاخص سطح برگ ذرت در مقایسه با شاهد شد (AL Bakri & AL-Zubaidy, 2023).

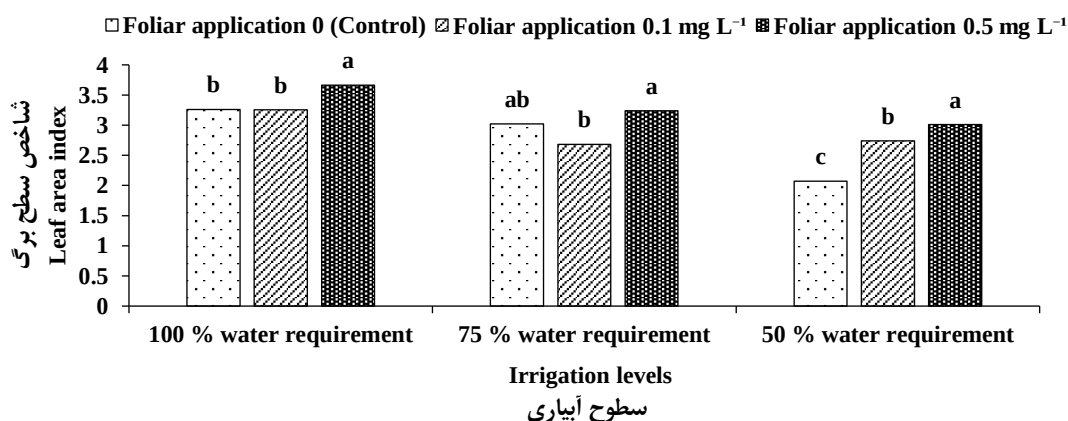
جدول ۵- تجزیه واریانس اثر آبیاری و براسینولید بر خصوصیات زراعی آفتابگردان

Table 5- Analysis of variance of the effect of irrigation and brassinolide on agronomic characteristics sunflower

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	شاخص سطح برگ Leaf area index	وزن طبق بدون دانه Weight per head without seeds	وزن طبق با دانه Weight per head with seeds	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد روغن Oil yield
تکرار Replication	2	0.93	8639	210553	356	24071
آبیاری Irrigation (I)	2	1.38**	11506*	10591542**	68881**	1261177**
خطای اصلی Main plot error	4	0.05	2313	96232	134	13239
براسینولید Brassinolide (B)	2	0.67**	25986* ⁸	1452997*	15557**	298393**
I×B	4	0.21*	5566 ^{ns}	68916 ^{ns}	624*	19834*
خطای فرعی Sub plot error	12	0.05	1748	215211	128	3771
ضریب تغییرات CV (%)		7.7	8.6	15.9	5.5	7.9

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

ns, ** and *: indicate nonsignificant and significant at the 1 and 5 percent error probability levels, respectively.



شکل ۳- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در هر سطح رژیم آبیاری برای شاخص سطح برگ در آفتابگردان

Figure 3- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for leaf area index in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری، حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure.

(۵)

وزن طبق بدون دانه و با دانه

بر مبنای مقایسه میانگین سطوح آبیاری، وزن طبق بدون دانه متناسب با افزایش شدت تنش خشکی کاهش یافت، به گونه‌ای که تیمار آبیاری ۵۰ درصد عامل افت ۱۳/۶۵ درصدی این صفت به نسبت آبیاری ۱۰۰ درصد شد (جدول ۶). از سوی دیگر، بیشترین وزن طبق با دانه (۳۵۴۰/۹ گرم) در تیمار آبیاری کامل به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمار تنش متوسط نداشت، اما در مقایسه با تیمار تنش

تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده آبیاری (در سطح احتمال پنج درصد) و محلول‌پاشی براسینولید (در سطح احتمال یک درصد) بر وزن طبق بدون دانه معنی‌دار بود. همچنین برای وزن طبق پر نیز اثرات ساده آبیاری و محلول‌پاشی براسینولید (در سطوح احتمال یک و پنج درصد) معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش‌های دوگانه آبیاری × براسینولید بر هیچ یک از این دو صفت اثر معنی‌داری نداشت (جدول

شدید (۱۶۶۱/۵ گرم) اختلاف ۵۳/۰۷ درصدی را بروز داد (جدول ۶). تنش خشکی همزمان با کاهش محتوای رطوبتی خاک و گیاه موجب افت فعالیت فتوسنتزی از طریق بسته شدن روزنه‌ها و تخریب کلروفیل می‌شود که سطح فتوسنتزکننده را کاهش می‌دهد. این امر منجر به کاهش تولید محصولات فتوسنتز و در نتیجه محدودیت در انتقال مواد فتوسنتزی از منابع (برگ‌ها) به مخازن (دانه‌ها) می‌شود (Jaleh, 2017). کاهش فتوسنتز و افت تولید زیست‌توده، ظرفیت پر شدن دانه‌ها را کاهش داده و وزن طبق با دانه و بدون دانه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. باین‌حال، کاهش محسوس‌تر وزن طبق با دانه نشان می‌دهد که افت عملکرد عمدتاً ناشی از کاهش وزن دانه‌ها است. این فرآیند احتمالاً به دلیل اختلال در تخصیص منابع و محدودیت دسترسی به آب و مواد مغذی رخ می‌دهد که می‌تواند باعث کاهش رشد زایشی نسبت به روشی شود. در نتیجه، بسته به شدت و مدت تنش خشکی، گیاه ممکن است بخشی از منابع خود را برای حفظ ساختارهای حیاتی به‌جای تولید دانه تخصیص دهد که در نهایت سبب کاهش بهره‌وری گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود. گزارش شده است که وزن طبق و تعداد دانه در طبق گیاه آفتابگردان تحت شرایط تنش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Farooq, Wahid, Kobayashi, Fujita & Basra, 2009). مقایسه میانگین سطوح مختلف محلول‌پاشی براسینولید نمایانگر

تأثیر مثبت و معنی‌دار این هورمون در افزایش وزن طبق پر و خالی دارد. بیشترین وزن طبق بدون دانه (۵۳۸/۳۲ گرم) و وزن طبق با دانه (۳۱۶۶ گرم) در تیمار محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید و کمترین وزن طبق بدون دانه (۴۳۰/۹۳ گرم) و وزن طبق با دانه (۲۴۵۰/۷ گرم) در تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) به دست آمد. از این جهت، اعمال محلول‌پاشی در بالاترین سطح کاربردی در این آزمایش، به‌ترتیب سبب افزایش ۲۴/۹۲ و ۲۹/۱۸ درصدی وزن طبق بدون دانه و با دانه شده است (جدول ۶). براسینولیدها با افزایش نرخ فتوسنتز، تقویت تولید محصولات فتوسنتزی و تسهیل انتقال آن‌ها به دانه‌ها، نقش مهمی در بهبود وزن طبق با دانه ایفا می‌کنند. این هورمون از طریق افزایش سنتز کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی موجب پر شدن بهتر دانه‌ها می‌شود. همچنین با تحریک تقسیم و توسعه سلولی، انباشت بیشتر مواد ذخیره‌ای مانند نشاسته و پروتئین را در دانه‌ها تسریع می‌کند (Chen, Hu, Jiang, & Wang, 2024). علاوه‌بر این، با کاهش آسیب اکسیداتیو و فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، براسینولید از تخریب برگ‌ها جلوگیری کرده و طول عمر برگ‌ها را افزایش می‌دهد، که به حفظ سطوح فتوسنتزکننده و تولید مواد فتوسنتزی در طول دوره رشد کمک می‌کند (Vardhini & Anjum, 2015).

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری و براسینولید برای وزن طبق بدون دانه و با دانه در آفتابگردان

Table 6- Comparison of mean main effects of irrigation and brassinolide for seedless and seeded head weight in sunflower

تیمار آزمایش	سطوح تیمار	وزن طبق بدون دانه	وزن طبق با دانه
Experimental treatment	Treatment levels	Weight per head without seeds (gr)	Weight per head with seeds (gr)
آبیاری Irrigation	آبیاری ۱۰۰ درصد 100 percent irrigation	518.19 ^a	3540.9 ^a
	آبیاری ۷۵ درصد 75 percent irrigation	491.68 ^{ab}	3540.0 ^a
	آبیاری ۵۰ درصد 50 percent irrigation	447.42 ^b	1661.5 ^b
براسینولید Brassinolide (mg L ⁻¹)	0	430.93 ^c	2450.7 ^b
	0.1	488.04 ^b	3125.6 ^a
	0.5	538.33 ^a	3166.0 ^a

* حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

* Similar letters in each column are not significantly different from each other based on the LSD test at the 5% error probability level

عملکرد دانه

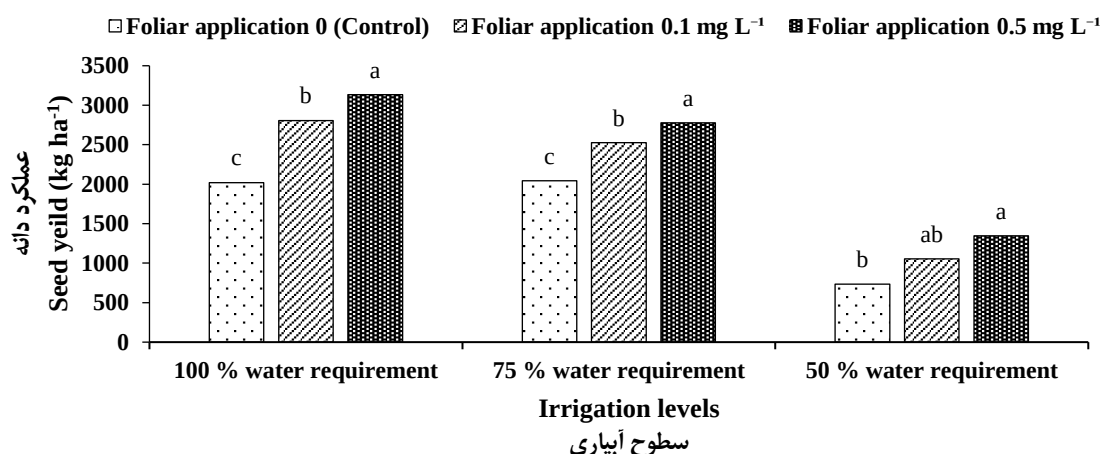
جدول تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش دوگانه آبیاری × براسینولید در سطح احتمال پنج درصد برای عملکرد دانه معنی‌دار شد (جدول ۵). داده‌های آزمایشی نشان‌دهنده کاهش عملکرد دانه با افزایش سطوح تنش خشکی می‌باشد، به‌طوری‌که تیمار تنش شدید کامل با کاهش ۶۱/۵۶ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری مطلوب همراه شد (شکل ۴). کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش

خشکی می‌تواند به دلیل سقط و از بین رفتن فندقه و کاهش باروری گیاه در این مرحله از رشد باشد. کاهش عملکرد دانه می‌تواند به‌طور مستقیم در اثر بسته شدن روزنه‌ها و یا به‌طور غیرمستقیم در اثر افزایش آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین‌ها و کلروفیل‌ها باشد که در نهایت باعث کاهش میزان فتوسنتز و به‌تبع آن کاهش مقدار مواد فتوسنتزی و در نهایت عملکرد دانه می‌گردد. عرب و همکاران (Arab et al., 2023) گزارش کردند که با افزایش تبخیر از تشتک تبخیر تا

فیزیولوژیکی گیاه در شرایط نرمال و تنش خشکی موجب افزایش تولید مواد غذایی برای گل‌ها و بذرها در حال رشد می‌شود. این امر به بهبود رشدونمو بذرها و در نتیجه افزایش عملکرد دانه منجر می‌گردد. افزایش عملکرد دانه تحت تأثیر براسینولید احتمالاً ناشی از بهبود جذب بیشتر دی‌اکسیدکربن است که با افزایش تجمع رنگدانه‌های فتوسنتزی، به‌ویژه کلروفیل و محتوای بالاتر پروتئین‌های محلول مرتبط است (Chen et al., 2024). هم‌سو با این نتایج، حامد و عبدالله (Hamed & Abdullah, 2022) نیز افزایش عملکرد دانه آفتابگردان را با کاربرد براسینولید گزارش کردند.

۱۸۰ میلی‌متر، عملکرد دانه آفتابگردان به میزان ۳۷/۵ درصد کاهش یافت.

مقایسه میانگین‌ها مشخص نمود که با افزایش میزان براسینولید تا ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر، اثرات تنش خشکی کاهش یافته و میزان عملکرد دانه بهبود یافت. در هر یک از سطوح آبیاری، بیشترین میزان عملکرد مربوط به بالاترین سطح براسینولید بود، به‌گونه‌ای که در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی موجب افزایش ۵۴/۴۰، ۵۹/۹۰ و ۸۳/۵۷ درصدی عملکرد دانه در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد شد (شکل ۴). مصرف براسینولید با حفظ یا تقویت فرآیندهای



شکل ۴- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در هر سطح رژیم آبیاری برای عملکرد دانه در آفتابگردان

Figure 4- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for seed yield in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری، حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure

رخ می‌دهد. بنابراین، اگرچه کاهش درصد روغن در دانه‌ها تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد، اما کاهش عملکرد دانه و تولید زیست‌توده، عامل اصلی کاهش میزان روغن تولیدی بوده است. مطابق با این نتایج، مرادی قه‌دریجانی و همکاران نیز (Moradi-Ghahderijani, Jafarian, & Keshavarz, 2017) از تأثیر منفی و معنی‌دار تنش خشکی بر عملکرد روغن دانه آفتابگردان گزارش کردند.

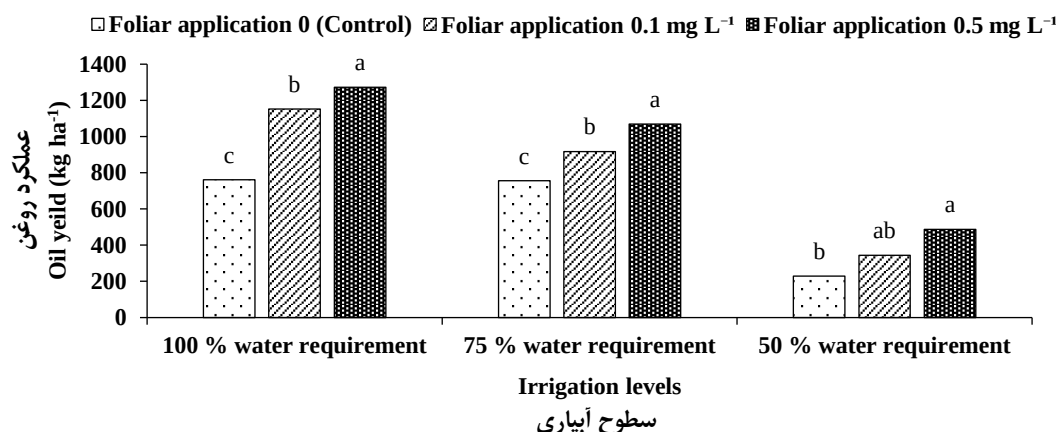
در هر یک از سطوح تیمار آبیاری، کاربرد محلول‌پاشی براسینولید با افزایش عملکرد روغن همراه بود. کاربرد سطح محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد به‌ترتیب موجب افزایش ۶۷/۰۳، ۴۱/۴۹ و ۶۸/۶۶ درصدی عملکرد روغن در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی شد (شکل ۵). مصرف براسینولید تحت شرایط تنش خشکی می‌تواند با بهبود کارایی فتوسنتزی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، عملکرد روغن را بهبود بخشد. همچنین براسینولید با بهبود راندمان جذب دی‌اکسیدکربن و

عملکرد روغن

براساس نتایج تجزیه واریانس، برهم‌کنش آبیاری × براسینولید در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد روغن معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین آشکار نمود که عملکرد روغن متأثر از سطوح تنش خشکی به‌صورت معنی‌داری کاهش یافته است. کم‌ترین میزان عملکرد روغن تحت آبیاری ۵۰ درصد مشاهده شد که در مقایسه با تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد با کاهش ۷۰/۰۱ درصدی مواجه بود (شکل ۵). تنش خشکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد روغن در گیاهان روغنی است. این تنش به‌طور مستقیم باعث کاهش درصد روغن در دانه‌ها می‌شود، اما تأثیر عمده‌تر آن بر کاهش عملکرد دانه است. کاهش حجم دانه‌ها و محدودیت در تجمع مواد ذخیره‌ای مانند روغن، اغلب به‌واسطه افت فعالیت فتوسنتزی و اختلال در فرآیندهای متابولیکی مرتبط با پر شدن دانه‌ها و سنتز روغن در بافت‌های مخزن

می‌شود (Nasser & Sarhan, 2023). وحدی و قلی‌نژاد (Vahdi & GHolinejad, 2015) گزارش کردند که تنش خشکی سبب کاهش عملکرد روغن دانه سویا (*Glycine max* L.) گردید. ایشان ابراز داشتند که تنش خشکی باعث افزایش ضخامت پوست دانه و کاهش درصد مغز به کل دانه شد که برآیند آن‌ها کاهش درصد روغن بود.

افزایش تولید کلروفیل، به افزایش تجمع مواد فتوسنتزی و افزایش درصد روغن در دانه‌ها کمک می‌کند. با این حال، اثر اصلی براسینولید در بهبود عملکرد روغن، از طریق تحریک رشد و توسعه دانه‌ها، افزایش اندازه و وزن دانه و بهبود پر شدن دانه‌ها است که در نهایت منجر به افزایش عملکرد کل دانه و در نتیجه افزایش تولید روغن



شکل ۵- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در هر سطح رژیم آبیاری برای عملکرد روغن در آفتابگردان

Figure 5- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for oil yield in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری، حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure

نتیجه‌گیری

روغن را در پی داشته است. در این راستا، با در نظر گرفتن محدودیت و کاهش سهولت دسترسی به منابع آبی، استفاده از این نوع محرک‌های رشد در کشاورزی پایدار می‌تواند بسیار مفید باشد. با توجه به نتایج این پژوهش، به نظر می‌رسد که محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید تأثیر مثبتی در کاهش پیامدهای تنش خشکی بر عملکرد دانه و روغن آفتابگردان داشته است. با این حال، از آنجایی که این مطالعه در یک فصل زراعی انجام شده است، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری در شرایط متنوع اقلیمی و با تکرارهای بیشتر انجام گیرد تا امکان ارائه یک توصیه مدیریتی قطعی فراهم شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از خانم مهندس یاسمین کرمی، کارشناس محترم آزمایشگاه زراعت دانشگاه یاسوج برای پشتیبانی در اجرای آزمایش‌ها و از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه یاسوج به جهت تأمین اعتبار لازم برای انجام این طرح، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری بر تمامی صفات مورد مطالعه تأثیر منفی گذاشت. با این حال، کاربرد محلول‌پاشی براسینولید در سطوح مختلف تیمار آبیاری، تا حدودی توانست اثرات سوء تنش خشکی را کاهش دهد. این نتایج حاکی از آن است که تنش خشکی با افزایش تولید رادیکال‌های آزاد، آسیب به غشاء سلولی و ایجاد اختلال در تعادل هورمونی و فیزیولوژیکی گیاه منجر به کاهش رشد رویشی و زایشی و در نهایت کاهش عملکرد می‌شود. اما کاربرد براسینولید می‌تواند به‌عنوان یک محرک رشد و افزایش‌دهنده تحمل به تنش خشکی برای آفتابگردان مورد استفاده قرار گیرد. براسینولید با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه، حفظ تعادل هورمونی و بهبود وضعیت آب و یون در گیاه، به افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی کمک کرد، به‌گونه‌ای که کاهش خسارت واردشده بر دستگاه فتوسنتزی با حفظ شاخص سطح برگ مطلوب در طی تنش خشکی منجر به بهبود تجمع مواد ذخیره‌ای و انتقال مناسب این مواد به طبق‌ها شده؛ در نتیجه افزایش عملکرد دانه و به‌دنبال آن عملکرد

References

1. Abaszadeh, B., Fanaee, S., & Bakhshi, D. (2024). Foliar application of *Silybum marianum* L. Gaertn. with plant growth regulators under different soil moisture conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 40(3), 562-580. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2024.364529.3405>
2. Aebi, H. (1984). Catalase *in vitro*. *Method of Enzymology*, 105, 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
3. Ahmad, P., Jamsheed, S., Hameed, A., Rasool, S., Sharma, I., Azooz, M. M., & Hasanuzzaman, M. (2014). Drought stress induced oxidative damage and antioxidants in plants. In *Oxidative damage to plants* (pp. 345-367). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00011-3>
4. AL Bakri, A. A. A., & AL-Zubaidy, S. A. A. H. (2023, September). Effect of irrigation periods and brassinolide growth regulator on the growth of maize (*Zea mays* L.). In *AIP Conference Proceedings*, 2845(1), 020010. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0157396>
5. Ansarifard, I., Mostafavi, K., Khosroshahli, M., Bihamta, M., & Ramshini, H. (2020). A study on genotype–environment interaction based on GGE biplot graphical method in sunflower genotypes (*Helianthus annuus* L.). *Food Science & Nutrition*, 8(7), 3327-3334. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1610>
6. Arab, R., Yadavi, A., Balouchi, H., & Alahdadii, H. (2023). The effects of iron and zinc foliar application on nutrients absorption improvement, seed yield and water use efficiency of sunflower under drought stress conditions. *Journal of Crops Improvement*, 25(4), 977-993. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2023.352118.2767>
7. Ashraf, F., & Siddiqi, E. H. (2024). Mitigation of drought-induced stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) via foliar application of Jasmonic acid through the augmentation of growth, physiological, and biochemical attributes. *BioMed Central Plant Biology*, 24(1), 592. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05273-4>
8. Balestrini, R., Chitarra, W., Antoniou, C., Ruocco, M., & Fotopoulos, V. (2018). Improvement of plant performance under water deficit with the employment of biological and chemical priming agents. *The Journal of Agricultural Science*, 156(5), 680-688. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000126>
9. Bartwal, A., & Arora, S. (2020). Brassinosteroids: Molecules with myriad roles. In A. Arora & A. Ramawat (Eds.), *Co-evolution of Secondary Metabolites* (pp. 869–895). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6_18
10. Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and applicable to acryl amide gels. *Annual Review of Biochemistry*, 44, 276-287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
11. Bogati, K., & Walczak, M. (2022). The impact of drought stress on soil microbial community, enzyme activities and plants. *Agronomy*, 12(1), 189. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010189>
12. Chaghakaboodi, Z., Mousavi, S. H., & Kakaei, M. (2024). The effect of 24-epibrassinolide (24-EBL) on physiological and biochemical pathways of lettuce (*Lactuca Sativa* L.) under drought stress conditions. *Crop Biotechnology*, 14(1), 15-28. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30473/cb.2024.70956.1964>
13. Chen, X., Hu, X., Jiang, J., & Wang, X. (2024). Functions and mechanisms of brassinosteroids in regulating crop agronomic traits. *Plant and Cell Physiology*, 65(10), 1568-1580. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcae044>
14. El-Beltagi, H. S., & El-Metwally, M. M. (2017). Alleviation of drought stress effects on sunflower (*Helianthus annuus* L.) by exogenous application of brassinosteroids. *Plant Growth Regulation*, 83(2), 267-279.
15. El-Beltagi, H. S., El-Sherif, A. M., & El-Metwally, M. M. (2019). Role of brassinosteroids in improving yield and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 88(2), 215-226.
16. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12
17. Gao, S., Wang, Y., Yu, S., Huang, Y., Liu, H., Chen, W., & He, X. (2020). Effects of drought stress on growth, physiology and secondary metabolites of two Adonis species in Northeast China. *Scientia Horticulturae*, 259, 108-795. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108795>
18. Gao, Y., Ma, X., Zhang, Z., Wang, X., & Wang, Y. (2024). Brassinolides signaling pathway: Tandem response to plant hormones and regulation under various abiotic stresses. *Horticulture Advances*, 2(1), 27. <https://doi.org/10.1007/s44281-024-00050-7>
19. García-López, J., Lorite, I. J., García-Ruiz, R., & Domínguez, J. (2014). Evaluation of three simulation approaches for assessing yield of rainfed sunflower in a Mediterranean environment for climate change impact modelling. *Climatic Change*, 124(1), 147-162. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1067-6>
20. Ghasemi, M., Jahanbin, S., Latifmanesh, H., Farajee, H., & Mirshekari, A. (2021). Effect of brassinolide foliar application on some physiological and agronomic characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress conditions. *Journal of Crop Production*, 14(1), 31-48. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.18084.2339>

21. Ghassemi-Golezani, K., Ghassemi, S., & Zehtab-Salmasi, S. (2018). Changes in essential oil-content and composition of ajowan (*Carum copticum* L.) seeds in response to growth regulators under water stress. *Scientia Horticulturae*, 231, 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.011>
22. Gholizadeh, A., Ghaffari, M., Payghamzadeh, K., & Kia, S. (2021). Study on relationships between yield and other agronomic traits and identification of the superior hybrids in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Crop Breeding*, 13(37), 171-184. (in Persian with English abstract). <http://doi.org/10.52547/jcb.13.37.171>
23. Hafeez, M. B., Zahra, N., Zahra, K., Raza, A., Batool, A., Shaukat, K., & Khan, S. (2021). Brassinosteroids: Molecular and physiological responses in plant growth and abiotic stresses. *Plant Stress*, 2, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100029>
24. Hajiri, K., & Pazoki, A. (2023). Investigating the role of brassinolide in tolerance to lead toxicity on growth and physiological traits of pinto beans. *Journal of Crop Production*, 16(3), 17-32. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2024.20577.2532>
25. Hamed, M. A., & Abdullah, B. H. (2022). The effect of brassinolide on the yield components, seed and oil yields of some sunflower cultivars. *Journal of Plant Production*, 13(6), 215-218. <https://doi.org/10.21608/JPP.2022.245281>
26. Hassan, A. M., & Mohamed, H. E. (2019). L-arginine pretreatment enhances drought resistance of sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants by increase in polyamines content. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(2), 600-605. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9873-0>
27. Hassanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Ahmad, S., & Fujita, M. (2015). *Exogenous application of phytoprotectants in legumes against environmental stress*. In Legumes under environmental stress: Yield, improvement and adaptations. pp. 161-197. Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118917091.ch11>
28. Hu, W., Lu, Z., Meng, F., Li, X., Cong, R., Ren, T., & Lu, J. (2020). The reduction in leaf area precedes that in photosynthesis under potassium deficiency: the importance of leaf anatomy. *New Phytologist*, 227(6), 1749-1763. <https://doi.org/10.1111/nph.16644>
29. Huchzermeyer, B., Menghani, E., Khardia, P., & Shilu, A. (2022). Metabolic pathway of natural antioxidants, antioxidant enzymes and ROS providence. *Antioxidants*, 11(4), 761. <https://doi.org/10.3390/antiox11040761>
30. Jaleh, D. (2017). *Metabolic adjustments, assimilate partitioning, and alterations in source-sink relations in drought-stressed plants*. In Photoassimilate distribution in plants and crops: Source-sink relationships. pp. 407-420. Routledge.
31. Johnson, C. M., & Ulrich, A. (1959). Analytical methods for use in plant analysis. *California Agricultural Experiment Station, Bulletin*, 766, 52-78.
32. Karami Borzabad, R., Peykarestan, B., & Baghbani-Arani, A. (2022). The effect of stopping irrigation and using superabsorbent on the morphological, quantitative and qualitative characteristics of sunflower grains. *Journal of Plant Ecophysiology*, 47(13), 32-44. (in Persian with English abstract)
33. Köppen, W. (1936). *Das Geographische System der Klimate*. In W. Köppen, & R. Geiger, eds. *Handbuch der Klimatologie*, Vol. 1, Part C. Gebruder Borntraeger, Berlin.
34. Liu, H., Song, S., Zhang, H., Li, Y., Niu, L., Zhang, J., & Wang, W. (2022). Signaling transduction of ABA, ROS, and Ca²⁺ in plant stomatal closure in response to drought. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23), 14824. <https://doi.org/10.3390/ijms232314824>
35. MacAdam, J. W., Nelson, C. J., & Sharp, R. E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue: I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant Physiology*, 99(3), 872-878. <https://doi.org/10.1104/pp.99.3.872>
36. Motiei, M. M., Sirousmehr, A. P., Khammari, I., & Naderi, A. (2023). Investigation of the effect of different irrigation regimes on seed yield, antioxidant enzyme activity and some quantitative traits of sunflower cultivars. *Crop Physiology Journal*, 14(55), 5-20. (in Persian with English abstract).
37. Nasser, S. E. D. M., & Sarhan, I. A. (2023, July). Effect of spraying with brassinolide on yield and its components of sesame cultivars. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1213, No. 1, p. 012028). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1213/1/012028>
38. Omid Nasab, D., Meskarbashee, M., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2024). The effect of deficit irrigation on grain yield and some physiological indicators of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(1), 71-88. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2023.83198.1258>
39. Omidinasab, D., Meskarbashee, M., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2023). Effect of deficit irrigation on grain yield and quality characteristics of oil content of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 97-108. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.353827.654972>
40. Planas-Riverola, A., Gupta, A., Betegón-Putze, I., Bosch, N., Ibañes, M., & Caño-Delgado, A. I. (2019). Brassinosteroid signaling in plant development and adaptation to stress. *Development*, 146(5), dev151894. <https://doi.org/10.1242/dev.151894>
41. Moradi-Ghahderijani, M., Jafarian, S., & Keshavarz, H. (2017). Alleviation of water stress effects and improved

- oil yield in sunflower by application of soil and foliar amendments. *Rhizosphere*, 4, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.06.002>
42. Ravi, V., & Indira, P. (1999). Crop physiology of sweetpotato. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 23, 277-338. <https://doi.org/10.1002/9780470650752.ch6>
43. Ritchie, S. W., & Nguyen, H. T. (1990). Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, 30, 105-111. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x>
44. Sheikh Mamo, B., Rahnama, A., & Hassibi, P. (2023). Evaluation of biochemical traits and seed yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to terminal heat stress in Ahvaz, Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 25(3), 275-293. (in Persian with English abstract).
45. Sirohi, G., & Kapoor, M. (2020). *Brassinosteroids in lowering abiotic stress-mediated damages*. In M. Hasanuzzaman, K. Nahar, & M. Fujita (Eds.). *Protective Chemical Agents in the Amelioration of Plant Abiotic Stress: Biochemical and Molecular Perspectives*. pp. 318-326. Wiley. 318-326. <https://doi.org/10.1002/9781119552154.ch15>
46. Talaat, N. B., & Shawky, B. T. (2016). Dual application of 24-epibrassinolide and spermine confers drought stress tolerance in maize (*Zea mays* L.) by modulating polyamine and protein metabolism. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(2), 518-533. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9557-y>
47. Tiwari, R. K., Lal, M. K., Kumar, R., Chourasia, K. N., Naga, K. C., Kumar, D., & Zinta, G. (2021). Mechanistic insights on melatonin-mediated drought stress mitigation in plants. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1212-1226. <https://doi.org/10.1111/ppl.13307>
48. Vahdi, N., & GHolinejad, E. (2015). Evaluation of drought tolerance of some soybean cultivars. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(1), 1-9. (in Persian with English abstract).
49. Vardhini, B. V., & Anjum, N. A. (2015). Brassinosteroids make plant life easier under abiotic stresses mainly by modulating major components of antioxidant defense system. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 67. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00067>
50. Woodson, J. D. (2022). Control of chloroplast degradation and cell death in response to stress. *Trends in Biochemical Sciences*, 47(10), 851-864. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2022.03.010>
51. Yaqoob, U., Jan, N., Raman, P. V., Siddique, K. H., & John, R. (2022). Crosstalk between brassinosteroid signaling, ROS signaling and phenylpropanoid pathway during abiotic stress in plants: Does it exist? *Plant Stress*, 4, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100075>
52. Yazdandoost Hamedani, M., Ghobadi, M., ghobadi, M. E., Jalali Honarmand, S., & Saeidi, M. (2022). The Effect of foliar application of some chemical compounds on antioxidant enzymes activity and chlorophyll fluorescence of sunflower in different irrigation conditions. *Journal of Crops Improvement*, 24(1), 1-14. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2021.307719.2432>
53. Zhou, R., Yu, X., Ottosen, C. O., Rosenqvist, E., Zhao, L., Wang, Y., & Wu, Z. (2017). Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. *BMC Plant Biology*, 17, 24-33. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-0974-x>



Research Article

Vol. 23, No. 4, Winter 2025, p. 497-509

The Effect of Microtuber Size and Phosphate Biofertilizer on Growth and Tuber Yield of Sante Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivar

N. Gharehbaghli^{1*}, A. Sepehri²

1- Crop and Horticultural Science Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran

2. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(* - Corresponding author's Email: n.gharehbaghli@areeo.ac.ir)

Received: 30 April 2025

Revised: 17 August 2025

Accepted: 25 August 2025

Available Online: 02 September 2025

How to cite this article:

Gharehbaghli, N., & Sepehri, A. (2025). The Effect of Microtuber Size and Phosphate Biofertilizer on Growth and Tuber Yield of Sante Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivar. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 497-509. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.93219.1390>

Introduction

Potato (*Solanum tuberosum* L.) is a globally significant crop whose productivity is substantially influenced by seed tuber quality and nutrient management. The Sante variety, prized for its disease resistance and processing qualities, shows particular sensitivity to these factors. Recent studies highlight that seed tuber size is a critical determinant of early growth vigor, influencing both carbohydrate reserves and meristematic potential. Larger tubers (>20 mm in diameter) generally exhibit 30–40% higher initial growth rates due to their greater sprouting capacity and faster establishment of photosynthetic activity. Concurrently, phosphate biofertilizers containing *Pseudomonas* and *Bacillus* strains have shown remarkable efficacy in potato systems, improving phosphorus availability by 50-70% through organic acid secretion and phosphatase activity. The interaction between tuber size and biofertilization remains underexplored, particularly regarding source-sink relationships during tuber initiation. Preliminary evidence suggests synergistic effects, where larger tubers' inherent advantages are amplified by biofertilizer-induced nutrient mobilization. This study investigates these dynamics in Sante potatoes, hypothesizing that optimal tuber size combined with dual-phase biofertilizer application will maximize yield components through: (1) enhanced canopy development, (2) improved phosphorus use efficiency, and (3) superior photoassimilate partitioning. The findings will advance precision management strategies for seed potato production systems.

Materials and Methods

A field experiment using the Sante potato cultivar was conducted in a factorial design in a randomized complete block design with three replications in the 1401 crop year. The microtubers were produced in the previous year through tissue culture and potting in greenhouse cultivation. The treatments included tuber size at three levels up to 20, 20-25 and 25-30 mm and application of Barvar 2 phosphate biofertilizer at three levels without phosphate biofertilizer (control), one application of phosphate biofertilizer (at the time of planting by dipping the tubers with biofertilizer) and two applications of phosphate biofertilizer at the time of planting and 4-6 leaves. Land preparation operations included semi-deep ploughing in spring and two stages of vertical disking. The seeds were sown in rows and ridges with row spacing of 75 cm and plant spacing of 20 cm. Each plot consisted of 6 rows, each 5 m in length. Irrigation was carried out regularly and according to the plant's water requirements during the growth period. Weed control was carried out manually. During the growth period, sampling of experimental plots was carried out every 10 days by randomly picking 5 plants from the assigned rows, and leaf area, leaf dry matter and total dry matter were measured to evaluate growth indices. At the time of



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.2025.93219.1390>

harvest, the number of stems, number of tubers, tuber dry matter, and total tuber yield were measured for each plot, and the harvest index was calculated. SAS version 9.4 software was used to analyse the data, and Microsoft Excel software was used to create graphs.

Result and Discussion

The results indicated that larger microtubers (25–30 mm) significantly ($p < 0.01$) enhanced growth and yield parameters. Total biomass ($6,201 \text{ kg ha}^{-1}$), number of tubers per plant (4.8), and tuber yield ($28,337 \text{ kg ha}^{-1}$) increased by 41%, 23%, and 63%, respectively, compared to smaller microtubers (15–20 mm). Two applications of phosphate biofertilizer also increased leaf area index (27.58%), tuber dry matter (33.19%), and harvest index (5.69%) compared to the control. The interaction of these two factors showed that the combination of 25–30 mm microtubers with two applications of biofertilizer produced the highest tuber yield ($31,524 \text{ kg ha}^{-1}$) and harvest index (89.03%).

Conclusion

This study investigated the effect of potato tuber size and phosphate biofertilizer application on the growth and yield of the new potato variety Sante. The results showed that tuber size and phosphate biofertilizer application had a significant effect on potato growth and yield indices. Larger tubers (25 to 30 mm) provided more energy for germination and early growth due to greater nutrient storage, which led to faster leaf formation and increased leaf area index (LAI). Also, applying phosphate biofertilizer twice had a greater effect on leaf area, stem number, tuber number, tuber yield, tuber dry matter, and total biomass compared to applying phosphate biofertilizer once and without fertilizer. The interaction between tuber size and phosphate biofertilizer was also significant for all measured traits. The highest yield and plant growth were observed in the combined treatment of 25–30 mm microtubers and two applications of phosphate biofertilizer. These results indicate that the use of larger microtubers, along with optimal use of phosphate biofertilizer can be used as an effective strategy to improve potato growth and yield under field conditions. Finally, this study emphasizes that choosing the appropriate size of microtubers and properly managing the use of phosphate biofertilizer can help increase productivity and sustainability in potato production. These findings can be used as a guide for farmers and researchers to optimize cultivation conditions and increase potato yield.

Keywords: Biological yield, Harvest index, Leaf area, Seed tuber

اثر اندازه ریزغده و کود زیستی فسفات بر رشد و عملکرد بذری سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) رقم سائته

نساء قره باغلی^{۱*}، علی سپهری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

چکیده

به منظور بررسی اثر اندازه غده و کود زیستی فسفات بر رشد و عملکرد سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) رقم سائته، آزمایشی در سال ۱۴۰۱ به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار در شهرستان همدان انجام گرفت. عوامل مورد بررسی شامل اندازه غده در سه سطح ۱۵ تا ۲۰، ۲۰ تا ۲۵ و ۲۵ تا ۳۰ میلی متر و مصرف کود زیستی فسفات در سه سطح بدون مصرف کود (شاهد)، مصرف یک بار کود زیستی فسفات (در زمان کاشت)، مصرف دو بار کود زیستی فسفات (در زمان کاشت و چهار تا شش برگ) بود. نتایج نشان داد که ریزغده های بزرگتر (۲۵-۳۰ میلی متر) به طور معنی داری ($p < 0.01$) عملکرد غده را بهبود بخشیدند، به طوری که عملکرد غده (۲۸۳۲۷ کیلوگرم در هکتار) نسبت به ریزغده های کوچکتر (۱۵-۲۰ میلی متر) ۶۳ درصد افزایش یافت. مصرف دو بار کود زیستی فسفات نیز موجب افزایش شاخص سطح برگ (۲۷/۵۸ درصد)، ماده خشک غده (۳۳/۱۹ درصد) و شاخص برداشت (۵/۶۹ درصد) نسبت به شاهد شد. برهم کنش این دو عامل نشان داد که ترکیب ریزغده های ۳۰-۲۵ میلی متر با مصرف دو بار کود زیستی، بالاترین عملکرد غده (۳۱۵۲۴ کیلوگرم در هکتار) و شاخص برداشت غده (۸۹/۰۳ درصد) را ایجاد کرد. به نظر می رسد که این بهبود به دلیل افزایش جذب فسفر، توسعه سریع تر تاج پوشش و انتقال مواد فتوسنتزی به غده ها بوده است. یافته ها تأکید می کنند که استفاده از ریزغده های با اندازه مناسب همراه با کود زیستی فسفات می تواند راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد و کاهش مصرف کودهای شیمیایی در کشت سیب زمینی باشد.

واژه های کلیدی: سطح برگ، شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیک، عملکرد غده، غده بذری

مقدمه

سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) محصول غده ای است که به دلیل عملکرد زیاد در واحد سطح و داشتن ارزش غذایی بالا، نقش مهمی در تغذیه مردم جهان دارد (Biswas & Dutta, 2020). در شرایط فعلی با رشد سریع جمعیت و محدود بودن مناطق کشاورزی و عدم امکان گسترش بیشتر سطح زیر کشت، به منظور جلوگیری از اختلاف بین تقاضا و عرضه، کشت سیب زمینی با بازدهی کمی و کیفی بیشتر در واحد سطح مورد نظر است. بنابراین افزایش عملکرد

در واحد سطح با ملاحظه مشخصه های مؤثر بر آن، همواره بخشی از تحقیقات مربوط به سیب زمینی را به خود اختصاص داده است. علاوه بر شرایط اقلیمی، خاکی و نهاده های کشاورزی، برخی مشخصه های موجود در گیاه سیب زمینی، عملکرد را تحت تأثیر قرار می دهد (Cantuna Petrar et al., 2024). در میان عوامل مربوط به گیاه، اندازه غده های بذری تأثیری مهم بر عملکرد دارد، به طوری که گزارش شده است در کشت تجاری، عملکرد حاصل از غده های بذری با قطر ۴۶ الی ۵۵ میلی متر نسبت به ۲۵ الی ۳۴ میلی متر بیشتر بوده است (Ebrahim, Mohammad, & Ayalew, 2018). اندازه غده ها برای تولید غده های بذری مهم ترین شاخص برای اندازه گیری کیفیت بذری سیب زمینی از نظر تعداد جوانه می باشد. غده هایی با اندازه مناسب و کیفیت بیشتر، مقاوم در برابر پوسیدگی و استحکام بالاتر مورد توجه هستند (Kilonzi et al., 2024). به اظهار کاسیو و همکاران (Cassio et al., 2019)، با افزایش اندازه غده بذری، سرعت رشد

۱- بخش تحقیقات علوم زراعی-باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: n.gharebaghli@areeo.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.93219.1390>

۲۲ سویه باکتری حل‌کننده فسفات در خاک‌های بومی ایران، برای استفاده در فرمولاسیون آن انتخاب شده است. یک سویه از این باکتری‌ها با تولید اسیدهای آلی باعث رهاسازی فسفات از ترکیبات معدنی می‌شود و سویه دیگر با تولید و ترشح آنزیم فسفاتاز، باعث رها سازی فسفات از ترکیبات آلی می‌شود (Iggehon et al., 2024). در زمینه استفاده از کودهای زیستی بر روی گیاهان زراعی از قبیل گندم (*Triticum aestivum*)، جو (*Hordeum vulgare*)، سیب‌زمینی، چغندرقد (*Beta vulgaris*)، نیشکر (*Saccharum officinarum*)، ذرت (*Zea mays*) و کاهو (*Lactuca sativa*) تحقیقات متعددی انجام شده است (Zambrano, Sangoquiza-Caiza, Campana, Kafi, Cruz, & Yanez-Guzman, 2021). کافی و همکاران (Nabati, Oskoueian, Oskoueian, & Shabahang, 2019) بررسی تأثیر کود زیستی فسفات بر عملکرد و سایر خصوصیات زراعی سیب‌زمینی رقم آگريا دریافتند که به‌کارگیری باکتری‌های حل‌کننده فسفات برای بهبود جذب فسفر و کاهش مصرف کودهای فسفر یکی از راهکارهای اساسی برای جبران کمبود فسفر مورد نیاز گیاه است. از جمله ویژگی‌های کود زیستی فسفات بارور می‌توان سازگاری با اقلیم کشور ایران، کاهش مصرف کود شیمیایی فسفات، افزایش عملکرد، حمل‌ونقل آسان، توانایی حل‌کنندگی فسفات بالا و روش مصرف آسان را می‌توان نام برد (Ghobady, Jahanbin, Motalebifard, & Parvizi, 2011).

سیب‌زمینی دارای ارقام تجاری متعددی است، رقم سانه به دلیل مقاومت به بیماری‌های ویروسی و کیفیت غده، جایگاه ویژه‌ای در کشت تجاری سیب‌زمینی دارد. باین‌حال، پاسخ این رقم به اندازه ریزغده‌های بذری کوچک‌تر از ۳۰ میلی‌متر و تأثیر کودهای زیستی فسفات بر جبران محدودیت‌های تغذیه‌ای ناشی از کوچکی غده، هنوز به‌طور جامع بررسی نشده است. از سوی دیگر، با توجه به سیاست‌های کاهش مصرف کودهای شیمیایی، شناسایی ترکیب بهینه اندازه غده و دفعات مصرف کود زیستی فسفات می‌تواند راهکاری عملی برای دستیابی به عملکرد بالا در چارچوب کشاورزی پایدار ارائه دهد. بنابراین، این پژوهش با هدف پر کردن شکاف‌های دانشی و ارائه توصیه‌های کاربردی برای کشاورزان طراحی و انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت مزرعه‌ای با استفاده از رقم سیب‌زمینی سانه و طرح آزمایشی فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱ انجام شد. ریزغده‌ها در سال قبل از طریق کشت بافت تهیه و سپس با انتقال به گلدان در کشت گلخانه‌ای تولید شده بودند. مشخصه‌های کیفی مانند سلامت غده (ریزغده‌های کشت‌بافتی عاری از ویروس‌هایی مانند PVY و PLRV، باکتری‌هایی

جوانه‌ها و سبز کردن غده‌های بذری افزایش می‌یابد. با توجه به تأثیر اندازه غده‌های بذری بر روند رشد و عملکرد سیب‌زمینی، استفاده از اندازه‌های مطلوب غده بذری جهت حصول حداکثر عملکرد حائز اهمیت است.

علاوه بر عوامل مربوط به گیاه، استفاده از ترکیبات مغذی می‌تواند در بهبود رشد و عملکرد گیاه مؤثر باشد، مقدار مناسب و تأمین به‌موقع مواد مغذی مهم‌ترین عامل در دستیابی به بهره‌وری بالای کشت سیب‌زمینی است، زیرا سیب‌زمینی یک گیاه پرمصرف با عکس‌العمل زیاد به تأمین مواد مغذی است (Westermann, 2005; Pandit, Dwivedi, Coubey, Bhargaw, & Raj, 2018). تاکنون در اغلب موارد، کشت سیب‌زمینی با تأمین مواد مغذی از طریق کودهای شیمیایی انجام شده است (Pandit et al., 2018). یکی از این ترکیبات فسفر است. ماده مغذی فسفر نقش مهمی در متابولیسم‌های پایه کربوهیدرات و سیستم انتقال انرژی ایفا می‌کند. از آنجایی که فسفر بخشی از ساختمان DNA، RNA، ATP و فسفولیپیدهای غشایی را تشکیل می‌دهد، کمبود آن باعث کاهش قابل توجهی در فرآیندهای متابولیکی مرتبط با تقسیم سلولی، توسعه و گسترش سلول، تنفس و فتوسنتز می‌شود. در فرآیند غده‌زایی سیب‌زمینی، یکی از عوامل مهم فراهم بودن فسفر برای گیاه می‌باشد که وجود آن در مراحل اولیه رشد گیاه ضروری است (Rosen & Bierman, 2008). نتایج آراکیت و همکاران (Aarakit, Josephine, & Joyce, 2021) نیز تأیید می‌کند که میزان فسفر تأثیر معنی‌داری بر رشد و عملکرد گیاه سیب‌زمینی دارد. در پژوهش مذکور، اثر متقابل میزان فسفر و ارقام بر بقاء گیاه، ارتفاع بوته، زیست توده اندام هوایی، تعداد چشم و اندازه غده معنی‌دار بود.

باین‌حال، در چند دهه اخیر مصرف نهاده‌های شیمیایی در اراضی کشاورزی موجب معضلات زیست‌محیطی عدیده‌ای از جمله آلودگی منابع آب، افت کیفیت محصولات کشاورزی و کاهش میزان حاصلخیزی خاک‌ها گردیده است (Sharma, 2002). کشاورزی پایدار بر پایه مصرف کودهای زیستی با هدف حذف یا تقلیل مصرف نهاده‌های شیمیایی، یک راه‌حل مطلوب جهت غلبه برای آن مشکلات به شمار می‌آید. کودهای زیستی شامل مواد نگهدارنده با تراکم زیاد از یک یا چند نوع ریزجاندان مفید خاک‌زی و یا به‌صورت فرآورده متابولیت این موجودات می‌باشند که در ناحیه اطراف ریشه و یا بخش‌های داخلی گیاه تشکیل کلون داده و رشد گیاه میزبان را با روش‌های مختلف تحریک می‌کنند (Atieno et al., 2020). وظایف این ریزجاندانان، تثبیت و یا رهاسازی یون‌های نیتروژن، فسفات، پتاسیم و آهن از ترکیبات نامحلول می‌باشد (Iggehon, Babalola, & Hassen, 2024). این باکتری‌ها معمولاً در اطراف ریشه مستقر شده و گیاه را در جذب عناصر همیاری می‌کنند. یک نوع از این کودهای زیستی، کود زیستی فسفات بارور-۲ نام دارد. که دو سویه برتر از بین

آماده سازی زمین شامل شخم نیمه عمیق در بهار و دو مرحله دیسک عمود بود. کوددهی براساس آنالیز خاک مزرعه (جدول ۱) و توصیه کودی به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم قبل از کاشت و ۴۰۰ کیلوگرم کود اوره تعیین گردید. یک سوم کود اوره قبل از کاشت و بقیه به صورت کود سرک مصرف شد. بذور به صورت جوی و پشته ای با فواصل ردیف ۷۵ سانتی متر و فاصله بوته ۲۰ سانتی متر کشت شد. هر کرت شامل شش ردیف به طول پنج متر بود. آبیاری به طور منظم و با توجه به نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد انجام گرفت. مبارزه با علف های هرز به صورت دستی انجام شد. در طول دوره رشد، هر ۱۰ روز یک بار نمونه گیری از کرت های آزمایشی با برداشت پنج بوته به طور تصادفی از ردیف های اختصاص یافته صورت گرفت. سطح برگ با استفاده از دستگاه Leaf area meter مدل LI-3100 اندازه گیری و شاخص سطح برگ از تقسیم سطح برگ (m^2) بر سطح زمین اشغال شده (m^2) توسط بوته ها به دست آمد. در زمان برداشت، تعداد ساقه، تعداد غده، ماده خشک غده ها و عملکرد کل غده ها برای هر کرت اندازه گیری و شاخص برداشت غده محاسبه گردید. برای تجزیه و تحلیل داده ها از نرم افزار SAS ورژن ۹/۴ و برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

مانند *Ralstonia solanacearum* و قارچ هایی مانند *Rhizoctonia solani* بوده و پوست غده سالم و بدون زخم بود، تعداد جوانه ها (ریزغده های با ۳-۲ جوانه قوی)، اندازه و سن فیزیولوژیک (ریزغده های با سن فیزیولوژیک یکسان همه از یک نسل کشت بافتی) برای کاهش تنوع و افزایش دقت نتایج در نظر گرفته شده است. تیمارها شامل اندازه غده در سه سطح ۱۵ تا ۲۰، ۲۰ تا ۲۵ و ۲۵ تا ۳۰ میلی متر و مصرف کود زیستی فسفات بارور ۲ در سه سطح بدون مصرف کود زیستی فسفات (شاهد)، مصرف یک بار کود زیستی فسفات (در زمان کاشت با آغشته کردن غده ها با کود زیستی) و مصرف دو بار کود زیستی فسفات که در زمان کاشت و محلول پاشی در چهار تا شش برگ با غلظت توصیه شده ۳-۲ لیتر در هکتار و عصر انجام گرفت. کود زیستی فسفات بارور ۲ حاوی 10^7 تا 10^8 باکتری حل کننده فسفات (*Pantoea agglomerans*) سویه P5 و *Pseudomonas putida* سویه P13 در هر گرم از محصول است که با تولید اسیدهای ارگانیک و آنزیم های فسفاتاز در اطراف ریشه باعث آزاد شدن یون فسفات می شوند. این کود از شرکت زیست فناور سبز خریداری گردید. شرایط آبی و هوایی سال زراعی ۱۴۰۱ در منطقه همدان شامل میانگین دمای روزانه در فصل رشد ۱۵ تا ۳۲ درجه سانتی گراد، بارندگی کل فصل رشد (۱۵۰ میلی متر) با توزیع نامنظم در بهار و میانگین رطوبت نسبی هوا ۵۰-۴۰ درصد بود. عملیات

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش

Table 1- Physical soil properties in experimental site

عمق	بافت	واکنش	ازت	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب
Depth	Texture	pH	N (%)	Absorbable P (ppm)	Absorbable K (ppm)
0-20	رسی لومی Clay loam	7.4	0.06	10.5	113
20-40	رسی لومی Clay loam	7.3	0.05	8.7	110

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ (LAI)

به حداکثر مقدار خود رسید. پس از آن، شاخص سطح برگ به دلیل پیری و ریزش برگ ها روند نزولی داشت. کاربرد کود زیستی فسفره باعث افزایش شاخص سطح برگ در تمام تیمارها شد. همان طور که در شکل ۱ ملاحظه می شود، در اندازه غده ۲۰-۱۵ میلی متر در حدود ۸۵ روز پس از سبز شدن (حداکثر شاخص سطح برگ)، مصرف دو بار کود زیستی فسفات نسبت به مصرف یک بار کود زیستی فسفات و عدم مصرف کود زیستی فسفات به ترتیب باعث افزایش ۱۴/۴۳ و ۲۷/۵۸ درصدی شاخص سطح برگ سیب زمینی شد. در ریزغده های ۲۵-۲۰ میلی متری (شکل ۲) حداکثر شاخص سطح برگ از حدود ۸۵ تا ۹۰ روز پس از سبز شدن در تیمار مصرف دو بار کود زیستی فسفات مشاهده شد که نسبت به یک بار کود زیستی فسفات و عدم مصرف کود زیستی فسفات به ترتیب ۱۴/۵۱ و ۱۵/۵۲ درصد بود. از نظر

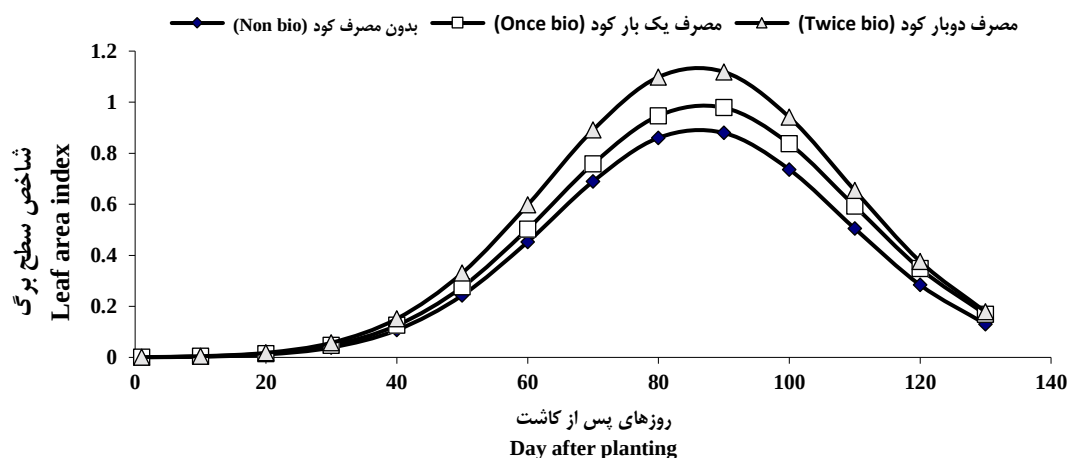
نتایج حاصل از تجزیه واریانس حاکی از اثر معنی دار برهم کنش اندازه های مختلف ریزغده و مصرف کود زیستی بر شاخص سطح برگ است (جدول ۲). بررسی روند شاخص سطح برگ در گیاهان کشت شده با اندازه های مختلف ریزغده و مصرف کود زیستی فسفره (شکل ۱، ۲ و ۳) نشان داد که بعد از سبز شدن بوته ها، در ابتدای دوره رشد، شاخص سطح برگ به کندی افزایش یافت، ولی با گذشت زمان و در ادامه با دفع علف های هرز و استفاده مناسب گیاه از کودهای مصرفی، افزایش شاخص سطح برگ روند خطی پیدا کرد و در حدود ۸۰ تا ۹۰ روز پس از سبز شدن بسته به اندازه ریزغده ها و کود مصرفی

Dehghanshear, 2007) کاربرد فسفر در گیاه غده‌ای چغندر قند باعث افزایش قابل توجه شاخص سطح برگ شد و مصرف این عنصر موجب تسریع در حصول حداکثر شاخص سطح برگ گردید. به‌طور خلاصه، برهم‌کنش اندازه غده بذری سیب‌زمینی و کود زیستی فسفات شامل تعامل پیچیده‌ای از سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی است و به نظر می‌رسد که غده‌های بزرگ‌تر انرژی اولیه را تأمین می‌کنند، درحالی‌که کودهای زیستی فسفات جذب مواد مغذی را بهبود می‌بخشند. این همکاری منجر به توسعه سریع‌تر سطح برگ می‌شود (Ebrahim et al., 2018). همچنین ترکیب سیتوکینین تولیدشده در غده‌های بزرگ و فسفر جذب‌شده توسط کودهای زیستی، می‌تواند تقسیم سلولی در برگ‌ها را بهینه کند (Aksenova, Konstantinova, Golyanovskaya, Sergeeva, & Romanov, 2012).

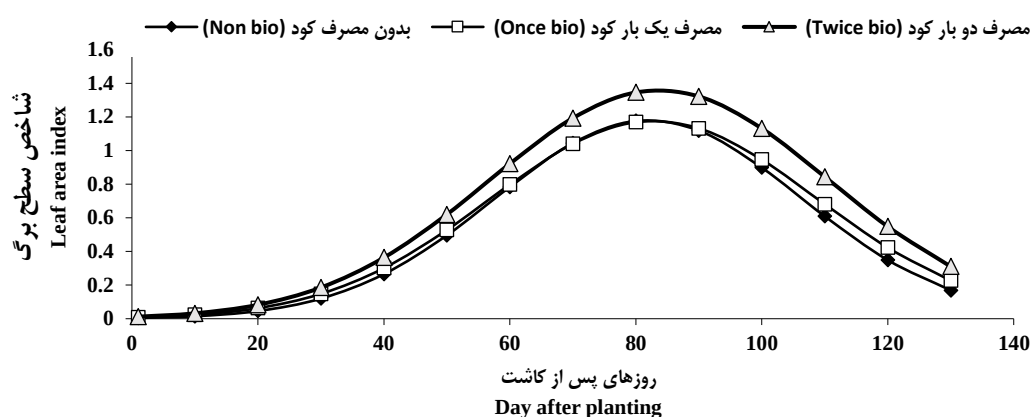
تعداد ساقه در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اندازه ریزغده‌های سیب‌زمینی و مقادیر مختلف کود زیستی فسفات بر تعداد ساقه در بوته اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشتند (جدول ۲)، به‌طوری‌که ریزغده‌های ۲۵-۳۰ میلی‌متری با میانگین ۳/۱۵ ساقه در بوته بیشترین و ریزغده‌های ۱۵-۲۰ میلی‌متری با میانگین ۱/۶ کمترین تعداد ساقه در بوته را دارا بودند. تعداد ساقه در بوته با افزایش اندازه ریزغده به ۲۵-۳۰ میلی‌متر به‌ترتیب ۴۱/۲۵ و ۹۶/۸۷ درصد نسبت به اندازه ریزغده‌های ۲۰-۲۵ و ۱۵-۲۰ میلی‌متری افزایش داشت. همچنین ریزغده‌های ۲۵-۲۰ و ۲۰-۱۵ میلی‌متری نسبت به ریزغده‌های ۲۰-۱۵ میلی‌متری ۴۰/۶۲ درصد افزایش را در تعداد ساقه نشان داد (جدول ۳).

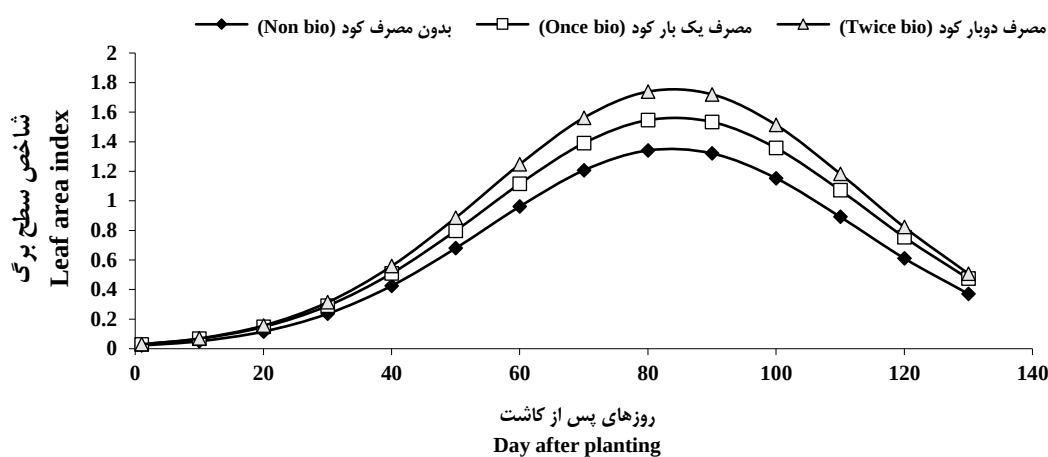
شاخص سطح برگ، تیمار مصرف یک بار کود و بدون مصرف کود تفاوت قابل ملاحظه‌ای تا حدود ۹۵ روز پس از سبز شدن دیده نمی‌شود. اما از این مرحله به بعد، روند کاهش سطح برگ در تیمار بدون کود زیستی فسفات سریع‌تر از یک بار کود زیستی فسفات بود که دلیل این امر را می‌توان به تأمین فسفر مورد نیاز گیاه و جلوگیری از زردی و پیری برگ‌ها نسبت داد. در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود که شاخص سطح برگ در ریزغده‌های ۲۵-۳۰ میلی‌متری با گذشت ۹۰ تا ۹۵ روز پس از کاشت، در سطح دو بار مصرف کود زیستی فسفات نسبت به یک بار مصرف کود زیستی فسفات و عدم مصرف کود زیستی فسفات به‌ترتیب معادل ۱۲/۳۳ و ۲۹/۱۱ درصد افزایش نشان داد. بنابراین بالاترین شاخص سطح برگ در اندازه غده ۲۵-۳۰ میلی‌متری و با مصرف دو بار کود زیستی فسفات حاصل شد. اندازه ریزغده‌های سیب‌زمینی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر شاخص سطح برگ (Leaf Area Index) داشته باشد. به نظر می‌رسد که ریزغده‌های بزرگ‌تر به دلیل ذخیره بیشتر مواد مغذی، انرژی بیشتری دارند و می‌توانند سریع‌تر جوانه بزنند و گیاهچه‌های قوی‌تری تولید کنند که این امر منجر به تشکیل سریع‌تر برگ‌ها و افزایش شاخص سطح برگ در مراحل اولیه رشد می‌شود. همچنین ریزغده‌های بزرگ‌تر تعداد و اندازه برگ‌های بیشتری تولید می‌کنند، که در کل باعث افزایش شاخص سطح برگ می‌شود (Ebrahim et al., 2018). علاوه‌بر اندازه ریزغده، مصرف کودهای زیستی فسفات نیز در افزایش سطح برگ افزایش محسوسی را نشان می‌دهد. مارتینز و همکاران (Martins, Soratto, Fernandes, & Dias, 2018) در بررسی‌های خود بر روی سیب زمینی به این نتیجه دست یافتند که کود زیستی فسفات با افزایش دسترسی گیاه به فسفر، بهبود جذب مواد مغذی و تحریک رشد ریشه موجب افزایش شاخص سطح برگ می‌شود. طبق نتایج حمایتی و همکاران (Hemayati, Taleghani, Saednia, & ...)



شکل ۱- روند تغییرات شاخص سطح برگ در ریزغده‌های ۱۵-۲۰ میلی‌متری و مصرف کود زیستی فسفات
Figure 1- Trend of changes in leaf area index (LAI) on mini tubers 15-20 mm and phosphorus biofertilizer



شکل ۲- روند تغییرات شاخص سطح برگ در ریزغده‌های ۲۰-۲۵ میلی‌متری و مصرف کود زیستی فسفات
Figure 2- Trend of changes in leaf area index (LAI) on mini tubers 20-25 mm and phosphorus biofertilizer



شکل ۳- روند تغییرات شاخص سطح برگ در ریزغده‌های ۲۵-۳۰ میلی‌متری و مصرف کود زیستی فسفات
Figure 3- Trend of changes in leaf area index (LAI) on mini tubers 25-30 mm and phosphorus biofertilizer

اندازه ریزغده‌های ۱۵-۲۰ میلی‌متری و عدم مصرف کود زیستی فسفات با میانگین ۱/۳۰ ساقه در بوته، کمترین تعداد ساقه در بوته را داشت (جدول ۴). در تحقیقی که توسط ساندران و همکاران (Sundara, Natarajan, & Hari, 2002) انجام شد، کاربرد یک گونه باکتری حل‌کننده فسفات، تعداد ساقه را در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داد.

تعداد غده در بوته

تعداد غده‌های تولیدی در بوته برای اندازه‌های مختلف ریزغده کشت‌شده، اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد را نشان داد (جدول ۲). غده‌های ۲۵-۳۰ میلی‌متری با میانگین ۴/۸ غده در بوته بیشترین و غده‌های ۲۰-۲۵ و ۱۵-۲۰ میلی‌متری کمترین تعداد غده در بوته را دارا بودند. ریزغده‌های ۲۵-۳۰ میلی‌متر به‌ترتیب ۱۹/۴۰ و ۲۳/۷۱ درصد، تعداد غده در بوته بیشتری نسبت به ریزغده‌های ۲۰-۲۵ و

به اظهار ابراهیم و همکاران (Ebrahim et al., 2018)، یکی از عوامل مؤثر در تعداد ساقه تولیدشده اندازه ریزغده است، ریزغده‌های بزرگ‌تر تعداد ساقه بیشتری در مقایسه با ریزغده‌های کوچک‌تر تولید می‌کنند، آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش اندازه غده به ۵۵-۴۵ میلی‌متر، تعداد ساقه اصلی در بوته افزایش می‌یابد. در این آزمایش، علاوه بر اندازه ریزغده، مصرف دو بار کود زیستی فسفات در طی رشد گیاه با میانگین ۲/۷۵ بیشترین تعداد ساقه و بدون مصرف کود (شاهد) با میانگین ۱/۹۸ کمترین تعداد ساقه در بوته را نشان داد. این تحقیق با گزارش حمایتی و همکاران (Hemayati et al., 2007) مبنی بر افزایش تعداد ساقه با مصرف کود زیستی فسفات تطابق دارد. برهم‌کنش اندازه غده و سطوح مختلف کود زیستی فسفات تأثیر معنی‌داری بر تعداد ساقه در بوته داشت (جدول ۲). بدین ترتیب که غده‌های ۲۵-۳۰ میلی‌متری و مصرف دو بار کود زیستی فسفات، بیشترین تعداد ساقه در بوته با میانگین ۳/۶۰ ساقه در بوته و

۲۰-۱۵ میلی‌متری تولید کرد (جدول ۳). مطالعات کاجیو و همکاران نشان داد که ریزغده‌های ۲۰-۱۵ گرمی نسبت به ریزغده‌های ۱۵-۱۰ گرمی ۲۰-۳۰ درصد، غده‌های بیشتری در هر بوته تولید می‌کنند. آن‌ها بیان داشتند که احتمالاً ذخیره کربوهیدرات و جوانه‌زنی قوی‌تر سبب افزایش معنی‌دار تعداد غده‌های تولیدی شده است (Kacheyo, Van Dijk, Vries, & Struik, 2021). قابل ذکر است که گنهان و همکاران (Getahun et al., 2022) نشان دادند که ریزغده‌های ۲۰-۱۵ گرم تعادل بهتری بین تعداد غده و یکنواختی اندازه غده‌های تولیدی ایجاد می‌کنند و اگرچه ریزغده‌های بزرگ‌تر از ۳۰ گرم تعداد غده را افزایش می‌دهند، ولی ممکن است باعث تولید غده‌های ریز و درشت نامتوازن شوند. سوناوان و دابل (Sonawane & Dhoble, 2004) در آزمایش خود نشان دادند که از ریزغده‌های ۱۵ گرمی، بیشترین تعداد غده در بوته حاصل می‌شود. موتانی و همکاران (Muthoni & Shimelis, 2020) نیز اثر اندازه غده بر تعداد غده‌ها را به شرایط آب‌وهوایی وابسته دانستند و بیان داشتند که در مناطق گرم و خشک، غده‌های ۲۵-۴۰ گرمی عملکرد بهتری دارند، زیرا رطوبت را سریع‌تر جذب می‌کنند.

تأثیر کود زیستی فسفات مصرفی بر تعداد غده تولیدشده در سطح

احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مصرف دو بار کود زیستی فسفات با میانگین ۴/۶۸ بیشترین تعداد غده و عدم مصرف کود (شاهد) با میانگین ۳/۹۶ کمترین تعداد غده در بوته را نشان می‌دهد (جدول ۳). همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، مصرف دو بار کود زیستی فسفات در طول رشد گیاه به‌ترتیب ۱۵/۵۵ و ۱۸/۱۸ درصد تعداد غده تولیدی را نسبت به مصرف یک بار کود زیستی فسفات و شاهد افزایش داد. از آنجاکه فسفر در نمو اولیه گیاه و غده‌بندی زودهنگام نقش دارد، می‌تواند تعداد غده‌های تولیدشده به‌ازای هر بوته را افزایش دهد (Jenkins & Ali, 2005). برهم‌کنش اندازه غده و سطوح مختلف کود زیستی فسفات اثر معنی‌داری در سطح پنج درصد بر تعداد غده در بوته داشت (جدول ۲). بدین ترتیب که غده‌های ۳۰-۲۵ میلی‌متری و مصرف دو بار کود زیستی فسفات بیشترین تعداد غده در بوته را با میانگین ۵/۷ غده در بوته و اندازه ریزغده‌های ۲۰-۱۵ میلی‌متری و مصرف یک بار کود زیستی فسفات و اندازه ریزغده‌های ۲۰-۲۵ میلی‌متری و عدم مصرف کود زیستی فسفات با میانگین ۳/۷۶ غده در بوته، کمترین تعداد غده در بوته را داشته است (جدول ۴).

جدول ۲- تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد سیب زمینی رقم سانت در تیمارهای مورد بررسی

Table 2- Analysis of variance (mean of squares) of yield and yield components of potato var. Sante in studied treatments

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares						شاخص برداشت Harvest index
		حداکثر شاخص سطح برگ LAImax	تعداد ساقه در بوته Number of stem per plant	تعداد غده در بوته Number of tuber per plant	ماده خشک غده Tuber dry matter	عملکرد غده Tuber yield	زیست‌توده کل Total biomass	
تکرار Replication (R)	2	0.1494**	0.20*	0.97*	10230.88*	767286.3*	859223.4*	5.25*
اندازه غده Tuber size (S)	2	0.5500**	5.50**	2.17**	8194583.49**	297529761.0**	76466610.3**	106.02**
کود زیستی Biofertilizer (F)	2	0.2285**	1.37**	1.39**	3609634.12**	40614792.4**	34279691.4**	50.97**
اندازه غده × کود S×F	4	0.0785*	0.01**	0.41*	269699.23*	1678890.0**	2755753.2*	7.02**
خطا Error	16	0.0157	0.03	0.12	47833.22	342631.6	609671.6	0.90
ضریب تغییرات CV (%)	-	10.0	7.2	9.5	12.1	13.8	13.5	12.5

ns, **, *: به‌ترتیب به‌معنی غیرمعنی‌دار، سطح احتمال یک و پنج درصد

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

ماده خشک غده

غده و مصرف کود زیستی فسفات اثر معنی‌داری را در سطح پنج درصد بر عملکرد ماده خشک غده نشان داد (جدول ۲). بیشترین

همان‌طور که در جدول تجزیه واریانس مشخص شده است، اندازه

اندازه‌های غده کوچک‌تر داشت. بنابراین بهینه‌سازی اندازه غده بذری برای افزایش بهره‌وری و سودآوری تولید سیبزمینی ضروری است. در این راستا، غده بذری رقم Gudanie با اندازه متوسط، سود خالص نسبتاً بالاتری با نرخ بازده حاشیه‌ای قابل قبول (۱۰۰/۹ درصد) ثبت کرد (Asnake, Alemayehu, & Asredie, 2023). مصرف دو بار کود زیستی فسفات در طی رشد گیاه با میانگین ۲۴۱۰۲/۵ کیلوگرم در هکتار بیشترین و عدم مصرف آن (شاهد) با میانگین ۱۹۸۶۸/۳ کیلوگرم در هکتار کمترین عملکرد غده را دارا بودند. مصرف دو بار کود زیستی فسفات، عملکرد غده را به ترتیب ۱۱/۱۶ و ۲۱/۳۱ درصد نسبت به مصرف یک بار کود زیستی فسفات و شاهد افزایش داد (جدول ۳). کافی و همکاران (Kafi et al., 2019) بیان کردند که دسترسی فسفر مورد نیاز برای گیاه باعث افزایش سطح برگ و دوام سطح برگ شده و تداوم عمل فتوسنتز باعث افزایش طول دوره حجیم شدن غده‌ها و افزایش عملکرد می‌شود. برهم‌کنش اندازه غده و سطوح مختلف کود زیستی فسفات اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر عملکرد غده داشته است (جدول ۲)، به‌طوری‌که ریزغده‌های ۳۰-۲۵ میلی‌متری و مصرف دو بار کود با میانگین ۳۱۵۲۴/۴ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد غده و ریزغده‌های ۱۵-۲۰ میلی‌متری و عدم مصرف کود با میانگین ۱۵۶۷۳ کیلوگرم در هکتار کمترین عملکرد غده را دارا بوده است (جدول ۴). احتمالاً برهم‌کنش غده‌های بذری بزرگ‌تر با کودهای زیستی فسفات از طریق تأمین بهتر انرژی اولیه (Bist, Sharma, & Thakurathi, 2023)، بهبود جذب و استفاده از فسفر، تنظیم بهینه هورمون‌های رشد (Iftikhar et al., 2023)، افزایش کارایی فتوسنتز و بهبود توزیع مواد فتوسنتزی سبب بهبود عملکرد غده سیبزمینی شده است.

زیست‌توده کل

اثر اندازه‌های مختلف غده اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر روی زیست‌توده کل نشان داد (جدول ۲)، به‌طوری‌که اندازه غده ۳۰-۲۵ میلی‌متری با میانگین ۳۲۰۷۷/۵ بیشترین و اندازه غده ۱۵-۲۰ میلی‌متری با میانگین ۲۱۲۳۴/۱ کمترین زیست‌توده را دارا بود (جدول ۳). افزایش اندازه ریزغده به ۳۰-۲۵ میلی‌متر، زیست‌توده کل را به ترتیب ۳۶/۹۵ و ۵۱/۰۶ درصد نسبت به ریزغده‌هایی با اندازه ۲۵-۲۰ و ۱۵-۲۰ میلی‌متری افزایش داد. نتایج مطالعات اتازو (Otazu & Borus, 2023) حاکی از افزایش زیست‌توده کل به میزان ۶۰-۷۰ درصد در ریزغده‌های ۳۰ گرمی نسبت به ۲۰-۱۰ گرمی بود. در تأیید این نتایج، گنهان (Getahun et al., 2022) گزارش داد که غده‌های ۳۰-۵۰ گرمی، بیشترین زیست‌توده کل را نسبت به دیگر اندازه‌های غده تولید کردند. همچنین اثر کود زیستی فسفات بر زیست‌توده کل اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد نشان می‌دهد (جدول ۲).

عملکرد ماده خشک غده در اندازه غده ۳۰-۲۵ میلی‌متری با میانگین ۵۴۷۹/۹ کیلوگرم در هکتار و کمترین آن در اندازه غده ۱۵-۲۰ میلی‌متری با میانگین ۳۵۹۸/۵ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. ریزغده‌های ۳۰-۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۲۸/۵۷ و ۵۲/۲۸ درصد ماده خشک غده را نسبت به ریزغده‌های ۲۵-۲۰ و ۱۵-۲۰ میلی‌متری افزایش دادند. اندازه ریزغده‌های سیبزمینی با میزان استحکام غده‌ها و تولید ماده خشک مرتبط می‌باشد و به‌طور مشخص نتایج ابراهیم و همکاران (Ebrahim et al., 2018) نشان دادند که غده‌های با قطر ۴۰-۶۰ میلی‌متر، ۲۰-۳۰ درصد ماده خشک بیشتری نسبت به ریزغده‌های ۲۰-۳۰ میلی‌متر تولید می‌کنند. مصرف دو بار کود زیستی فسفات با میانگین ۵۰۰۹ کیلوگرم در هکتار بیشترین و شاهد (بدون مصرف کود) کمترین عملکرد ماده خشک غده را دارا بود. مصرف دو بار کود زیستی فسفات به ترتیب ۹/۵۹ و ۳۳/۱۹ درصد ماده خشک غده را نسبت به مصرف یک بار کود زیستی فسفات و شاهد افزایش داد. (جدول ۳). نتایج مطالعات حاکی از اثر کودهای زیستی فسفر بر افزایش ۲۲-۲۸ درصدی ماده خشک غده به سبب بهبود فعالیت آنزیم فسفاتاز (Pantigoso, He, Manter, Fonte, & Vivanco, 2022) و افزایش ۳۵ درصد از طریق تحریک تولید اکسین و توزیع کربوهیدرات به غده‌ها (Araújo et al., 2020) می‌شوند. برهم‌کنش اندازه غده و کود زیستی فسفات بر ماده خشک غده در سطح یک درصد معنی‌دار بود، به‌طوری‌که ریزغده‌های ۳۰-۲۵ میلی‌متری و مصرف دو بار کود زیستی فسفات با میانگین ۵۰۰۹ کیلوگرم در هکتار، بیشترین ماده خشک غده و ریزغده‌های ۱۵-۲۰ میلی‌متری و عدم مصرف کود با میانگین ۳۷۶۰/۸ کیلوگرم در هکتار، کمترین ماده خشک غده را دارا بوده است (جدول ۴). به نظر می‌رسد که برهم‌کنش اندازه ریزغده و مصرف کود زیستی فسفر از طریق سازوکارهایی اثر افزایشی داشته و توانسته ماده خشک غده سیب زمینی را افزایش دهند.

عملکرد غده

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اندازه غده و مصرف کود زیستی فسفات اثر معنی‌داری بر عملکرد غده در سطح یک درصد ایجاد کرد (جدول ۲)، به‌طوری‌که ریزغده‌های ۳۰-۲۵ میلی‌متری با میانگین ۲۸۳۳۷/۳ کیلوگرم در هکتار بیشترین و ریزغده‌های ۱۵-۲۰ میلی‌متری با میانگین ۱۷۳۰۵/۸ کیلوگرم در هکتار کمترین عملکرد را داشتند و با افزایش اندازه ریزغده از ۲۵-۳۰ میلی‌متر به ترتیب ۴۱/۶۱ و ۶۳/۷۴ درصد عملکرد غده نسبت به اندازه ریزغده‌های ۲۵-۲۰ و ۱۵-۲۰ میلی‌متری افزایش داشت (جدول ۳). جم و همکاران (Jam, Ebadi, Amini, & Dehdar, 2009) در بررسی تأثیر اندازه غده بذری سالم روی عملکرد نتیجه گرفتند که اندازه‌های ۲۸ و ۴۲ گرمی غده بذری به‌طور معنی‌داری عملکرد بیشتری نسبت به

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر اندازه غده و کود زیستی، بر عملکرد و اجزای عملکرد سیبزمینی

Table 3- Comparison of the average effect of tuber size and biofertilizer on yield and yield components of potato

شاخص برداشت غده	زیست توده کل	عملکرد غده Tuber yield (kg ha ⁻¹)	ماده خشک غده Tuber dry matter (kg ha ⁻¹)	تعداد غده در بوته	تعداد ساقه در بوته	حداکثر شاخص سطح برگ LAI _{max}	عوامل آزمایشی Treatment
Harvest index tuber	Total biomass (kg ha ⁻¹)			Number of tuber per plant	Number of stem per plant		
81.50 ^c	21234.1 ^c	17305.8 ^c	3598.5 ^c	4.02 ^b	1.6 ^c	1.06 ^{b*}	اندازه غده 15-20 mm
85.43 ^b	23422.6 ^b	20010.0 ^b	4262.0 ^b	3.88 ^b	2.25 ^b	1.17 ^b	Tuber 20-25 mm
88.34 ^a	32077.5 ^a	28337.3 ^a	5479.9 ^a	4.80 ^a	3.15 ^a	1.53 ^a	size (S) 25-30 mm
82.52 ^c	24076.9 ^c	19868.3 ^c	3760.8 ^c	3.96 ^b	1.98 ^c	1.10 ^c	کود زیستی Non bio
85.52 ^b	25353.3 ^b	21682.2 ^b	4570.7 ^b	4.05 ^b	2.24 ^b	1.23 ^b	Biofertiliz Once bio
87.22 ^a	27634.14 ^a	24102.5 ^a	5009.1 ^a	4.68 ^a	2.75 ^a	1.43 ^a	er (F) Twice bio

* برای هر عامل آزمایشی، در هر ستون تفاوت بین حروف نشان دهنده اختلاف معنی دار براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد است.

* For each experimental factor, different letters within the same columns indicate significant differences between treatments at $p \leq 0.05$, according to the Duncan test.

برداشت غده در اندازه غده ۳۰-۲۵ میلی‌متری با میانگین ۸۸/۳۴ و کمترین آن در اندازه غده ۲۰-۱۵ میلی‌متری با میانگین ۸۱/۵۰ مشاهده شد (جدول ۳). با افزایش اندازه ریزغده به ۳۰-۲۵ میلی‌متر درصد، شاخص برداشت غده نسبت به اندازه ریزغده‌های ۲۵-۲۰ و ۱۵-۲۰ میلی‌متری به ترتیب ۳/۴۰ و ۸/۳۹ افزایش یافت (جدول ۳). تحقیقات گتهان و همکاران (Getahun et al., 2022) نشان داد که غده‌های کوچک‌تر به دلیل کندی سرعت ایجاد پوشش گیاهی، شاخص برداشت کمتری دارند. همچنین مصرف دو بار کود زیستی فسفات با میانگین ۸۷/۲۲ بیشترین و تیمار بدون مصرف کود زیستی فسفات کمترین شاخص برداشت غده را نشان داد (جدول ۳). مصرف دو بار کود زیستی فسفات، شاخص برداشت غده را به ترتیب ۱/۹۸ و ۵/۶۹ درصد نسبت به مصرف یک بار کود فسفات و شاهد افزایش داد. (جدول ۳). برهم کنش اندازه غده و سطوح مختلف کود تأثیر معنی داری در سطح یک درصد بر شاخص برداشت غده داشت (جدول ۲)، به طوری که ریزغده‌های ۳۰-۲۵ میلی‌متری و مصرف دو بار کود زیستی فسفات با میانگین ۸۹/۰۳ درصد بیشترین شاخص برداشت و ریزغده‌های ۲۰-۱۵ میلی‌متری و عدم مصرف کود زیستی فسفات با میانگین ۷۷/۹۵ درصد کمترین شاخص برداشت غده را داشت (جدول ۴). توسعه اولیه برگ در غده‌های بزرگ‌تر نسبت به غده‌های کوچک‌تر، سریع‌تر بوده و گیاهان رشد کرده از غده‌های بزرگ، ساقه‌های جانبی بیشتر و بزرگ‌تری نیز تولید می‌کنند (Kacheyo et al., 2021). بدیهی است گیاهان با ساقه‌های جانبی بیشتر و در معرض کود فسفر مناسب، توسعه تاج پوشش بیشتری داشته و این موضوع می‌تواند سبب افزایش شاخص برداشت شود.

همان‌طوری که در جدول ۳ دیده می‌شود، مصرف دو بار کود زیستی در طی رشد گیاه با میانگین ۲۷۶۳۴/۱۴ بیشترین زیست‌توده کل را نسبت به شاهد و مصرف یک بار کود نشان داد. مصرف دو بار کود زیستی فسفات، زیست‌توده کل را به ترتیب ۸/۹ و ۱۴/۷۷ درصد نسبت به مصرف یک بار کود زیستی فسفات و شاهد افزایش داد (جدول ۳). برهم کنش اندازه غده و سطوح مختلف کود زیستی فسفات تأثیر معنی داری در سطح پنج درصد بر زیست‌توده کل داشت (جدول ۲)، به طوری که ریزغده‌های ۳۰-۲۵ میلی‌متری با مصرف دو بار کود زیستی فسفات با میانگین ۳۲۰۷۷/۵ بیشترین زیست‌توده کل و ریزغده‌های ۲۰-۱۵ میلی‌متری و مصرف یک بار کود زیستی فسفات با میانگین ۲۱۲۳۴/۱ کمترین زیست‌توده کل را دارا بودند (جدول ۴). در بررسی ریزجانداران حل‌کننده فسفات نشان داده شده است که این ریزجانداران می‌توانند باعث افزایش مصرف عناصر غذایی توسط گیاه و در نتیجه افزایش رشد و زیست‌توده گیاه شوند (Valadabadi, Lebaschi, & Aliabadi Farahani, 2010). مطالعات دیگر نیز تأکید کرده‌اند که علاوه بر اندازه غده‌ها، زیست‌توده کل در سیب‌زمینی تحت تأثیر شرایط محیطی (Muthoni & Shimelis, 2020)، مدیریت تغذیه (Atieno et al., 2020; Martins et al., 2018) و رقم (Ahmed et al., 2024) قرار می‌گیرد.

شاخص برداشت غده

همان‌طور که در جدول تجزیه واریانس مشخص شده است، اندازه غده و مصرف کود زیستی اثر معنی داری را در سطح یک درصد بر روی شاخص برداشت غده داشت (جدول ۲). بیشترین شاخص

جدول ۴- مقایسه میانگین برهم کنش اندازه ریزغده و کود زیستی فسفاته بر عملکرد و اجزای عملکرد سیبزمینی

Table 4- Mean comparison of the interaction of minituber size and phosphorus biofertilizer on yield and yield components of potato

اندازه غده Tuber size (mm)	کود زیستی Biological fertilizer	حداکثر شاخص سطح برگ LAI max	تعداد ساقه در بوته Number of stems per plant	تعداد غده در بوته Number of tubers per plant	ماده خشک غده (kg ha ⁻¹) Tuber dry matter	عملکرد غده (kg ha ⁻¹) Tuber yield	زیست توده کل (kg ha ⁻¹) Total biomass	شاخص برداشت غده Harvest index tuber
15-20	Non bio	0.86 ^{e*}	1.30 ^f	3.96 ^{bc}	2976.8 ^f	15673.0 ^h	20106.4 ^f	77.95 ^e
	Once bio	0.99 ^d	1.46 ^f	3.76 ^c	3543.3 ^e	17120.0 ^g	20947.0 ^e	81.73 ^d
	Twice bio	1.21 ^{cd}	2.03 ^{de}	4.33 ^{bc}	4275.5 ^d	19124.4 ^f	22547.0 ^{de}	84.82 ^c
20-25	Non bio	1.02 ^d	1.83 ^e	3.76 ^c	3241.2 ^{ef}	18157.2 ^f	22148.3 ^{de}	81.98 ^d
	Once bio	1.17 ^{cd}	2.23 ^d	3.86 ^{bc}	4678.9 ^c	20214.0 ^e	23371.4 ^{cd}	86.49 ^b
	Twice bio	1.34 ^{bc}	2.63 ^c	4.03 ^{bc}	4866.0 ^c	21658.0 ^d	24661.8 ^c	87.82 ^{ab}
25-30	Non bio	1.35 ^{bc}	2.83 ^{bc}	4.16 ^{bc}	5064.3 ^c	25774.9 ^c	29413.3 ^b	87.63 ^{ab}
	Once bio	1.54 ^b	3.03 ^b	4.53 ^b	5489.8 ^b	27712.7 ^b	31366.9 ^b	88.35 ^a
	Twice bio	1.73 ^a	3.60 ^a	5.70 ^a	5885.7 ^a	31524.0 ^a	35408.2 ^a	89.03 ^a

* در هر ستون، تفاوت بین حروف نشان دهنده اختلاف معنی دار براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد است.

* Different letters within the same columns indicate significant differences between treatments at $p \leq 0.05$, according to the Duncan test.

نتیجه گیری

همراه با مصرف بهینه کود زیستی فسفات می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود رشد و عملکرد غده سیبزمینی در شرایط مزرعه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. تعامل بین غده‌های بذری بزرگ‌تر و کودهای زیستی فسفات می‌تواند سبب هم‌افزایی گردد و منجر به پاسخ عملکرد کلی بیشتر نسبت به هر یک از عوامل به تنهایی شود. در نهایت، این تحقیق تأکید می‌کند که انتخاب اندازه مناسب ریزغده‌ها و مدیریت صحیح مصرف کود زیستی فسفات می‌تواند به افزایش بهره‌وری و پایداری در تولید سیبزمینی کمک کند. این یافته‌ها می‌تواند به عنوان راهنمایی برای کشاورزان و محققان در جهت بهینه‌سازی شرایط کشت و افزایش عملکرد ارقام سیبزمینی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که بررسی اقتصادی این روش (هزینه-فایده) برای مقیاس‌های بزرگ کشت، مطالعه تأثیر این راهکار بر ارقام دیگر سیبزمینی و در شرایط آب‌وهوایی متفاوت، و آزمایش ترکیب کود زیستی فسفات با سایر کودهای آلی یا شیمیایی برای کاهش مصرف نهاده‌های خارجی مورد پژوهش قرار گیرد.

این مطالعه به بررسی اثر اندازه ریزغده‌های سیبزمینی و مصرف کود زیستی فسفات بر رشد و عملکرد رقم جدید سیبزمینی ساتنه پرداخته است. نتایج نشان داد که اندازه ریزغده‌ها و مصرف کود زیستی فسفات تأثیر معنی‌داری بر شاخص سطح برگ و عملکرد این رقم سیبزمینی داشتند. ریزغده‌های بزرگ‌تر (۲۵ تا ۳۰ میلی‌متر) به دلیل ذخیره بیشتر مواد مغذی، انرژی بیشتری برای جوانه‌زنی و رشد اولیه فراهم کردند که منجر به تشکیل سریع‌تر برگ‌ها و افزایش شاخص سطح برگ شد. همچنین مصرف دو بار کود زیستی فسفات در مقایسه با مصرف یک بار و عدم مصرف کود، تأثیر بیشتری بر افزایش سطح برگ، تعداد ساقه، تعداد غده، عملکرد غده، ماده خشک غده و زیست توده کل داشت. اگرچه در اندازه‌های مختلف ریزغده، مصرف کود زیستی فسفات بر صفات مورد اندازه‌گیری مؤثر بود، ولی بیشترین عملکرد و رشد گیاه در تیمار ترکیبی ریزغده‌های ۲۵ تا ۳۰ میلی‌متر با دو بار مصرف کود زیستی فسفات حاصل شد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ریزغده‌های با اندازه ۲۵ تا ۳۰ میلی‌متر

References

1. Aarakit P., Josephine, P. O., & Joyce, J. L. (2021). Growth, yield and phosphorus use efficiency of potato varieties propagated from apical rooted cuttings under variable phosphorus rates. *African Journal of Plant Science*, 15(7), 173-184.
2. Ahmed, I., Biswas, J. C., Jahan, M. A. H. S., Ishtiaque, S., Zahan, T., Islam, M. A., Al-Shuraym, L. A., Sayed, S., Gaber, A., & Hossain, A. (2024). Yield stability among potato varieties suitable for different agroecological regions of Bangladesh. *Heliyon*, 10(11), e31633. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31633>
3. Aksenova, N., Konstantinova, T., Golyanovskaya, S., Sergeeva, L., & Romanov, G. (2012). Hormonal regulation of tuber formation in potato plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 59, 451-466.

4. Araújo, F., Santos, M., Oliveira de Araújo, N., Silva, T., Cavalcante, L. & Finger, F. (2020). Growth and dry matter partitioning of potato influenced by paclobutrazol applied to seed tuber. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14. <https://doi.org/10.1134/S1021443712040024>
5. Asnake, D., Alemayehu, M., & Asredie, S. (2023). Growth and tuber yield responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties to seed tuber size in northwest highlands of Ethiopia, *Heliyon*, 9(3), e14586. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14586>
6. Atieno, M., Herrmann, L., Nguyen, H. T., Phan, H. T., Nguyen, N. K., Srean, P., Than, M. M., Zhiyong, R., Tittabutr, P., Shutsrirung, A., Bräu, L., & Lesueur, D. (2020). Assessment of biofertilizer use for sustainable agriculture in the Great Mekong region, *Journal of Environmental Management*, 275, 111300. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111300>
7. Bist, L., Sharma, R., & Thakurathi, B. (2023). Effect of seed tuber size on growth and yield of potato (*Solanum Tuberosum* L.) variety Desiree in Dadeldhura. *Contemporary Research: An Interdisciplinary Academic Journal*, 6, 110-123. <https://doi.org/10.3126/craiaj.v6i2.60251>
8. Biswas, S., & Dutta, D. (2020). Effect of integrated nutrient management (INM) on nutrient uptake, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 436-442, <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1f.8292>
9. Catuna Petrar, T. M., Braşovean, I., Racz, C. P., Mîrza, C. M., Burduhos, P. D., Mălinaş, C., Moldovan, B. M., & Odagiu, A. C. M. (2024). The impact of agricultural inputs and environmental factors on potato yields and traits. *Sustainability*, 16(20), 8759. <https://doi.org/10.3390/su16208759>
10. Cassio, A., Cavalcante, A. C. P., Soares, M. E. P., Andrade, G. A. V., Silva, C. D., Santos, C. E. M., & Aquino, L. A. (2019). Influence of seed tuber size and sprouting stage on the phytotechnical characteristics of the potato var Agata. *Australian Journal of Crop Science*, 13(2), 282-286. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.02.p1416>
11. Ebrahim, S., Mohammed, H., & Ayalew, T. (2018). Effects of seed tuber size on growth and yield performance of potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties under field conditions. *African Journal of Agricultural Research*, 13(39), 2077-2086. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13405>
12. Getahun, B. B., Tiruneh, M. A., Aliche, E., Malossetti, M., Visser, R. G. F., & van der Linden, C. G. (2022). Genotype-by-environment interaction for quantitative trait loci affecting nitrogen use efficiency and associated traits in potato. *Potato Research*, 65(4), 777-807. <https://doi.org/10.1007/s11540-022-09548-x>
13. Ghobady, M., Jahanbin, S., Motalebifard, R., & Parvizi, K. (2011). Effect of phosphorus biofertilizers on yield and yield components of potato. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 21(2), 117-130. (in Persian with English abstract)
14. Hemayati, S., Taleghani, F., Saednia, D., & Dehghanshear, M. (2007). The effects of nitrogen and phosphorus application on physiological parameters of sugar beet seed bearing plants in Ardabil. *Sugar Beet*, 22(1), 75-90. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/JSB.2006.1666>
15. Iftikhar, A., Aijaz, N., Farooq, R., Aslam, S., Zeeshan, A., Munir, M., Irfan, M., Mehmood, T., Atif, M., Ali, M., & Shiraz, A. (2023). Beneficial role of Phosphate Solubilizing Bacteria (PSB) in enhancing soil fertility through a variety of actions on plant growth and ecological perspective: An updated review. *Xi'an Shiyong Xueyuan Xuebao/Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 19, 520-547.
16. Igiehon, B. C., Babalola, O. O., & Hassen, H. I. (2024). Rhizosphere competence and applications of plant growth-promoting rhizobacteria in food production – A review. *Scientific African*, 23, e02081. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02081>
17. Jam, E., Ebadi, A., Amini, E., & Dehdar, B. (2009). Effect of planting density and seed-minituber size on some quantitative and qualitative traits of potato. *Pajouhesh & Sazandegi*, 81, 20-29. (in Persian with English abstract).
18. Jenkins, P., & Ali, H. (2005). Phosphate supply and progeny tuber numbers in potato crops. *Annals of Applied Biology*, 136, 41-46. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2000.tb00007.x>
19. Kacheyo, O. C., van Dijk, L. C. M., de Vries, M. E., & Struik, P. C. (2021). Augmented descriptions of growth and development stages of potato (*Solanum tuberosum* L.) grown from different types of planting material. *Annals of Applied Biology*, 178(3), 549-566. <https://doi.org/10.1111/aab.12661>
20. Kafi, M., Nabati, J., Oskoueian, A., Oskoueian, E., & Shabahang, J. (2019). Evaluation of biofertilizers on quality, yield and yield components of two potatoes (*Solanum tuberosum*) cultivars. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(2), 65-84. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejsms.2019.15359.1827>
21. Kilonzi, J. M., Githui, D., Pwipwai, P., Kawira, C., oTieno, S., Kelele, J., Nganga, N., Nyongesa, M., Mafurah, J., & Kibe, A. (2024). Effects of seed tuber size of potato varieties on fungicide spray regime, weed infestation and net farm income in potato production. *Potato Research*, 68, 23-47. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09708-1>
22. Martins, J. D. L., Soratto, R. P., Fernandes, A. M., & Dias, P. H. M. (2018). Phosphorus fertilization and soil texture affect potato yield. *Revista Caatinga*, 31(3), 541-550. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n302rc>

23. Muthoni, J., & Shimelis, H. (2020). Heat and drought stress and their implications on potato production under dry African tropics. *Australian Journal of Crop Science*, 14(9), 1405-1414. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.09.p2402>
24. Otazu, V., & Borus, D. (2023). *Protocols for management of aeroponics greenhouse used for seed potato production in Rwanda*. International Potato Center 2023. <https://doi.org/10.4160/cip.2023.09.001>
25. Pantigoso, H., He, Y., Manter, D., Fonte, S., & Vivanco, J. (2022). Phosphorus-solubilizing bacteria isolated from the rhizosphere of wild potato *Solanum bulbocastanum* enhance growth of modern potato varieties. *Bulletin of the National Research Centre*, 46, 224. <https://doi.org/10.1186/s42269-022-00913-x>
26. Pandit, A., Dwivedi, D. K., Choubey, A. K., Bhargaw, P. K., & Raj, R. K. (2018). Effect of integrated nutrient management on yield of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(6), 797-800.
27. Rosen, C., & Bierman, P. (2008). Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. *American Journal of Potato Research*, 85, 110-120. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9001-y>
28. Sonawane, P. D., & Dhoble, M. V. (2004). Effect of spacing and seedling tuber size on potato (*Solanum tuberosum*) grown through true potato seed. *Indian Journal of Agronomy*, 49, 194-197. <https://doi.org/10.59797/ija.v49i3.5195>
29. Sharma, A. K. (2002). *Biofertilizers for Sustainable Agriculture*. 1nd edition. Jodhpur: Agrobios, India. pp. 456.
30. Sundara, B., Natarajan, V., & Hari, K. (2002). Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugar cane and sugar yields. *Field Crop Research*, 77, 43-49. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00048-5)
31. Valadabadi, S. A. R., Lebaschi, M. H., & Aliabadi Farahani, H. (2010). The effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), P₂O₅ fertilizer and irrigation according to physiological growth indices of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 414-428. (in Persian with English abstract)
32. Westermann, D. T. (2005). Nutritional requirements of potatoes. *American Journal of Potato Research*, 82(4), 301-307. <https://doi.org/10.1007/BF02871960>
33. L. Zambrano-Mendoza, J., A. Sangoquiza-Caiza, C., F. Campaña-Cruz, D., & F. Yáñez-Guzmán, C. (2021). Use of Biofertilizers in Agricultural Production. *IntechOpen*. pp: 536. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98264>



Optimization and Validation of Two Machine Learning Algorithms for Accurate Prediction of Irrigated Wheat (*Triticum aestivum* L.) Yield and Identification of its Influential Factors in Khorasan Razavi Province

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: 04 May 2025

Revised: 09 July 2025

Accepted: 22 July 2025

Available Online: 22 July 2025

How to cite this article:

Jahan, M. (2025). Optimization and Validation of Two Machine Learning Algorithms for Accurate Prediction of Irrigated Wheat (*Triticum aestivum* L.) Yield and Identification of its Influential Factors in Khorasan Razavi Province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 511-543. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.93323.1395>

Introduction

This study undertook a detailed comparison of two supervised machine-learning algorithms—Random Forest (RF) and eXtreme Gradient Boosting (XGBoost)—to predict irrigated wheat (*Triticum aestivum* L.) yield across 20 counties in Razavi Khorasan Province. Both models were trained on 70 % of the dataset (years 1383–1402) and tested on the remaining 30 %. Hyperparameter tuning was performed via a grid search coupled with five-fold cross-validation.

Materials and Methods

The two algorithms were initially trained and optimized using 70% of the data (approximately 14 years per county) and subsequently tested on the remaining 30% (approximately 6 years). Hyperparameter tuning was performed through a grid search combined with five-fold cross-validation. Hyperparameter Tuning was performed using Gridsearch over key parameters (e.g., number of trees $n_{\text{estimators}}$, maximum depth max_depth , learning rate for XGBoost) with 5-fold cross-validation. Afterwards, both models were evaluated and validated using RMSE (Root Mean Squared Error), R^2 (Coefficient of Determination), MAE (Mean Absolute Error), Willmott's d (Index of Agreement). Two machine learning algorithms, Random Forest and XGBoost, were developed to predict wheat performance at the district level. The performance values were initially predicted numerically using regression and then divided into three distinct classes using statistical percentiles: Low: 0th to 33rd percentile; Medium: 33rd to 66th percentile; High: 66th to 100th percentile. This classification was based on both the actual and predicted values for each district. The results of this classification are presented in the form of a confusion matrix for each model. Using three indices—Aridity Index, Seasonal Intensity of Temperature, and Growing Degree Days—districts in the province were clustered into three climatic zones. Then, wheat performance in these zones was analyzed based on two models. In this study, the machine learning algorithms Random Forest and XGBoost were implemented in Python 3.3 using the Scikit-learn library. DataFrame preparation and the clustering of the province's counties into climatic zones were carried out using R 4.3.2 and ArcGIS 10.8.2.

Results and Discussion

Algorithms Performance: On average, RF reduced prediction error by ~19 % (395 vs. 492 kg ha⁻¹ RMSE) and achieved a slightly higher agreement with observed yields ($d=0.467$ vs. 0.419). Random forest showed Best



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.2025.93323.1395>

RF Performance for Khalilabad ($RMSE = 141.19 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE = 125.68 \text{ kg ha}^{-1}$, $d = 0.37$) and Bardeskan ($RMSE = 187.69 \text{ kg ha}^{-1}$, $d = 0.80$); Worst RF Performance was obtained for Quchan ($RMSE = 667.65 \text{ kg ha}^{-1}$, $d = 0.36$) and Torbat-e Heydarieh ($RMSE = 581.33 \text{ kg ha}^{-1}$, $d = 0.47$). Best XGBoost Performance was obtained for Torbat-e Jam ($RMSE = 269.36 \text{ kg ha}^{-1}$, $d = 0.77$), Neyshabur ($RMSE = 377.91$, $d = 0.78$). Worst XGBoost Performance resulted for Quchan ($RMSE = 943.99 \text{ kg ha}^{-1}$, $d = 0.25$) and Torbat-e Heydarieh ($RMSE = 786.20 \text{ kg ha}^{-1}$, $d = 0.39$). In 6 out of 20 counties (Khaf, Mahvelat, Kalat-e Nader, Kashmar, Chenaran, Fariman) both RF and XGBoost performed nearly identical errors ($\Delta RMSE < 15 \text{ kg ha}^{-1}$), indicating similar predictive power under those local conditions.

Feature Importance: Daily Minimum Temperature (Tmin): Ranked #1 in RF's importance list; ranked #3 in XGBoost. Seasonal Tmin (TminGS): Consistently #3 in both models. Other Key Predictors: Precipitation over the growing season (Prec, PGS), Growing Degree Days (GDDGS), and Evapotranspiration (ETGS) all contributed substantially, though with 4th–8th ranks markedly lower in RF than in XGB.

Classification of Yield into Three Performance Classes: Using percentile thresholds—Low (0–33rd), Medium (34–66th), High (67–100th)—the models were also evaluated as classifiers. Low-Performing Counties Needing Intervention Seven counties (35 % of the sample)- Quchan, Torbat-e Heydarieh, Sarakhs, Kalat-e Nader, Gonabad, Neyshabur, Taybad- fell in the Low performance class across both models. These areas should be prioritized for targeted agronomic management and resource allocation.

Cluster-Based Insights: Counties were grouped into three agro-climatic clusters: Very Dry & Hot (4 counties): RF outperformed XGB in all (e.g., Bardeskan, Khalilabad, Mahvelat, Sarakhs). Semi-humid Cooler (6 counties): Mixed results-RF won in 4 (Chenaran, Kalat-e Nader, Mashhad, Nishapur); XGB was slightly better in 2 (Fariman, Quchan). Warm Semi-arid (10 counties): RF superior in 7; equivalence in Taybad & Torbat-e Heydarieh; XGB edged ahead only in no counties here.

Conclusion

Overall, the Random Forest model showed better results for predicting wheat yield in Razavi Khorasan province, especially in most counties. Although the XGBoost model has higher potential for modeling complex patterns, Random Forest performed more accurately in conditions of greater data dispersion. In conclusion, the results of this study emphasize that by utilizing climatic and agricultural data, machine learning algorithms can be optimized not only to achieve high accuracy but also to provide a clear interpretation of the contribution of each variable in wheat yield using the SHAP tool.

Keywords: Cross-validation, Grid search, Random Forest, XGBoost, Yield class

بهینه‌سازی و اعتبارسنجی دو الگوریتم یادگیری ماشین برای پیش‌بینی دقیق عملکرد گندم آبی (*Triticum aestivum* L.) و تعیین عوامل مؤثر بر آن در استان خراسان رضوی

محسن جهان^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

چکیده

در این تحقیق به مقایسه دو الگوریتم یادگیری ماشین، رندوم‌فارست و ایکس‌جی‌بوست، در پیش‌بینی عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) آبی در ۲۰ شهرستان استان خراسان رضوی پرداخته شد. دو الگوریتم ابتدا با ۷۰ درصد داده‌ها آموزش دیده و بهینه‌سازی شدند و سپس با ۳۰ درصد داده‌ها مورد آزمون قرار گرفتند. بهینه‌سازی دو الگوریتم به کمک جستجوی شبکه‌ای با اعتبارسنجی متقابل پنج مرحله‌ای انجام گرفت. در ادامه، هر دو الگوریتم ارزیابی و تعیین اعتبار شدند. از نظر معیارهای ارزیابی، مانند جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و شاخص توافق ویلموت (d)، مدل رندوم‌فارست در بسیاری از شهرستان‌ها عملکرد بهتری داشت، درحالی‌که ایکس‌جی‌بوست در مناطقی با توزیع پیچیده‌تر داده‌ها (مانند مشهد) توانست به‌طور مؤثرتری عمل کند. مقایسه نتایج مدل‌ها در شهرستان‌های مختلف نشان می‌دهد که مدل رندوم‌فارست در بسیاری از شهرستان‌ها دقت بالاتری داشت. برای مثال، در شهرستان‌هایی مانند خلیل‌آباد، سبزوار، تربت‌جام، رشت‌خوار، نیشابور و گناباد، مدل رندوم‌فارست خطای کمتری نسبت به ایکس‌جی‌بوست داشت. از سوی دیگر، مدل ایکس‌جی‌بوست در بعضی مناطق خاص مانند مشهد، بردسکن، درگز، سرخس و تایباد عملکرد بهتری از خود نشان داد که احتمالاً به ویژگی‌های خاص این شهرستان‌ها مربوط می‌شود. برای شهرستان‌های خاف، مه‌ولات و کلات نادر، هر دو مدل یکسان عمل کردند. تحلیل شیب نشان داد که در هر دو مدل، دمای کمینه روزانه نقش برجسته‌ای در پیش‌بینی عملکرد گندم ایفا کرد. در مدل رندوم‌فارست، دمای کمینه روزانه رتبه اول را داشت، درحالی‌که در مدل ایکس‌جی‌بوست این ویژگی به‌طور معمول از اهمیت کمتری برخوردار بود. سایر ویژگی‌ها مانند بارندگی و درجه روز رشد نیز به‌شکل قابل توجهی در دقت مدل‌ها تأثیرگذار بودند. مدل‌ها همچنین در طبقه‌بندی عملکرد گندم با استفاده از ماتریس درهم‌ریختگی ارزیابی شدند. مدل ایکس‌جی‌بوست به‌طور کلی دقت بالاتری در طبقه‌بندی کلاس‌های عملکرد داشت، درحالی‌که رندوم‌فارست در شبیه‌سازی دقیق‌تر داده‌های واقعی و کاهش خطاهای پیش‌بینی موفق‌تر عمل کرد. به‌طور کلی، مدل رندوم‌فارست برای پیش‌بینی عملکرد گندم در استان خراسان رضوی نتایج بهتری در بیشتر شهرستان‌ها نشان داد. اگرچه مدل ایکس‌جی‌بوست پتانسیل بالاتری برای مدل‌سازی الگوهای پیچیده دارد، اما رندوم‌فارست در شرایط پراکندگی بیشتر داده‌ها دقیق‌تر عمل کرد. نتایج این مطالعه تأکید کرد که با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی و زراعی می‌توان الگوریتم‌های یادگیری ماشین را بهینه کرده و علاوه بر دقت بالا، به کمک ابزار شیب، تحلیلی شفاف و کاربردی از نقش هر متغیر در عملکرد گندم ارائه نمود.

واژه‌های کلیدی: ایکس‌جی‌بوست، تعیین اعتبار متقابل، جستجوی شبکه‌ای، رندوم‌فارست، کلاس عملکرد

مقدمه

و امنیت غذایی را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم تبدیل کرده است (Aslan, Sabanic, & Aslan, 2024; Moreno Sanchez, Acosta Mesa, Trueba Espinosa, Ruiz Castilla, & Garcia Lamont, 2025). در این شرایط، صرفاً افزایش تولید کافی نیست، بلکه بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و بهبود بهره‌وری، کاهش ضایعات و پیش‌بینی دقیق عملکرد محصولات کشاورزی نیز از اولویت‌های اساسی سیاست‌گذاران و پژوهشگران است (Arun & Ghimire, 2019; Jhajharia, Mathur, Jain, & Nijhawan,

افزایش بی‌سابقه جمعیت جهان (پیش‌بینی شده است ۹/۷ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰) همراه با کاهش منابع آب و خاک و تشدید تغییرات اقلیمی، فشار مضاعفی بر نظام تولید مواد غذایی وارد می‌آورند

۱- گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*) نویسنده مسئول: jahan@ferdowsi.um.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.93323.1395>

۲۰۲۳). گندم (*Triticum aestivum* L.)، مهم‌ترین غله جهان، با سهم حدود ۲۱ درصد از تولید کالری جهانی، یکی از محورهای اصلی تأمین غذا محسوب می‌شود. برآورد می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، تقاضای جهانی برای گندم تا ۶۰ درصد افزایش یابد، این در حالی است که نوسانات اقلیمی روند کاهشی عملکرد سالانه این محصول را تشدید می‌کنند (Hatfield & Prueger, 2015).

تغییرات اقلیمی تأثیر عمیقی بر عملکرد محصولات زراعی دارند. دما و بارش به‌تنهایی حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از واریانس تغییرات عملکرد سالیانه را توضیح می‌دهند (Ray, Gerber, Macdonald, & West, 2015). اثر منفی افزایش دما بر عملکرد گندم، جو و ذرت در مقیاس جهانی به اثبات رسیده است. گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در چرخه ارزیابی هفتم (AR7) و به‌روزرسانی‌های منتشرشده پس از گزارش ششم ارزیابی (AR6) در سال ۲۰۲۳ منتشر شده است، نشان می‌دهد که گرمایش جهانی تا سال ۲۰۲۰ به ۱/۱ درجه سانتی‌گراد بالاتر از سطح پیش‌صنعتی رسیده است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰، حتی در سناریوهای خوش‌بینانه، این افزایش ادامه یابد و به بیش از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نزدیک شود یا از آن فراتر رود (Asseng, Ewert, Martre, Potter, & Lobell et al., 2015; IPCC, 2022). وقوع و تکرار پدیده‌های شدید مانند خشکی‌های طولانی‌مدت، سیل و سرمازدگی، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، چالش‌های عدیده‌ای را برای تولید گندم به وجود آورده است که می‌تواند به‌سرعت زیربنای کشاورزی را تضعیف کند (Asseng et al., 2015; Raymundo, Asseng, Robertson, et al., 2018). مدل‌سازی‌های اقلیمی آینده نیز کاهش عملکرد محصولات زراعی را پیش‌بینی و تأیید می‌کنند.

در ایران، مطالعات متعددی کاهش میزان بارش‌های فصلی، به‌ویژه در فصول بهار و پاییز را گزارش کرده‌اند که به‌نوبه خود بحران کم‌آبی و تنش گرمایی را تشدید نموده است، همچنین مدل‌سازی‌های اثر تغییر اقلیم بر سیستم‌های زراعی کشور در سال‌های گذشته نشان‌دهنده روند کاهشی در عملکرد گندم بوده و پیش‌بینی‌های آن‌ها مبنی بر اینکه تا افق ۱۴۰۰ خورشیدی، کاهش عملکرد در برخی مناطق تا حدود ۴۵ درصد نیز می‌رسد، تحقق یافته است (Koocheki, Nassiri-Mahallati, Kamali, & Shahandeh, 2006; Javadi, Ghahremanzadeh, Sassi, Javanbakht, & Hayati, 2024). نوسانات مکانی و زمانی عملکرد گندم در سطح جهان و ایران نه‌تنها ناشی از تغییرات اقلیمی، بلکه نتیجه تفاوت در دسترسی به منابع آبی، مدیریت زراعی و ادوات کشاورزی است (Farhadi, Bannayan, Fallah, & Jahan, 2024; Roell, Beucher, Moller, Greve, & Greve, 2020). به‌عنوان مثال، در یک مطالعه پنلی در سه شهرستان استان خراسان رضوی، بیش از ۴۰ درصد تغییرات عملکرد

گندم با متغیرهای اقلیمی توضیح داده شد (Farhadi et al., 2024). پیش‌بینی دقیق عملکرد به کشاورزان کمک می‌کند تا منابعی مانند آب، کود و نیروی کار را به‌طور مؤثرتری به کار گیرند. پیش‌بینی عملکرد محصول از قبل، به برنامه‌ریزی بازاریابی و توزیع نیز کمک می‌کند و به ذی‌نفعان - از کشاورزان گرفته تا تولیدکنندگان مواد غذایی و خرده‌فروشان - اجازه می‌دهد تا برای نوسانات عرضه و تقاضا، کاهش ضایعات و اطمینان از در دسترس بودن مواد غذایی آمادگی پیدا کنند (Aslan et al., 2024). با پیچیده‌تر شدن روابط میان متغیرهای اقلیمی، خاکی و مدیریتی، نیاز به روش‌های پیشرفته‌ای برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد گندم احساس می‌شود. اگرچه امروزه مدل‌های فرآیند-محور با امکانات گسترده‌ای در دسترس هستند، اما نیاز به تنظیم پارامترها، واسنجی و اعتبارسنجی این مدل‌ها تحت شرایط خاص و در نهایت وجود خطا در خروجی‌ها، همچنان موضوعی چالش برانگیز می‌باشد (Dhillon et al., 2023; Krishnadoss & Ramasamy, 2024). یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری نوظهور، به‌ویژه الگوریتم جنگل تصادفی که با ترکیب نتایج چندین درخت تصمیم، توانایی بالایی در شناسایی الگوهای غیرخطی و چندمتغیری دارد، در سال‌های اخیر محبوبیت یافته است (Nayak et al., 2022; Jhajharia et al., 2023; Khodjaev, Bobojonov, Kuhn, & Glauben, 2025). مطالعات متعددی گزارش کرده‌اند که مدل‌های مبتنی بر جنگل تصادفی، نسبت به مدل‌های آماری کلاسیک مانند رگرسیون خطی چندان، به‌طور محسوسی عملکرد بهتری در پیش‌بینی عملکرد گندم ارائه می‌دهند. برای مثال، جذر میانگین مربعات خطا مدل رندوم‌فارست در یک مطالعه منطقه‌ای ۱۶۳/۹۰ کیلوگرم بر هکتار (عملکرد گندم زمستانه) گزارش شد که در مقایسه با مدل رگرسیون خطی که ۶۵۳/۳۹ کیلوگرم بر هکتار بود، حاکی از دقت بیشتر آن می‌باشد (Shen et al., 2024). افزون‌بر این، روش‌های نوینی مانند رندوم‌فارست خودآموز با امکان گسترش مجموعه‌های داده برچسب‌دار و بهبود دقت پیش‌بینی نشان داده‌اند که می‌توان بدون نیاز به داده‌های گسترده اولیه، دقت مدل در پیش‌بینی عملکرد گندم زمستانه را تا حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد ارتقاء داد (Shen et al., 2024). در پژوهشی دیگر، به‌کارگیری پهپاد در برداشت داده‌ها از مزرعه گندم به‌منظور تهیه دیتاست برای پیش‌بینی عملکرد گندم نشان داد که مدل ماشین بهینه‌سازی‌شده در مقایسه با مدل‌های خطی سنتی، دقت پیش‌بینی را به‌میزان ۷ تا ۱۲ درصد افزایش داد (Khodjaev et al., 2025). همچنین پژوهش‌های اخیر بر اهمیت تنظیم آبرپارامترها با استفاده از تکنیک‌هایی مانند بهینه‌سازی شبکه‌ای و آزمون‌های پسا آزمون مانند کراس ولیدیشن تأکید دارند که منجر به بهبود ۷ تا ۱۲ درصدی دقت مدل‌های جنگل تصادفی می‌شود.

جدول ۱- ویژگی‌های دو الگوریتم یادگیری ماشین رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست
Table 1- Comparison of the characteristics of random forest and XGBoost algorithms

ویژگی/الگوریتم Feature / algorithm	رندوم فارست Random Forest	ایکس‌جی‌بوست XGBoost
نحوه یادگیری Learning approach	مدل‌ها به صورت موازی Bagging ساخته می‌شوند (نوع و ترکیب مدل‌ها از یکدیگر مستقل هستند) Models are built in parallel using Bagging (each model is independent)	مدل‌ها به صورت زنجیره‌ای Boosting ساخته می‌شوند (هر مدل، خطای مدل قبلی را اصلاح می‌کند) Models are built sequentially using Boosting (each model corrects the errors of the previous one)
سرعت یادگیری Training speed	روی CPU سریع Fast on CPU	روی GPU خیلی سریع Very fast on GPU
دقت نهایی Final accuracy	خوب Good	معمولاً بهتر، مخصوصاً روی داده‌های پیچیده Usually better, especially on complex data
کنترل روی بیش‌برازش Overfitting control	خوب Good	عالی (به دلیل داشتن پارامترهایی مثل regularization) Excellent (thanks to parameters like regularization)
قابلیت کار با داده‌های ناقص Handling missing data	ندارد Not supported	دارد Supported

(۱۴۰۱). این شرایط، از یک سو، نشان از آسیب‌پذیری بالای این زیست‌بوم کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی دارد و از سوی دیگر، تنوع خرداقلیم و تفاوت مدیریتی گسترده در سطح شهرستان‌های این استان، ضرورت بررسی عمیق عوامل مؤثر بر عملکرد گندم آبی و مطالعه عمیق چگونگی تأثیر متغیرهای اقلیمی بر آن‌ها را دو چندان می‌کند.

با توجه به اینکه نوسانات چشمگیر بارش، تلفات گسترده در سال‌های پرتش و کاهش شدید عملکرد طی دوره زمانی ۱۴۰۲-۱۳۸۳ در برخی شهرستان‌ها نیازمند تحلیل عمیق‌تری است، این پژوهش با هدف اصلی شناسایی و تحلیل روند بلندمدت عملکرد گندم آبی در ۲۰ شهرستان خراسان رضوی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق مبتنی بر «یادگیری ماشین» طراحی و اجرا شد. برای این منظور، مجموعه‌ای از شاخص‌های اقلیمی و زراعی مؤثر بر عملکرد گندم از پایگاه‌های داده و منابع علمی منتشرشده استخراج و محاسبه گردید. سپس مدل‌های پیش‌بینی عملکرد گندم مبتنی بر دو الگوریتم رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست، برای هر شهرستان آموزش و توسعه داده شد و سپس دقت و اعتبار آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در آخر، اهمیت نسبی هر متغیر تعیین و راهکارهای مدیریتی سازگار با تغییرات آب‌وهوایی ارائه گردید. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای طراحی سیاست‌های مدیریتی سازگار با تغییرات اقلیمی و بهینه‌سازی تولید گندم در خراسان رضوی فراهم آورد.

جنگل تصادفی به دلیل توانایی بالای خود در مدل‌سازی روابط غیرخطی، مقاومت در برابر بیش‌برازش و ارائه شاخص‌های اهمیت متغیرها، به طور گسترده‌ای در مطالعات کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است (Roell et al., 2020; Pang, Chang, & Chen, 2022).

الگوریتم دیگری که در یادگیری ماشین و مسائل رگرسیون و کلاسیک‌بندی، توانایی بالایی دارد و به عنوان یک مدل قدرتمند در پیش‌بینی‌هایی همچون موضوع مقاله حاضر به شمار می‌رود، الگوریتم ایکس‌جی‌بوست^۱ است. ایده اصلی در این الگوریتم این است که به جای ساخت یک مدل بزرگ، چند مدل ساده (درخت تصمیم) را پشت سرهم می‌گذارد، به طوری که هر مدل بعدی، خطای مدل قبلی رو جبران می‌کند. هر دو الگوریتم از خانواده درخت تصمیم^۲ بوده و در عمل برای اهداف مشابه به کار گرفته می‌شوند. خلاصه‌ای از توانایی‌ها و مقایسه این دو الگوریتم در **جدول ۱** ارائه شده است.

استان خراسان رضوی، با اختصاص بیش از ۴۸ درصد از اراضی کشاورزی به گندم آبی، یکی از مهم‌ترین قطب‌های تولید این محصول در ایران است. داده‌های آماری مرکز جهاد کشاورزی نشان می‌دهد که در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، کاهش بارندگی تا ۳۸ درصد نسبت به متوسط بلندمدت، به همراه سرمازدگی منجر به خسارت‌های گسترده در بیش از ۴۷ هزار هکتار از اراضی آبی و بیش از ۹۶ هزار هکتار از اراضی دیم شد (سازمان تحقیقات کشاورزی،

1- XGBoost (Extreme Gradient Boosting)

2- Decision Tree

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، استان خراسان رضوی با مساحتی حدود ۱۱۸۸۵۴ کیلومترمربع است که در مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این استان دارای اقلیم متنوعی از نیمه‌خشک تا خشک کوهستانی بوده و در ارتفاع متوسطی حدود ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. این پژوهش در سطح ۲۰ شهرستان استان خراسان رضوی شامل مشهد، نیشابور، سبزوار، تربت حیدریه، کاشمر، قوچان، تربت جام، تایباد، گناباد، درگز، سرخس، فریمان، خواف، رشتخوار، بردسکن، چناران، بجستان، خلیل آباد، کلات نادر و مه‌ولات صورت گرفته است.

داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

اطلاعات اقلیمی: داده‌های روزانه دما (حداکثر، حداقل و میانگین)، بارندگی، تبخیر-تعرق، شاخص فصلی بودن درجه حرارت، درجه روز رشد و شاخص خشکی برای هر شهرستان در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۲ از ایستگاه‌های هواشناسی هر شهرستان تهیه شد و در موارد اندکی که خلأ داده وجود داشت و یا داده‌ها ناقص بودند، به‌منظور تکمیل و بازسازی داده‌ها، از پایگاه‌های معتبر و اعتبارسنجی شده جهت شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در سطح استان نظیر APHRODITE, ERA5, IMERG, AgMERRA استفاده و در قالب فایل‌های سالانه پردازش شدند (Yaghoubi, Bannayan, & Asadi, 2020; Farhadi et al., 2024; Soltani, Jahan, Yaghoubi, 2025). هر شهرستان براساس داده‌های آب‌وهوایی خود و موقعیت جغرافیایی در یک فایل جداگانه ذخیره شده و سپس با داده‌های عملکرد گندم ادغام شد.

اطلاعات عملکرد: داده‌های عملکرد گندم در واحد کیلوگرم بر هکتار برای هر شهرستان طی بازه زمانی ذکرشده از پایگاه آمار و اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی، مراجعه حضوری به سازمان جهاد کشاورزی و سایر منابع معتبر گردآوری شد. براساس این داده‌ها و نیز برخی منابع علمی منتشرشده، مجموعه‌ای از متغیرهای مهم اقلیمی و زراعی استخراج و محاسبه شدند که به‌عنوان متغیرهای مستقل در مدل مورد استفاده قرار گرفتند (Farhadi et al., 2024). این متغیرها در جدول ۲ آورده شده‌اند.

این متغیرها در قالب یک دیتافریم منظم ترکیب شده و مراحل آماده‌سازی داده‌ها شامل نرمال‌سازی (براساس امتیاز زد)، کنترل کیفیت و ادغام با داده‌های عملکرد روی آن‌ها انجام گرفت.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

۱- پیش‌بینی عملکرد گندم به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین

آموزش و تست مدل: در این مطالعه برای تحلیل اثر متغیرهای اقلیمی بر عملکرد گندم، از دو الگوریتم مستقل شامل رندوم‌فارست و ایکس‌جی‌بوست که هر دو از روش‌های یادگیری ماشین قدرتمند برای مدل‌سازی روابط پیچیده میان متغیرهای مستقل (ورودی‌ها) و متغیر وابسته (خروجی) محسوب می‌شوند در قالب سه رهیافت شامل پیش‌بینی کمی عملکرد گندم، پیش‌بینی طبقه‌ای عملکرد گندم، و پیش‌بینی عملکرد گندم در قالب ناحیه‌بندی اقلیمی استفاده شد. قابل یادآوری است که از آنجایی که این دو الگوریتم نسبت به داده‌های استاندارد نشده، مقاوم هستند (برخلاف شبکه‌های عصبی مصنوعی که هنگام کار با آن‌ها باید داده‌ها استاندارد شوند)، بنابراین از داده‌های دارای مقیاس واقعی استفاده شد (به‌جز در مورد نشان دادن اهمیت نسبی ویژگی‌ها). قبل از اجرای فرآیند یادگیری، داده‌ها به دو قسمت تقسیم شدند، ۷۰ درصد داده‌ها جهت آموزش مدل و ۳۰ درصد برای تست مدل اختصاص یافتند.

تحلیل با رندوم‌فارست: این الگوریتم با ایجاد مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری و تلفیق نتایج آن‌ها از طریق رأی‌گیری یا میانگین‌گیری، پیش‌بینی نهایی را انجام می‌دهد. رگرسور اختصاصی این الگوریتم، رندوم‌فارست رگرسور نام دارد. ویژگی‌های برجسته رندوم‌فارست شامل موارد زیر است: توانایی کشف روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی و عملکرد محصول؛ مقاومت در برابر بیش‌برازش^۱ به‌ویژه در حضور متغیرهای متعدد؛ ارائه رتبه‌بندی اهمیت متغیرها^۲ که در تحلیل نقش عوامل اقلیمی بسیار ارزشمند است؛ دقت بالای پیش‌بینی حتی در صورت وجود داده‌های ناقص یا پرنویز؛ کارایی در ساختارهای داده‌ای پنلی و سری زمانی بدون نیاز به فرض‌های محدودکننده.

1- Overfitting

2- Feature Importance

جدول ۲- متغیرهای اقلیمی و زراعی مورد استفاده در الگوریتم‌های پیش‌بینی عملکرد گندم در استان خراسان رضوی
Table 2- Climatic and agronomic variables used in wheat yield prediction algorithms in Khorasan Razavi province

شرح Description	متغیر اقلیمی / زراعی AgroClimatic variable
میانگین دمای روزانه در طول فصل رشد (درجه سانتی‌گراد) Average daily temperature during the growing season (°C)	Tmean (°C)
دمای بیشینه روزانه (درجه سانتی‌گراد) Daily maximum temperature (°C)	Tmax (°C)
دمای کمینه روزانه (درجه سانتی‌گراد) Daily minimum temperature (°C)	Tmin (°C)
بارندگی طی فصل رشد (میلی‌متر) Precipitation during the growing season (mm)	Prec (mm)
تبخیر و تعرق طی فصل رشد (میلی‌متر) Evapotranspiration during the growing season (mm)	ETGS (mm)
شاخص خشکی Aridity index	AI
تبخیر و تعرق (میلی‌متر) Evapotranspiration (mm)	ET (mm)
مجموع بارندگی در کل فصل رشد (میلی‌متر) Total precipitation during the growing season (mm)	PGS (mm)
تعداد روزهای بارندگی در فصل رشد Number of rainy days during the growing season	NPGS (روز)
دمای بیشینه در فصل رشد (درجه سانتی‌گراد) Maximum temperature during the growing season (°C)	TmaxGS (°C)
دمای کمینه در فصل رشد (درجه سانتی‌گراد) Minimum temperature during the growing season (°C)	TminGS (°C)
دمای میانگین در فصل رشد (درجه سانتی‌گراد) Average temperature during the growing season (°C)	TmeanGS (°C)
تعداد روزهای با دمای بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد Number of days with temperature above 30°C	NDO30
طول فصل رشد (روز) Length of the growing season (days)	GSL
شدت فصلی بودن درجه حرارت Temperature seasonality	TS
درجه روز رشد Growing degree days (GDD)	GDD
درجه روز رشد طی فصل رشد (درجه سانتی‌گراد روز) Growing degree days during the growing season (°C·days)	GDDGS (°C day)

طول فصل رشد، از ۱۵ آبان تا ۱۵ خرداد سال بعد در نظر گرفته شد.

The growing season was considered to extend from November 6 to June 5 of the following year.

فراهم می‌سازد. تنها عاملی که به کارگیری رویکرد اول را می‌تواند محدود کند، این است که زمانی که تعداد پارامترها زیاد باشد، سرعت اجرای آن روی رایانه‌های ضعیف، کند خواهد بود. در این پژوهش، مدل‌های رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست با استفاده از این دو روش، بهینه‌سازی و با اعتبارسنجی متقابل پنج‌تایی^۷ تعیین اعتبار شدند. در **جدول ۳**، این دو رویکرد با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

تعیین اعتبار^۸ و ارزیابی دقت مدل^۹: برای ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، فرآیند تعیین اعتبار یا اعتبارسنجی نقش کلیدی ایفا می‌کند. در این فرآیند، مدل‌ها روی داده‌هایی که در آموزش شرکت نداشته‌اند مورد آزمایش قرار می‌گیرند تا میزان تعمیم‌پذیری آن‌ها بررسی شود. در فرآیند مدل‌سازی عملکرد گندم، تعیین اعتبار نقشی حیاتی در اطمینان از قابلیت تعمیم مدل به داده‌های جدید ایفا می‌کند. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های اعتبارسنجی، ارزیابی دقت است که با استفاده از معیارهایی شامل ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا، میانگین مطلق خطا و شاخص توافق ویلموت (دی)، کیفیت پیش‌بینی‌های مدل را کمی می‌سازد. بنابراین، ارزیابی دقت را می‌توان بخشی از فرآیند جامع‌تر تعیین اعتبار دانست که امکان مقایسه دقیق بین مدل‌ها و انتخاب گزینه بهینه را فراهم می‌سازد. بدین ترتیب، دقت مدل‌ها برای هر ناحیه اقلیمی به‌صورت مجزا سنجیده شد تا میزان اطمینان‌پذیری آن‌ها در مناطق با شرایط متفاوت اقلیمی بررسی گردد. این تحلیل، مبنایی برای انتخاب مدل نهایی و تفسیر نتایج نهایی پیش‌بینی فراهم ساخت.

برای ارزیابی دقت مدل‌های طبقه‌بندی، از ماتریس درهم‌ریختگی استفاده شد که امکان تحلیل دقیق عملکرد مدل را فراهم می‌سازد. این ماتریس، تعداد پیش‌بینی‌های درست و نادرست را برای هر کلاس به‌صورت مجزا نشان می‌دهد و شامل چهار مقدار کلیدی است: مثبت واقعی، منفی واقعی، مثبت نادرست، و منفی نادرست. با استفاده از این مقادیر، معیارهای مهمی نظیر دقت کلی یا صحت، بازیابی یا حساسیت، امتیاز اف-وان و دقت مثبت پیش‌بینی محاسبه می‌شوند (Ting, 2011). این تحلیل کمک می‌کند تا نقاط ضعف مدل در شناسایی کلاس‌ها به‌ویژه در داده‌های نامتوازن مشخص شود. در این مطالعه، از ماتریس درهم‌ریختگی برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست در دسته‌بندی شهرستان‌های با سه کلاس عملکرد بالا، متوسط و پایین استفاده شد. برای این منظور، مراحل زیر انجام گرفت.

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل رندوم فارست، از شاخص‌های آماری نظیر ضریب تبیین^۱ (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا^۲، میانگین مطلق خطا^۳ و شاخص توافق ویلموت^۴ استفاده گردید. جهت تحلیل عمیق‌تر نتایج، مجموعه‌ای از نمودارهای گرافیکی شامل تحلیل اهمیت نسبی متغیرها، درخت‌های تصمیم‌گیری همراه با شاخص‌های ارزیابی مدل برای هر شهرستان ترسیم شد. این نمودارها درک دقیق‌تری از ترتیب و نقش متغیرهای اقلیمی و زراعی در تبیین عملکرد گندم فراهم کرده و به تفسیر روابط حاکم در هر شهرستان و به‌دنبال آن هر ناحیه اقلیمی کمک می‌کنند.

شایان ذکر است که برای هر شهرستان، یک مدل اختصاصی آموزش داده شد و پس از ارزیابی دقیق با داده‌های جدید، عملکرد آن با استفاده از شاخص‌های آماری تأیید شد. این مدل‌های آموزش‌دیده در قالب فایل‌هایی با فرمت pk1 ذخیره و مستندسازی گردید تا در کاربردهای آتی (جهت پیش‌بینی) مورد استفاده قرار گیرند.

تحلیل با ایکس‌جی‌بوست: کلیه مراحل انجام‌گرفته در الگوریتم رندوم فارست، با داده‌های ورودی یکسان، با الگوریتم ایکس‌جی‌بوست نیز انجام گرفتند. رگرسیون اختصاصی این الگوریتم، ایکس‌جی‌بوست رگرسیون نام دارد.

۲- پیش‌بینی طبقه عملکرد گندم در شهرستان‌های استان خراسان رضوی

به‌منظور طبقه‌بندی (کلاس‌بندی) عملکرد گندم در هر شهرستان، از دو الگوریتم رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست استفاده شد، با این تفاوت که در این رهیافت، مدل‌ها بهینه‌سازی نشدند (به‌دلیل ماهیت طبقه‌ای داده‌ها در این رویکرد).

بهینه‌سازی مدل‌ها: جهت بهینه‌سازی ابرپارامترهای مدل‌های یادگیری ماشین و یافتن بهترین ترکیب ممکن برای هر الگوریتم، از دو رویکرد جستجوی شبکه‌ای با اعتبارسنجی متقابل^۵ و جستجوی تصادفی با اعتبارسنجی متقابل^۶ بهره‌گیری شد (تعداد فولد، ۵ و $n_estimator$ برابر با ۳۰۰). رویکرد اول 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 براساس دقت (مثلاً R^2) برای متغیر هدف (مثلاً عملکرد گندم) پیدا می‌کند، درحالی‌که رویکرد دوم با انتخاب تصادفی اما هدفمند، امکان بهینه‌سازی سریع‌تر را در مسائل با فضای پارامتر گسترده

- 1- Coefficient of determination (R^2)
- 2- Root Mean Square Error (RMSE)
- 3- Mean Absolute Error (MAE)
- 4- Willmott's Agreement Index (d)
- 5- GridSearch Cross Validation
- 6- RandomizedSearch Cross Validation

7- 5-Fold Coss-Validation

8- Validation

9- Model Evaluation

جدول ۳- مقایسه دو رویکرد بهینه‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی عملکرد گندم

Table 3- Comparison of two optimization approaches for machine learning algorithms in wheat yield prediction

ویژگی/الگوریتم	جستجوی تصادفی	جستجوی شبکه‌ای
Feature / algorithm	Randomized search	Grid search
دقت جستجو	متوسط، (تعدادی ترکیب تصادفی)	بالا، (تمام ترکیب‌های ممکن)
Search accuracy	Moderate (a number of random combinations)	High (all possible combinations)
سرعت	سریع‌تر	کند، به‌خصوص با پارامتر زیاد
Speed	Faster	Slower, especially with many parameters
استفاده بهینه از منابع	بله	نه زیاد
Efficient use of resources	Yes	Not much
برای تست پارامترهای زیاد در زمان محدود	خیلی خوب	کند
For testing many parameters in limited time	Very good	Slow
برای تست پارامترهای کم در زمان کافی	خیلی خوب	عالی
For testing few parameters with enough time	Very good	Excellent

۱- جمع زدن پیش‌بینی‌ها درون هر خوشه. ۲- ایجاد بردار برای نمونه واقعی و پیش‌بینی شده ($y_true_clusterN$) شامل برچسب‌های واقعی عملکرد مثلاً high/low و $y_pred_clusterN$ برای پیش‌بینی‌های مدل. ۳- ایجاد کانفیوژن ماتریکس برای هر خوشه.

تحلیل و ارزیابی نقش متغیرها بر اساس چارچوب SHAP

به‌منظور تبیین نقش نسبی هر یک از ویژگی‌های ورودی در پیش‌بینی عملکرد گندم، از چارچوب تفسیری SHapley Additive (SHAP) exPlanations استفاده شد. روش SHAP یکی از قدرتمندترین ابزارهای تفسیر مدل‌های یادگیری ماشین است که با بهره‌گیری از مفاهیم نظریه بازی شاپلی، سهم مشارکتی هر ویژگی را در خروجی مدل به‌صورت منصفانه و دقیق برآورد می‌کند. این رویکرد، برخلاف برخی روش‌های سنتی که صرفاً به ارزیابی حضور یا عدم حضور یک متغیر بسنده می‌کنند، قادر است که تأثیر هر متغیر را در بسترهای مختلف داده و در سطح محلی (برای یک نمونه خاص) و سراسری (میانگین مقادیر شیب برای همه نمونه‌ها به دست می‌آید و اهمیت کلی ویژگی‌ها مشخص می‌شود) مورد تحلیل قرار دهد. در نتیجه، تحلیل مبتنی بر شیب، تصویری جامع از نحوه و شدت تأثیرگذاری هر متغیر در سراسر فضای داده‌ها ارائه می‌دهد (Remman & Lekkas, 2021; Kim & Kim, 2022). مهم‌ترین دلایل بهتر بودن شیب سایر روش‌های مشابه به قرار زیر است: سازگار بودن با هر نوع مدل مانند مدل‌های دیپ، درختی، و خطی. نشان دادن سهم منصفانه هر ویژگی (طبق قضایای ریاضی)؛ برخلاف روش‌هایی مثل اهمیت برپایه جابه‌جایی، اثر تعاملی و همبستگی بین ویژگی‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. درحالی‌که اهمیت برپایه جابه‌جایی با جابه‌جا کردن مقادیر هر ویژگی در داده‌های آزمون و سنجش تغییر در عملکرد مدل، میزان اهمیت هر ویژگی را برآورد می‌کند، روش شیب برپایه نظریه بازی‌های مشارکتی، سهم منصفانه و دقیق هر ویژگی را

در پیش‌بینی خروجی مدل - هم به‌صورت محلی برای هر نمونه و هم به‌صورت کلی - اندازه‌گیری می‌کند. برخلاف اهمیت برپایه جابه‌جایی که ممکن است در حضور ویژگی‌های همبسته دچار خطا یا تفسیر گمراه‌کننده شود، شیب توانایی جداسازی و تحلیل دقیق اثرات فردی و تعاملی ویژگی‌ها را دارد. به همین دلیل، در تحلیل‌های مبتنی بر مدل‌های پیچیده مانند رندوم‌فارست و ایکس‌جی‌بوست، استفاده از رهیافت شیب توصیه می‌شود. برای نمایش نتایج این تحلیل، از نمودارهای ویولن استفاده شد. این نمودارها توزیع مقادیر شیب مرتبط با هر ویژگی را نشان می‌دهند و از طریق شکل ترکیبی خود (شامل چگالی احتمال و آمار توصیفی)، هم جهت اثرگذاری (مثبت یا منفی بودن شیب)، به این معنی که ویژگی‌های با مقادیر شیب مثبت باعث افزایش مقدار پیش‌بینی شده می‌شوند و ویژگی‌های با مقادیر شیب منفی باعث کاهش مقدار پیش‌بینی شده می‌شوند) و هم شدت نسبی آن را بر خروجی مدل به تصویر می‌کشند.

نمودار دیگری که شیب تولید می‌کند، نمودار تصمیم^۱ نام دارد که نشان می‌دهد چگونه هر ویژگی بر پیش‌بینی مقدار متغیر وابسته اثر می‌گذارد. آخرین نموداری که به کمک شیب برای هر شهرستان ایجاد شد، نمودار وابستگی جزئی^۲ است که رابطه مستقیم بین هر ویژگی و متغیر وابسته (عملکرد گندم در هر شهرستان) را به تصویر می‌کشد. استفاده از این نمودارها، ضمن تقویت شفافیت مدل‌های یادگیری ماشین پیچیده، زمینه را برای تفسیر علمی خروجی مدل و شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد گندم فراهم می‌سازد؛ موضوعی که برای تدوین راهبردهای مدیریتی و سیاست‌گذاری کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است.

۳- پیش‌بینی عملکرد گندم بر اساس خوشه‌بندی شهرستان‌ها در ناحیه‌های اقلیمی: برای شناسایی نواحی اقلیمی-

1- Decision Plot

2- Partial Dependence Plot

مبنای تحلیل‌های بعدی در مطالعه حاضر قرار گرفته و نواحی اقلیمی-کشاورزی استان را شناسایی کرده‌اند. توصیف هر ناحیه اقلیمی مطابق طبقه‌بندی اقلیمی شهرستان‌ها براساس سیستم کوپن-گایگر و آمار روزشده سایت کلایمیت دیتا صورت گرفت (Peel, Finlayson, & McMahon, 2007 <http://en.climate-data.org/asia/iran/razavi-khorasan-2216>). همچنین به‌منظور یادگیری بهتر مدل‌ها، شماره ناحیه اقلیمی هر شهرستان در یک ستون مستقل قرار گرفت. مزیت افزودن این متغیر در کنار سایر متغیرها این است که مدل، تفاوت اقلیم‌ها را یاد می‌گیرد، ولی همچنان از تمام جزئیات در سطح شهرستان بهره می‌برد، به عبارت دیگر، تفکیک‌پذیری مدل بهبود می‌یابد.

نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، رندوم‌فارست و ایکس‌جی‌بوست، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون 3.3 Python و کتابخانه Scikit-learn پیاده‌سازی شدند. آماده‌سازی دیتافریم‌ها و خوشه‌بندی شهرستان‌های استان در قالب ناحیه‌های اقلیمی، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R 4.3.2 و نرم‌افزار ArcGIS 10.8.2 انجام گرفت. از آنجایی که هر دو الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش درخت‌محور هستند، و درخت‌ها به مقیاس داده حساس نیستند، و می‌توانند با داده‌های خام نیز کار کنند، بنابراین نیازی به نرمال‌سازی یا استانداردسازی داده‌ها نیست. برای اجرای رندوم‌فارست در مواردی که مقیاس داده‌ها خیلی متفاوت باشد (مثلاً اگر بازه داده‌های تبخیر و تعرق بین صفر تا پنج و درجه روز رشد بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ باشد)، پیشنهاد شده در صورت امکان داده‌ها استاندارد شوند، اگرچه که اجباری در این کار نیست. در یک مورد خاص (نمودارهای شیب و بولونی)، داده‌ها جهت استفاده از ابزار شیب استاندارد (نرمال) شده و سپس خروجی‌ها بر این مبنا رسم شدند.

نتایج و بحث

تحلیل، مقایسه و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی عملکرد گندم آبی در سطح استان خراسان رضوی طی دو رهیافت مستقل انجام گرفت. در رهیافت اول، دو مدل رندوم‌فارست و ایکس‌جی‌بوست، آموزش داده و بهینه شدند، سپس روی داده‌هایی که در آموزش شرکت نداشتند، تست شدند.

کشاورزی مشابه (همگن) در استان خراسان رضوی، از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی^۱ استفاده شد. این روش برای تحلیل سه شاخص اقلیمی-کشاورزی شامل شاخص خشکی، شدت فصلی بودن درجه حرارت و درجه روز رشد به کار گرفته شده است. خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی به دلیل توانایی آن در شناسایی الگوهای پیچیده و توزیع نواحی با ویژگی‌های مشابه، انتخابی مناسب برای تحلیل داده‌های توزیع‌شده از چندین شاخص اقلیمی-کشاورزی است. این روش به‌ویژه در این حالت که داده‌ها از چندین شاخص مختلف استخراج شده‌اند، دقت بالاتری در شناسایی نواحی با ویژگی‌های مشابه ارائه می‌دهد. در پژوهش حاضر، ابتدا شاخص‌های اقلیمی-کشاورزی در محیط GIS درون‌یابی شدند و سپس مجموعه‌ای از نقاط نمونه‌ای (تصادفی) در سراسر منطقه استخراج شدند (۳۵۰ نقطه). این نقاط به‌عنوان ورودی تحلیل خوشه‌بندی در نرم‌افزار R و با استفاده از بسته‌های factoextra و cluster پردازش شدند. مراحل تحلیل به‌ترتیب زیر انجام شد.

- پیش‌پردازش داده‌ها با حذف مقادیر نامعتبر و استانداردسازی (scale) شاخص‌های ورودی.
- محاسبه ماتریس فاصله با استفاده از روش فاصله اقلیدسی^۲ بین نقاط نمونه‌ای.
- اجرای خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و گروه‌بندی نقاط مشابه در خوشه‌های مجزا با استفاده از روش نسخه بهبودیافته از روش Ward (Ward.D2) در بسته cluster.
- انتخاب تعداد بهینه خوشه‌ها (k) با استفاده از شاخص Silhouette. با افزایش آستانه شباهت (که باعث ایجاد خوشه‌های بزرگ‌تر و عمومی‌تر می‌شود)، شاخص سیلوئت کاهش می‌یابد. با گرفتن خروجی‌های متعدد، در نهایت براساس شاخص سیلوئت ۰/۴۱ (برابر با نزدیکی^۳ یا شباهت^۴ ۶۰ درصد) خوشه‌بندی انجام گرفت. مقدار ۰/۴۱ بهترین توازن بین تفکیک و همگنی خوشه‌ها را ایجاد کرد.
- انتساب خوشه‌ها به داده‌ها (برچسب‌گذاری) براساس نتایج خوشه‌بندی، به هر نقطه نمونه‌ای.

در نهایت، نتایج حاصل از خوشه‌بندی به‌فرمت CSV ذخیره شده و برای تحلیل فضایی به محیط ArcGIS منتقل شدند. در این مرحله، داده‌های نقطه‌ای خوشه‌بندی‌شده با استفاده از روش کریجینگ ساده درون‌یابی شده و به یک سطح پیوسته تبدیل شدند. سپس، با طبقه‌بندی نقشه درون‌یابی‌شده، محدوده‌های اقلیمی متناظر با هر خوشه به‌صورت پلی‌گون استخراج شدند. این خروجی‌های پلی‌گونی

- 1- Hierarchical Clustering
- 2- Euclidean Distance
- 3- Distance
- 4- Similarity

جدول ۴- معیارهای ارزیابی و تعیین اعتبار دو الگوریتم رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست در پیش بین عملکرد گندم آبی در استان خراسان رضوی، قبل و بعد از بهینه‌سازی

Table 4- Evaluation and validation metrics for random forest and XGBoost algorithms in predicting irrigated wheat yield in Khorasan Razavi province, before and after optimization

معیار ارزیابی / وضعیت مدل ModelStatus/evaluation metric	RMSE	R ²	MAE	d
رندوم فارست (پیش از بهینه‌سازی) RF (befor optimization)	399.53	0.134	326.24	0.46
رندوم فارست (پس از بهینه‌سازی) RF (after optimization)	395.13	0.136	331.50	0.47
ایکس‌جی‌بوست (پیش از بهینه‌سازی) XGB (befor optimization)	499.93	0.063	413.02	0.46
ایکس‌جی‌بوست (پس از بهینه‌سازی) XGB (after optimization)	492.21	0.074	408.09	0.42

سیاه رنگ داخل ویولون‌ها، نشان‌دهنده مقدار اهمیت هر ویژگی در نمونه‌های مختلف (مثلاً در تکرارهای cross-validation یا در بین زیربخش‌های داده) هستند. وقتی این نقاط در یک متغیر خاص، به جای تمرکز در یک محدوده باریک، در کل محور y پخش شده‌اند، نشان می‌دهد که اهمیت آن متغیر در شرایط مختلف (یا نمونه‌های مختلف) مدل، نوسان زیادی دارد، به عبارت دیگر، مدل نسبت به این ویژگی در برخی موارد آن را خیلی مهم و در موارد دیگر کم‌اهمیت ارزیابی کرده، که می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی متغیر، اثرات فصلی، یا تعاملات پیچیده با سایر متغیرها باشد.

متغیرهایی مانند طول فصل رشد، شدت فصلی بودن درجه حرارت و دمای بیشینه روزانه در سمت چپ نمودار قرار دارند و دارای بیشترین میزان اهمیت میانگین هستند. پهنای زیاد در ناحیه بالایی این ویولون‌ها نشان می‌دهد که مقدار اهمیت این ویژگی‌ها در بین نمونه‌های مختلف به طور گسترده در سطح بالایی متمرکز است. در مقابل، ویژگی‌هایی مانند شاخص خشکی، بارندگی، و بارندگی طی فصل رشد با تراکم در سطوح پایین‌تر و میانه پایین‌تر، نقش کم‌تری در پیش‌بینی عملکرد مدل داشته‌اند. این نشان می‌دهد که در اغلب تکرارهای مدل، این ویژگی‌ها تأثیر نسبتاً کم‌تری در خروجی نهایی داشته‌اند. پراکندگی نقاط سیاه نشان‌دهنده نوسان اهمیت در بین نمونه‌ها است. وجود نقاط با پراکندگی عمودی زیاد مثل تعداد دفعات وقوع بارندگی طی فصل رشد و دمای کمینه طی فصل رشد، نشان‌دهنده وابستگی متغیر به موقعیت مکانی یا شرایط خاص داده‌ها است، درحالی‌که متغیرهایی با توزیع فشرده‌تر مثل طول فصل رشد و دمای بیشینه طی فصل رشد نشان‌دهنده ثبات بالاتر در اهمیت هستند.

در رهیافت دوم، همین دو مدل، داده‌های عملکرد گندم را کلاس‌بندی کرده و سپس عملکرد دو مدل بر روی نتایج تحلیل شد. در جدول ۴، معیارهای ارزیابی دو مدل در رهیافت اول، قبل و بعد از بهینه‌سازی نشان داده شده‌اند.

بهینه‌سازی مدل رندوم فارست، جذر میانگین مربعات خطا را به مقدار چهار واحد کاهش داد و ضریب همبستگی را به مقدار دو هزارم افزایش داد. بهینه‌سازی مدل ایکس‌جی‌بوست، تمام معیارهای ارزیابی (به جز شاخص توافق ویلموت) را نسبت به مدل بهینه‌نشده، بهبود داد. بنابراین، در ادامه نتایج مربوط به الگوریتم‌های بهینه‌سازی شده (به غیر از رویکرد طبقه‌بندی) آورده می‌شوند.

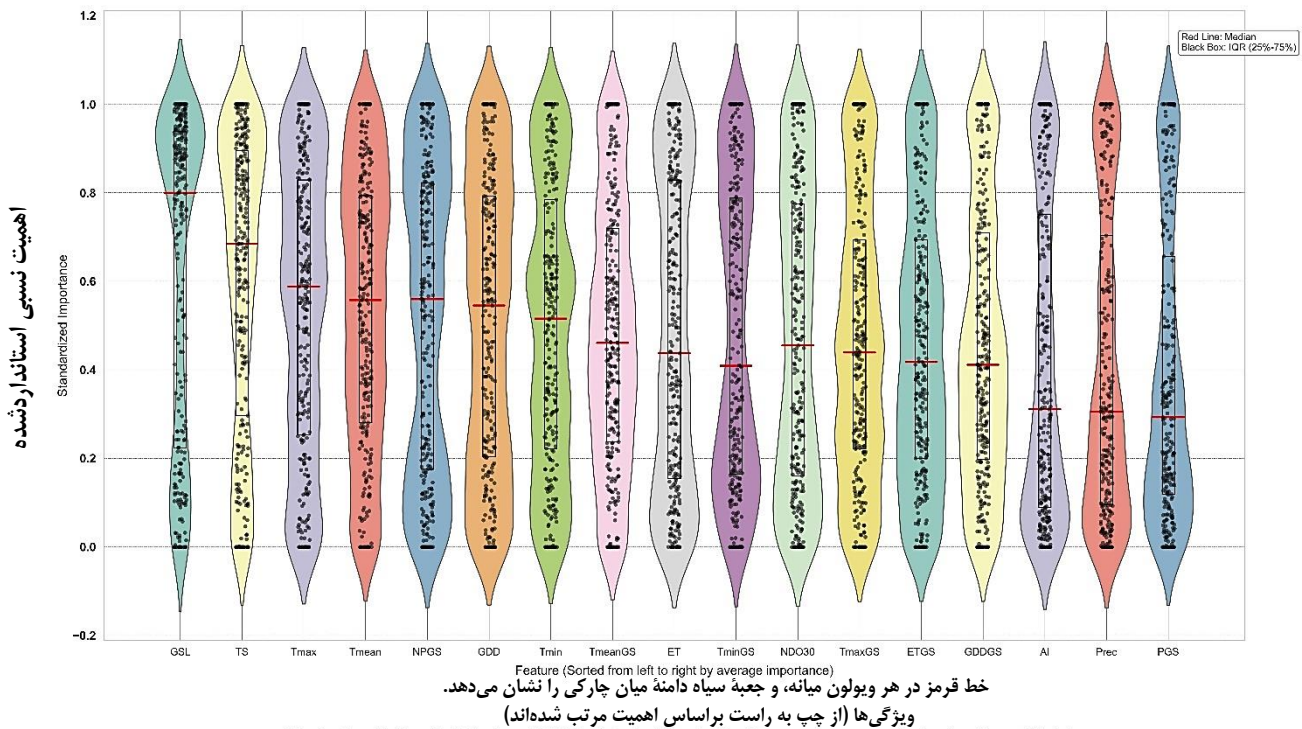
تحلیل ویژگی‌های مؤثر در دو الگوریتم برای شهرستان‌ها

برای درک بهتر از رفتار مدل‌های یادگیری ماشین و بررسی دلایل پیش‌بینی‌های انجام‌شده، نمودارهای شیب یا ویولونی اهمیت ویژگی‌ها (فیچر ایمپورتنس) (شکل ۱ آ و ب)، نمودارهای ضرایب همبستگی بین ۱۰ ویژگی برتر (شکل ۳ آ و ب) برای هر شهرستان به تفکیک و برای هر دو مدل رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست تولید شدند.

توزیع مقادیر شیب (اهمیت نسبی ویژگی‌ها) در مدل رندوم فارست

شکل ۱، توزیع اهمیت استانداردشده ویژگی‌های اقلیمی و فیزیولوژیکی مؤثر بر عملکرد گندم را براساس مدل رندوم فارست نشان می‌دهد. ویژگی‌ها براساس میانگین اهمیت از چپ به راست مرتب شده‌اند و هر نمودار ویولون، تراکم و پراکندگی مقادیر اهمیت را برای یک ویژگی خاص به تصویر می‌کشد. خط قرمز نشان‌دهنده میانه^۱ و جعبه سیاه بیانگر فاصله بین چارک اول و سوم^۲ است. نقاط

1- Median
2- IQR



شکل ۱- نمودارهای ویولونی توزیع مقادیر شیپ (اهمیت ویژگی‌ها) در الگوریتم رندوم فارست جهت پیش‌بینی عملکرد گندم در استان خراسان رضوی. (شرح کامل ویژگی‌ها در جدول ۲ بخش مواد و روش‌ها آورده شده است)

Figure 1- Violin plots of SHAP value distributions (feature importance) in the Random Forest algorithm for predicting wheat yield in Khorasan Razavi province. (A complete description of the features is provided in Table 2 in the materials and methods section)

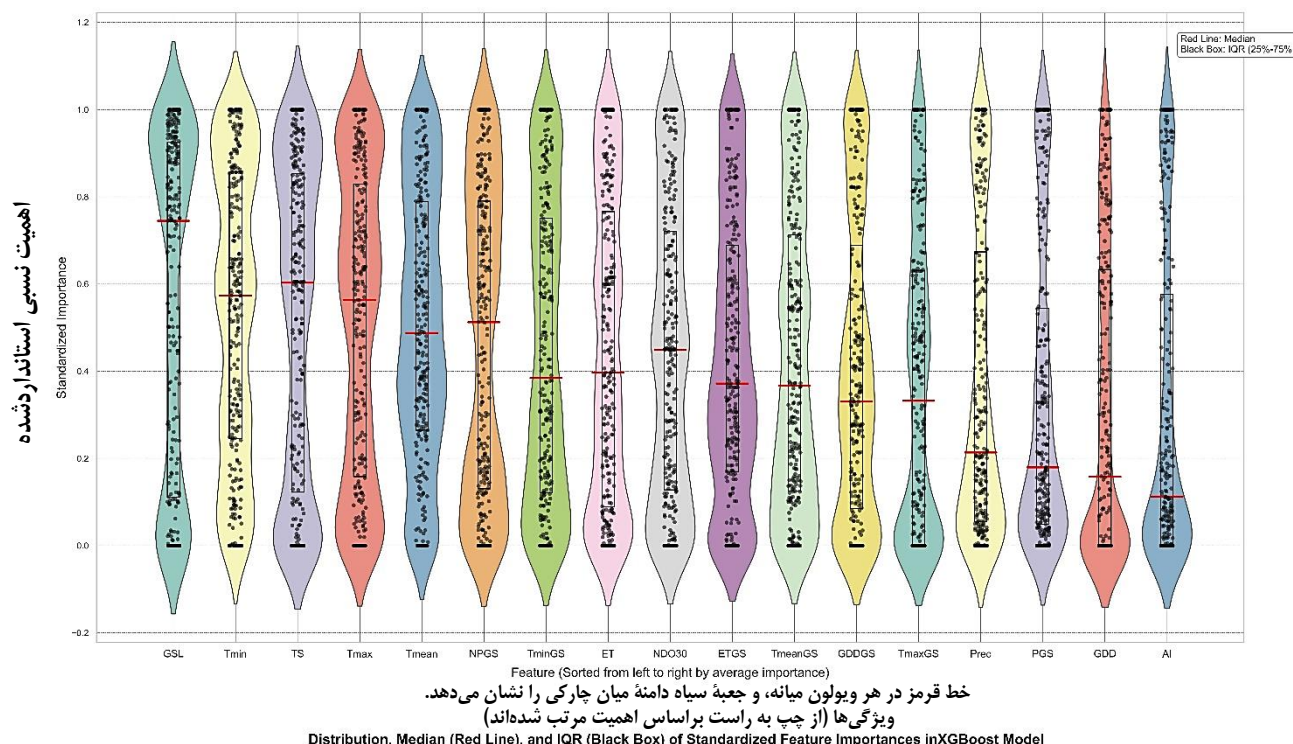
این ویژگی‌ها در بین نمونه‌ها است. این امر می‌تواند حاکی از حساسیت مدل نسبت به شرایط متغیر محیطی یا تعاملات زمانی آن‌ها باشد. مقادیر میانه برای بسیاری از متغیرهایی که در ناحیه وسط نمودار واقع شده‌اند، مثل تبخیر و تعرق طی فصل رشد، دمای میانگین طی فصل رشد یا درجه روز رشد طی فصل رشد نزدیک به ۰/۵ تا ۰/۶ قرار دارد که نشان از نقش میان‌رده آن‌ها در تصمیمات مدل دارد. تحلیل توزیع مقادیر شیپ، می‌تواند به شناسایی عوامل کلیدی تأثیرگذار بر عملکرد گندم در مدل‌های یادگیری ماشین کمک کرده و مبنایی برای تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی‌های زراعی فراهم آورد.

مقایسه مدل رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست در ارزیابی اهمیت ویژگی‌ها

در هر دو مدل، متغیر "طول فصل رشد" بیشترین اهمیت را دارد، که نشان‌دهنده تأثیر کلیدی این متغیر در پیش‌بینی عملکرد گندم است.

توزیع مقادیر شیپ (اهمیت نسبی ویژگی‌ها) در مدل ایکس‌جی‌بوست

شکل ۲، توزیع اهمیت استاندارد شده متغیرها را در مدل ایکس‌جی‌بوست نمایش می‌دهد. در این نمودار نیز مانند شکل قبلی، خط قرمز نشان‌دهنده میانه و جعبه سیاه نشان‌دهنده فاصله بین چارک اول و سوم است. ویژگی‌ها براساس میانگین اهمیت مرتب شده‌اند. متغیرهایی مانند طول فصل رشد، دمای کمینه روزانه، شدت فصلی بودن درجه حرارت و دمای بیشینه روزانه در سمت چپ نمودار و دارای بیشترین اهمیت میانگین هستند، به‌ویژه متغیر طول فصل رشد مجدداً بالاترین سطح اهمیت را نشان می‌دهد، با توزیع متراکم در نواحی بالای محور، که نشان از تأثیر پایدار آن در بین نمونه‌های مختلف دارد. متغیرهایی نظیر شاخص خشکی، درجه روز رشد و بارندگی طی فصل رشد در سمت راست قرار دارند و با تمرکز داده‌ها در بخش‌های پایین‌تر، از نظر مدل اهمیت نسبتاً کمی دارند. در برخی متغیرها مانند دمای کمینه طی فصل رشد، تبخیر و تعرق یا تعداد روزهای با دمای بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، پراکنش عمودی قابل توجه نقاط درون نمودار ویولن، بیانگر نوسانات بالای اهمیت



شکل ۲- نمودارهای شیب یا ویولونی اهمیت ویژگی‌های به کار گرفته شده در مدل ایکس‌جی‌بوست جهت پیش‌بینی عملکرد گندم در استان خراسان رضوی (شرح کامل ویژگی‌ها در جدول ۲ بخش مواد و روش‌ها آورده شده است)

Figure 2- Violin plots of SHAP value distributions (feature importance) in the XGBoost algorithm for predicting wheat yield in Khorasan Razavi province. (A complete description of the features is provided in Table 2 in the Materials and Methods section)

حرارت و دمای کمینه روزانه، دمای میانگین روزانه و طول فصل رشد اهمیت و تأثیر زیادی در پیش‌بینی‌های کلیه شهرستان‌ها دارد، درحالی‌که ویژگی‌ای مانند شاخص خشکسالی اهمیت و تأثیر کمتری دارند (در هر دو مدل). به نظر می‌رسد که ویژگی شدت فصلی بودن درجه حرارت، شاید به دلیل ارتباط قوی‌ای که با شرایط آب‌وهوایی یا ویژگی‌های محیطی دارد، تأثیر بیشتری در پیش‌بینی‌ها داشته باشد. از سوی دیگر، اهمیت کمتر ویژگی شاخص خشکسالی، احتمالاً به علت نزدیک بودن مقدار عددی آن برای تمام شهرستان‌ها به دلیل واقع شدن در گستره‌ای بزرگ‌تر از یک منطقه خشک و نیمه‌خشک است. به کمک نمودارهای شیب (اهمیت ویژگی‌ها) می‌توان نسبت به شناسایی و تعیین اولویت متغیرهای اقلیمی و زراعی و در ادامه برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری اقدام نمود.

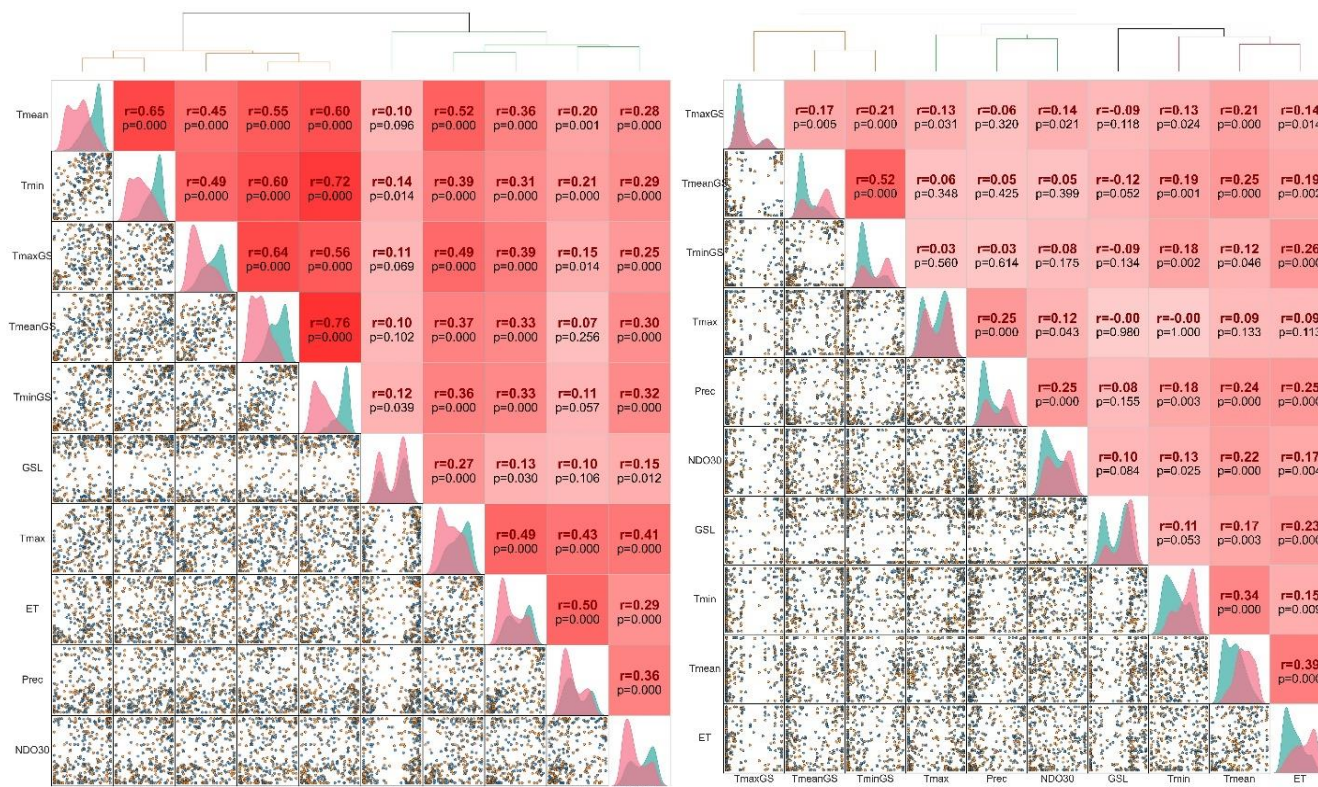
برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه با استفاده از روش جنگل تصادفی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک در منطقه آذربایجان شرقی نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی نسبت به روش‌های تجربی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، عملکرد بهتری داشت (Monavar Sabegh, Zare Haghi, Samadianfard, Neishabouri, & Mikaeili, 2023).

- در مدل رندوم‌فارست، متغیر دمای بیشینه روزانه نیز در میان متغیرهای بسیار مهم قرار داشت، اما در مدل ایکس‌جی‌بوست به جایگاه پایین‌تری سقوط کرد، درحالی‌که دمای کمینه روزانه نقش مهم‌تری در مدل ایکس‌جی‌بوست ایفا می‌کند.
 - مدل ایکس‌جی‌بوست تنوع بیشتری در پراکندگی اهمیت ویژگی‌ها نشان می‌دهد، به‌ویژه در متغیرهای با اهمیت میانه، که می‌تواند نشانگر قدرت تفکیک دقیق‌تر این مدل در شرایط پیچیده‌تر باشد.
 - مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که مدل رندوم‌فارست اهمیت نسبتاً متوازنی برای متغیرها در نظر گرفته، درحالی‌که مدل ایکس‌جی‌بوست تفاوت‌های بیشتری در اهمیت ویژگی‌ها قائل شده و نسبت به برخی متغیرهای خاص، حساسیت و تمایز بالاتری نشان داده است، به عبارت دیگر، تفکیک دقیق‌تری بین متغیرهای با اهمیت بالا و پایین ایجاد کرده است.
- اهمیت هر ویژگی در مدل نشان می‌دهد که مدل چقدر به آن ویژگی برای پیش‌بینی‌ها اعتماد کرده است. به عبارت دیگر، این ویژگی‌ها تأثیر زیادی بر پیش‌بینی‌ها دارند و بر توان و دقت مدل‌های مختلف تأثیرگذار هستند. برای مثال، ویژگی شدت فصلی بودن درجه

ضرب همبستگی بین ویژگی‌های با اهمیت نسبی بالا در دو مدل

شکل ۳، ماتریس همبستگی ۱۰ ویژگی برتر انتخاب شده توسط الگوریتم رندوم فارست را برای تمام شهرستان‌ها نشان می‌دهد و با بهره‌گیری از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، ویژگی‌های مشابه را در کنار هم قرار داده است. این شکل نشان می‌دهد که بین دمای بیشینه طی فصل رشد، دمای میانگین طی فصل رشد، دمای میانگین روزانه و دمای کمینه روزانه همبستگی‌های مثبت و نسبتاً قوی وجود

دارد. به‌ویژه بیشترین ضریب همبستگی بین دمای میانگین طی فصل رشد و دمای کمینه طی فصل رشد مشاهده شد ($r = 0.76, p < 0.001$)، و پس از آن، رابطه بین دمای کمینه روزانه و دمای کمینه فصل رشد با ضریب $r = 0.72$ قرار دارد. خوشه‌بندی ویژگی‌ها نشان می‌دهد که دمای میانگین طی فصل رشد، دمای بیشینه طی فصل رشد و دمای کمینه طی فصل رشد در یک خوشه، و دما کمینه روزانه و دمای میانگین روزانه در خوشه‌ای مجزا قرار گرفته‌اند که بیانگر تفاوت در الگوهای هم‌تغییری آن‌ها است.



RF Model Top 10 Features - Correlation, Distribution and Clustering

XGBoost Model Top 10 Features - Correlation, Distribution and Clustering

شکل ۳- ضرایب همبستگی، پی ویو و توزیع چگالی و خوشه‌بندی ۱۰ ویژگی برتر مؤثر بر عملکرد گندم در استان خراسان رضوی در دو الگوریتم رندوم فارست (سمت چپ) و ایکس جی بوست (سمت راست). (شرح کامل ویژگی‌ها در جدول ۲ بخش مواد و روش‌ها آورده شده است)

Figure 3- Correlation coefficients, p-values, density distributions, and clustering of the top ten most influential features on wheat yield in Khorasan Razavi province using the Random Forest algorithm (left) and XGBoost algorithm (right). (A complete description of the features is provided in table 2 in the materials and methods section)

همبستگی قابل توجه مربوط به رابطه بین تبخیر و تعرق طی فصل رشد و دمای میانگین روزانه بود ($r = 0.39, p < 0.01$) که از نظر فیزیولوژیکی نیز قابل پیش‌بینی است.

همچنین دمای کمینه روزانه در هر دو مدل، همبستگی بالایی با سایر متغیرهای دمایی نشان داد؛ موضوعی که بر نقش کلیدی این متغیر در عملکرد مدل‌ها دلالت دارد. با توجه به این یافته‌ها، توجه به دمای کمینه روزانه در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت زراعی

در مدل ایکس جی بوست، بالاترین ضریب همبستگی میان دو ویژگی دمای کمینه طی فصل رشد و دمای میانگین طی فصل رشد مشاهده شد ($r = 0.52, p < 0.01$). این رابطه پیش‌تر در مدل رندوم فارست نیز به دست آمده بود، اما با شدت بیشتری ($r = 0.72, p < 0.01$). در میان سایر متغیرهای دمایی در مدل ایکس جی بوست، همبستگی مثبت و نسبتاً قوی بین دمای میانگین روزانه و دمای کمینه روزانه دیده شد ($r = 0.34, p < 0.01$). دومین ضریب

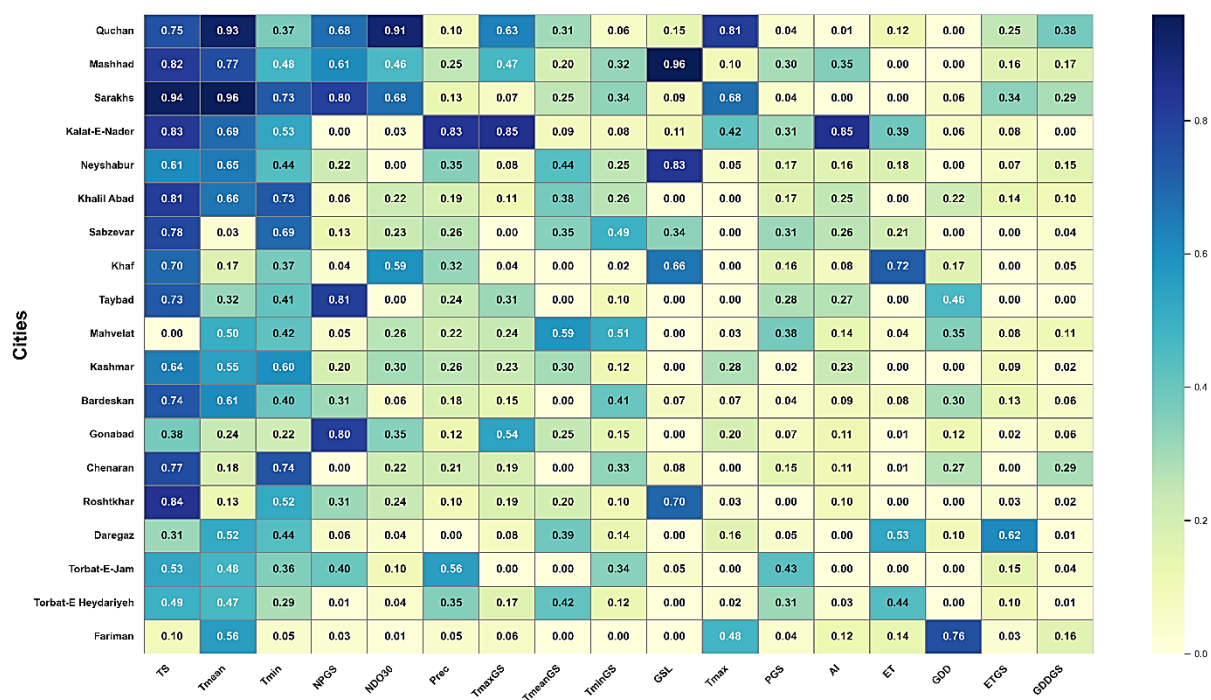
گندم آبی در استان خراسان اهمیت ویژه‌ای دارد.

دمای بیشینه روزانه، شدت فصلی بودن درجه حرارت و تعداد دفعات وقوع بارندگی طی فصل رشد. پنج ویژگی برتر در مدل ایکس‌جی‌بوست به شرح زیر بودند: دمای کمینه روزانه، تعداد دفعات وقوع بارندگی طی فصل رشد، بارندگی طی فصل رشد و دمای بیشینه طی فصل رشد.

در پهنه‌بندی احتمال رخداد بیماری فوزاریوم گندم با استفاده از روش جنگل تصادفی و داده‌های حاصل از اینترنت اشیاء، پنج شاخص با درجه اهمیت نسبی زیاد تشخیص داده شدند (مثل تعداد ساعت‌هایی که دما بین ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بیشتر از ۸۰ درصد است). نتایج ارزیابی این مدل حاکی از کارایی آن در پیش‌بینی بیماری فوزاریوم گندم بود (Khodabandehloo, Azadbakht, Radiom, Ashourloo, & Alimohammadi, 2021).

اهمیت نسبی ویژگی‌های مورد استفاده در هر الگوریتم در پیش‌بینی عملکرد گندم

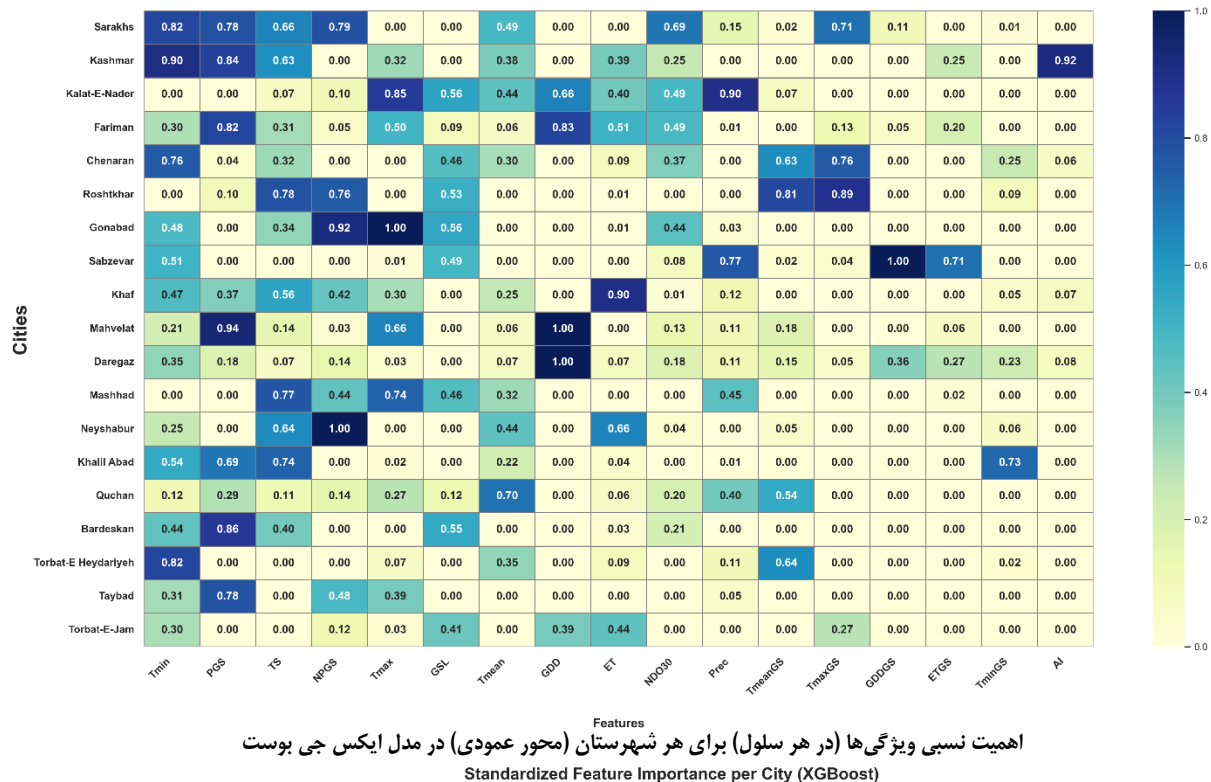
به منظور تحلیل عمیق‌تر و مختص هر شهرستان، ویژگی‌های تأثیرگذار در پیش‌بینی عملکرد گندم به ترتیب اولویت آن‌ها در هر شهرستان، برای هر دو مدل در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. داده‌های این شکل‌ها مقایسه بین شهرستان‌ها و شناسایی ویژگی‌های مشترک و همچنین ویژگی‌های ایجادکننده تفاوت را ممکن می‌سازد. این ویژگی‌ها در مدل‌های مختلف تأثیرگذار هستند و به میزان زیادی پیش‌بینی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در رندوم‌فارست، پنج ویژگی مهم به ترتیب عبارت بودند از: دمای میانگین روزانه، تعداد روزهای با دمای بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد،



اهمیت نسبی ویژگی‌ها (در هر سلول) برای هر شهرستان (محور عمودی) در مدل رندوم فارست
Standardized Feature Importance per City (Random Forest)

شکل ۴- اهمیت نسبی ویژگی‌های مؤثر بر پیش‌بینی عملکرد گندم در هر شهرستان توسط مدل رندوم‌فارست (بر مبنای داده‌های استاندارد شده).
(شرح کامل ویژگی‌ها در جدول ۲ بخش مواد و روش‌ها آورده شده است)

Figure 4- Relative importance of features influencing wheat yield prediction in each county using the Random Forest model (based on standardized data). (A complete description of the features is provided in Table 2 in the Materials and Methods section)



اهمیت نسبی ویژگی‌ها (در هر سلول) برای هر شهرستان (محور عمودی) در مدل ایکس جی بوست
Standardized Feature Importance per City (XGBoost)

شکل ۵- اهمیت نسبی ویژگی‌های مؤثر بر پیش‌بینی عملکرد گندم در هر شهرستان توسط مدل ایکس جی بوست (بر مبنای داده‌های استاندارد شده). (شرح کامل ویژگی‌ها در جدول ۲ بخش مواد و روش‌ها آورده شده است)

Figure 5- Relative importance of features influencing wheat yield prediction in each county using the XGBoost model (based on standardized data). (A complete description of the features is provided in Table 2 in the Materials and Methods section)

پس نمی‌توان یک درخت واحد را به‌عنوان "درخت نهایی" انتخاب کرد، چون همه درخت‌ها در کنار هم نتیجه کلی را تعیین می‌کنند. بنابراین، در مواقعی که نیاز باشد تصویری از ساختار تصمیم‌گیری درخت‌ها ارائه گردد، معمولاً تصویر درخت‌های فردی (برای یک درخت واحد) نمایش داده می‌شود، زیرا نمایش همه درخت‌ها به‌طور مستقیم از طریق یک نمودار دشوار و بی‌معنا می‌شود. (اگر تعداد درخت‌ها زیاد باشد و در حال بررسی آخرین درخت، یک ساختار درختی ناقص یا خیلی ساده در خروجی دیده شود، دلیل آن ممکن است این باشد که آن درخت به‌دلیل نمونه‌گیری تصادفی، اطلاعات مفیدی تولید نکرده باشد. درخت‌های رندوم‌فارست برخلاف درخت‌های تصمیم منفرد، ممکن است به‌دلیل نمونه‌گیری تصادفی ویژگی‌ها^۳ در برخی درخت‌ها مسیرهای خیلی کوتاه ایجاد کنند، مثلاً حالتی که در یک درخت، فقط یک یا دو ویژگی مؤثر بوده‌اند و بقیه مسیر تقسیم ساخته نشده باشد). حالت دیگر، برگ نهایی زودرس^۴ نامیده می‌شود به این معنی که در بعضی درخت‌ها (به‌ویژه در رندوم‌فارست) ممکن است برخی گره‌ها زودتر به برگ تبدیل شوند،

تحلیل بصری ویژگی‌های مؤثر مدل‌ها در سطح شهرستان‌ها برای کلیه شهرستان‌ها نمودارهای ساختار درختی، شیب، فایل‌های پی‌کی‌آل و معیارهای ارزیابی دقت مدل پیش‌بینی‌کننده محاسبه و تولید شدند. به‌دلیل تعداد زیاد این نمودارها، در اینجا تنها به ارائه نمودارهای مربوط به شهرستان مشهد به‌عنوان نمونه اکتفا می‌شود.

مصورسازی ساختار درختی^۱ مدل ایکس جی بوست و رندوم‌فارست برای شهرستان مشهد

در مدل‌های رندوم‌فارست به‌دلیل اینکه چندین درخت تصمیم^۲ به‌طور همزمان برای پیش‌بینی ساخته می‌شوند و نیز هر درخت تصمیمات را به‌طور مستقل براساس ویژگی‌های داده‌ها می‌گیرد، بنابراین نتیجه‌گیری‌های مدل، تجمعی از همه درخت‌ها است، نه یک درخت واحد. به عبارت دیگر، درخت‌های مدل به‌طور تصادفی ساخته می‌شوند و با ایجاد تنوع، قدرت پیش‌بینی مدل بیشتر می‌شود،

3- Feature bagging
4- Early Leaf Node

1 Tree Visualization
2 decision trees

مدل به‌صورت تجمیعی از تمام درخت‌ها حاصل می‌شود، اما نمایش درخت نهایی می‌تواند دید مناسبی از مسیرهای تصمیم‌گیری مدل نسبت به متغیرهای ورودی فراهم کند (مانند آستانه‌های بحرانی و اثرات متقابل ویژگی‌ها). در مدل رندوم‌فارست، متغیر تعداد دفعات وقوع بارندگی طی فصل رشد، نقش اساسی در پیش‌بینی عملکرد گندم دارد. در مدل رندوم‌فارست، متغیر دوم باز هم ماهیت رطوبتی دارد (تبخیر و تعرق طی فصل رشد).

در مدل ایکس‌جی‌بوست، متغیر دمای کمینه روزانه اولین متغیر تفکیک‌کننده بوده که دارای بالاترین میزان $gini$ یا برتری است و نقش اساسی در کاهش خطای مدل ایفا می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که در چارچوب این مدل، دما نقش محوری در پیش‌بینی عملکرد گندم داشته است. ویژگی دوم در مدل ایکس‌جی‌بوست، دوباره همان متغیر دمایی است (دمای میانگین روزانه).

رفتار مدل در تفکیک داده‌ها: در مدل رندوم‌فارست، از نه نمونه، هشت نمونه (یعنی $8/8$ درصد) به شاخه دوم منتقل می‌شوند و سپس دو و شش نمونه به برگ‌های بعدی و در نهایت یک نمونه در برگ نهایی باقی می‌ماند، یعنی مدل در تقسیم‌های عمیق‌تر فقط روی نمونه‌های کمتری تمرکز کرده است. این موضوع گاهی به بیش‌برازش^۶ رندوم‌فارست منجر می‌شود. در مقابل، مدل ایکس‌جی‌بوست با پوشش یکنواخت‌تر و تقسیم‌بندی‌های هدفمندتر، متغیرهایی مانند دمای کمینه روزانه، دمای میانگین روزانه و طول فصل رشد را به کار گرفته که هم متنوع‌تر هستند و هم هر یک براساس مقدار $gini$ ، سهم مشخصی در کاهش خطای کلی داشته‌اند. ساختار مدل، تعداد و مقدار برگ و تفسیر عملکرد: در رندوم‌فارست، مقدار نهایی معادل $4294/5$ واحد عملکرد گندم (کیلوگرم در هکتار) برای یک نمونه خاص است. در ایکس‌جی‌بوست، مقدار نهایی در برگ‌ها معمولاً مقدار اصلاح‌شده یا باقی‌مانده است، نه مقدار نهایی عملکرد. این موضوع باعث می‌شود که تفسیر مستقیم خروجی درخت سخت‌تر باشد، ولی مدل دقت بیشتری در مجموع خواهد داشت، چراکه این مقادیر به‌صورت تجمعی در بوسترها لحاظ می‌شوند. در مدل رندوم‌فارست ساختار ساده‌تر و تفسیر مستقیم‌تری ارائه می‌شود، ولی با خطر بیش‌برازش در برگ‌هایی با تعداد کم مواجه است. اگرچه مدل ایکس‌جی‌بوست پیچیده‌تر به نظر می‌رسد و معمولاً عمق بیشتری در شاخه‌های مرتبط با ویژگی‌ها ایجاد می‌کند، اما تقسیم‌بندی‌های آن براساس کاهش خطای مؤثرتر، بهره‌گیری از متغیرهای متنوع و مشارکت تدریجی در تقویت مدل نهایی، قدرت بیشتری در مدل‌سازی دارد.

زیرا همه نمونه‌ها در آن گره از یک کلاس هستند، یا به حداقل تعداد نمونه برای تقسیم^۱ یا حداقل نمونه برای برگ^۲ رسیده‌اند. در این صورت، آن گره دیگر تقسیم نمی‌شود، و به‌صورت برگ (حتی در عمق کم) باقی می‌ماند. این موضوع طبیعی و بخشی از فرآیند یادگیری درخت است. راه حل این مشکل، استفاده از نمودارهای اهمیت ویژگی^۳ است که می‌توانند به‌صورت گرافیکی تأثیر هر ویژگی بر پیش‌بینی مدل را نشان دهند (شکل ۷). با این حال، برخی محققان پیشنهاد کرده‌اند که نمایش آخرین درخت نیز به دلیل ارائه اطلاعات و ویژگی‌های نهایی شناسایی‌شده، می‌تواند مفید باشد (شکل ۸).

در مدل ایکس‌جی‌بوست، چون درخت‌ها را به‌طور تدریجی و گام‌به‌گام اضافه می‌کند، اولین درخت، بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی‌های مدل دارد، زیرا بقیه درخت‌ها در مسیر اصلاح خطاهای قبلی عمل می‌کنند. مفهوم بوستینگ^۴ در ایکس‌جی‌بوست و دیگر مدل‌های مبتنی بر بوستینگ، به همین مفهوم اشاره دارد، یعنی مدل به‌تدریج (درخت به درخت) یاد می‌گیرد و درخت‌های بعدی بیشتر به اصلاح پیش‌بینی‌های غلط (خطا) در درخت‌های قبلی می‌پردازند. درخت‌های ابتدایی (از نظر رتبه) اطلاعات بیشتری ارائه می‌دهند. درخت اول اطلاعات اولیه‌ای از روابط پیچیده داده‌ها به مدل می‌دهد و می‌توان آن را به‌صورت بصری بررسی کرد. بنابراین، مزایای نمایش اولین درخت در ایکس‌جی‌بوست به‌شرح زیر هستند: نمایش ساده‌تر و قابل درک‌تر از تصمیمات مدل، به‌خصوص درخت اول که بیشترین تغییر را ایجاد می‌کند؛ می‌تواند به‌عنوان یک نقطه شروع خوب برای توضیح مدل و نحوه تصمیم‌گیری‌های اولیه باشد؛ به‌ویژه برای درک ویژگی‌های کلیدی که در درخت اول مورد توجه قرار گرفته‌اند، می‌تواند مفید باشد.

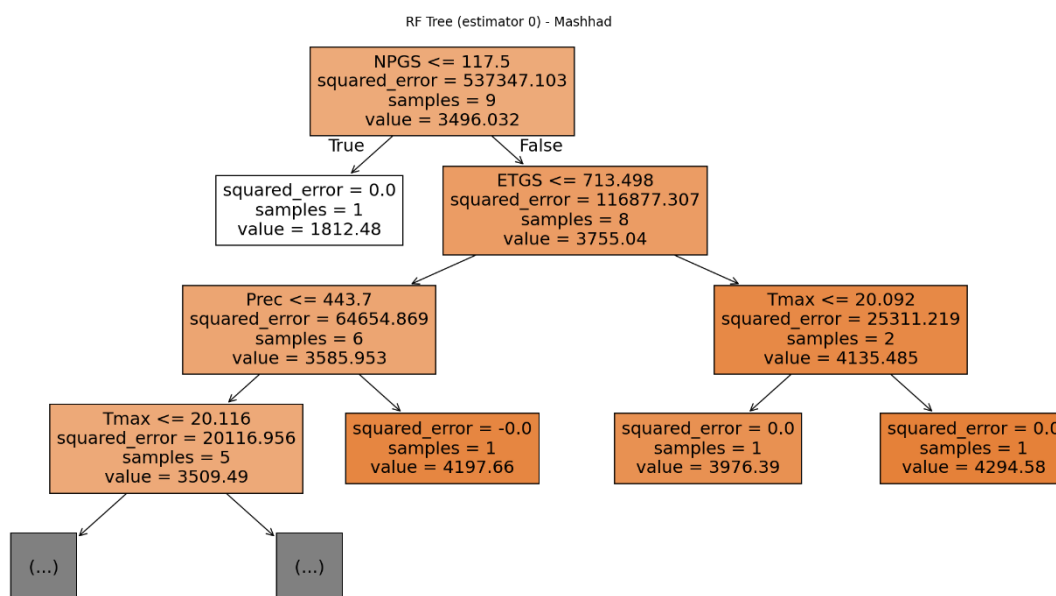
در نمودارهای درختی نهایی، ساختار تصمیم‌گیری مدل‌ها براساس شاخص‌های اصلی، از جمله ویژگی‌هایی نظیر میزان بارندگی، دمای هوا، تاریخ کاشت، و غیره نمایش داده شده است. مدل ایکس‌جی‌بوست و رندوم‌فارست هر دو درخت‌هایی با ساختار نسبتاً ساده برای شهرستان مشهد تولید کردند، ایکس‌جی‌بوست با چهار سطح و رندوم‌فارست با چهار سطح (شکل ۶ آ و ۶ ب)، اما تفاوت‌هایی اساسی در روش شناختی، ساختار و نوع متغیرهای به‌کاررفته و نحوه تقسیم نمونه‌ها دارند که عبارتند از:

متغیرهای تأثیرگذار اولیه: به‌منظور درک ساختار تصمیم‌گیری مدل رندوم‌فارست، درخت نهایی از میان درخت‌های ساخته‌شده در مدل بهینه‌شده برای هر شهرستان ترسیم شد. هرچند تصمیم نهایی

- 1- Min_samples_split
- 2- Min_samples_leaf
- 3- Importances of Features
- 4- Boosting

5 Gain

6- Overfitting



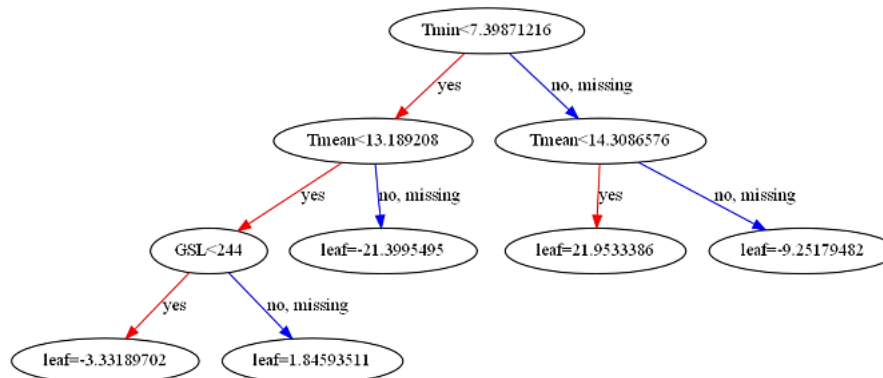
شکل ۶a- آخرین نمودار درختی تولیدشده توسط مدل رندوم فارست برای شهرستان مشهد

Figure 6A- The final decision tree generated by the Random Forest model for Mashhad County

NPGS: تعداد دفعات وقوع بارندگی طی فصل رشد، ETGS: تبخیر و تعرق طی فصل رشد، PREC: بارندگی، Tmax: دمای بیشینه روزانه

NPGS: Number of rainy days during the growing season, ETGS: evapotranspiration during the growing season, PREC: precipitation, () and Tmax: daily maximum temperature

XGBoost Tree 0 - Mashhad



شکل ۶b- اولین ساختار درختی تولیدشده توسط مدل ایکس جی بوست برای شهرستان مشهد

Figure 6B- The first tree structure generated by the XGBoost model for Mashhad County

Tmin: دمای کمینه روزانه، Tmean: دمای میانگین روزانه، GSL: طول فصل رشد

Tmin: Daily minimum temperature, Tmean: average daily temperature, and GSL: growing season length

مدل‌های خطی سنتی برآورد می‌کند (Everingham, Sexton, Skocaj, & Inman-Bamber, 2016).

به‌طور کلی، ساختارهای درختی بر قابلیت تحلیل و تفسیر نتایج مدل‌ها بسیار تأثیرگذار هستند و می‌توانند در مطالعات آینده برای شفاف‌سازی تصمیم‌های مدل به کار روند.

در نهایت، بسته به هدف مطالعه (تفسیر یا دقت پیش‌بینی)، هر یک از دو مدل مزایای خاص خود را دارند، ولی برای مدل‌سازی دقیق‌تر و شناسایی متغیرهای تأثیرگذار کلیدی، تفسیرهای ایکس جی بوست می‌توانند اطلاعات عمیق‌تری فراهم می‌کنند. گزارش شده است که رندوم فارست عملکرد نیشکر را بهتر از

تحلیل نمودارهای اهمیت نسبی ویژگی‌ها (نمودارهای شیب ویولونی) مدل رندوم‌فارست برای شهرستان مشهد

در مدل رندوم‌فارست برای شهرستان مشهد، ویژگی‌هایی که بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی عملکرد گندم دارند به ترتیب از بیشترین اهمیت به کمترین اهمیت عبارتند از:

۱. T_{min} : دمای حداقل شبانه نقش مهمی در شدت تنفس

نگهداری، تسهیم و توزیع فرآورده‌های فتوسنتزی تولیدشده طی مرحله روشنائی، تعادل هورمونی و غیره دارد. در دوره‌های شبانه، دمای پایین‌تر می‌تواند شدت تنفس را کاهش داده و سبب ذخیره بیشتر انرژی در گیاه شود (Hatfield & Prueger, 2015).

۲. TS : این ویژگی دومین رتبه اهمیت را در بین ویژگی‌ها داشت و تأثیر بسزایی در پیش‌بینی‌ها دارد. همچنین نقش برجسته‌ای در تغییرات دمایی و تنش دمایی (در طول فصل رشد گندم) دارد.

۳. T_{meanGS} : میانگین دمایی مطلوب سبب تعادل بین فتوسنتز و تنفس شده و به رشد بهینه کمک می‌کند (Asseng et al., 2015).

۴. T_{minGS} : دماهای پایین‌تر می‌تواند تأثیر منفی بر جوانه‌زنی و مراحل اولیه رشد داشته باشند، ولی در مواردی نیز از تنش گرمایی جلوگیری می‌کنند.

۵. PGS : مقدار بارندگی در طول فصل رشد رتبه پنجم اهمیت در بین ویژگی‌های مورد بررسی را به خود اختصاص داد. تأمین آب کافی و منظم در دوره رشد برای تأمین آب و جذب عناصر غذایی حیاتی است (Si, Qin, Liang, Duan, & Gao, 2023).

۶. $NPGS$: توزیع زمانی بارش حتی مهم‌تر از مقدار آن است، زیرا دفعات بارندگی در تثبیت ظرفیت ذخیره رطوبت در خاک نقش کلیدی دارد.

۷. GDD : این شاخص، جمع دماهای مفید برای رشد است و با مراحل فنولوژیک گیاه ارتباط مستقیم دارد (Vieira, Bradford, Osterholzer, Pierce, & Cockrell, et al., 2025).

۸. $Prec$: بارش‌ها بر آب‌رسانی به گیاه و تأثیر مستقیم بر فرآیندهای رشدونمو و در نهایت تعیین میزان عملکرد نهایی تأثیر مستقیم دارند. تأمین نیاز آبی گیاه، بر مراحل حساس رشد از جمله خوشه‌دهی و پر شدن دانه تأثیر می‌گذارد. یافته‌ها تأکید می‌کنند که حتی در شرایط آبیاری، مدیریت مناسب زمان‌بندی و میزان آبیاری (بارندگی) برای بهینه‌سازی جذب عناصر غذایی و افزایش عملکرد گندم ضروری است (Wang

(Li, 2002).

۹. T_{mean} : دمای میانگین روزانه در طول دوره رشد تأثیر زیادی بر عملکرد گندم دارد. این ویژگی به‌ویژه در نواحی با تغییرات دمایی زیاد مهم است.

۱۰. $NDO30$: تعداد روزهایی که دما بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد است، نشان‌دهنده شرایط دمایی بحرانی برای گیاه می‌باشد (Farhadi et al., 2024).

۱۱. T_{max} : افزایش بیش از حد این دما، فرآیند فتوسنتز را مختل و تعرق را تشدید می‌کند که منجر به افت عملکرد می‌شود.

۱۲. $ETGS$: یکی از شاخص‌های کلیدی روابط آبی بوده که ارتباط نزدیکی با نیاز آبی گیاه دارد.

۱۳. AI : شاخص خشکی، بر عملکرد تأثیر منفی داشته است که این موضوع بسیار بدیهی است و توسط متخصصان کشاورزی برای ارزیابی شرایط عمومی یک ناحیه برای فعالیت‌های کشاورزی استفاده می‌شود.

۱۴. T_{maxGS} : باعث بروز تنش گرمایی در طول فصل رشد شده و رشد سلولی و پر شدن دانه را مختل می‌کند.

۱۵. ET : این شاخص در مناطق گرم و خشک، معیار مناسبی برای بررسی شدت نیاز آبی و خطر تنش خشکی است.

۱۶. $GDDGS$: مشابه GDD ، این ویژگی در تحلیل مراحل نموی از نظر زمان وقوع و طول دوره هر مرحله نموی عامل تعیین‌کننده‌ای به شمار می‌رود، به‌طور خاص نشان‌دهنده تأثیر گرمای تجمعی در فصل رشد بر پیشرفت فنولوژیک است.

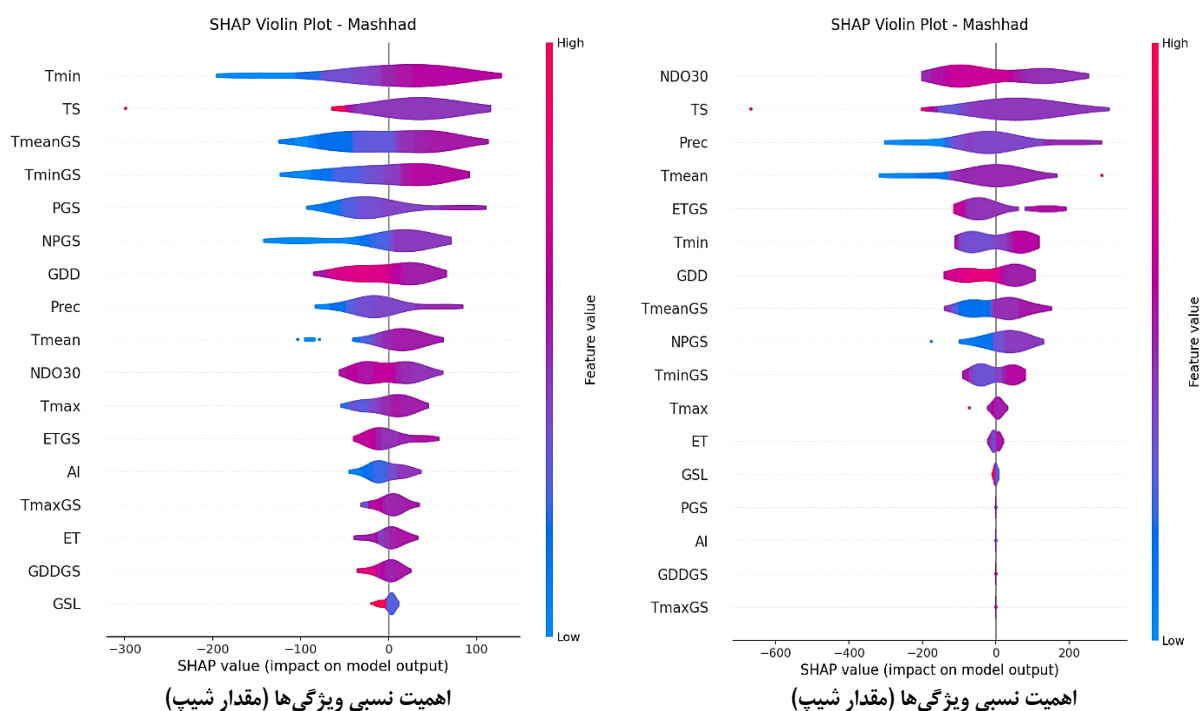
۱۷. GSL : رابطه مستقیمی با فرصت زمانی برای فتوسنتز و پر شدن دانه دارد؛ طولانی‌تر بودن این فصل معمولاً عملکرد بالاتر را سبب می‌شود.

ویژگی‌های با رتبه‌های یک تا پنج، به‌ویژه در مناطق با تغییرات دمایی زیاد، شرایط رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و مدل به‌خوبی اهمیت آن‌ها را پیش‌بینی کرده است (Taiz, Zeiger, Moller, & Murphy, 2018; Slafer, Savin, Sadras, & Calderini, 2023). نتایج مشابه با نتایج مطالعه حاضر توسط سلیمان نژاد (2018) گزارش شده است مبنی بر اینکه الگوریتم ناپارامتریک رندوم‌فارست روش مناسبی در برآورد مشخصه‌های سه مقطع، تاج‌پوشش و تراکم جنگل‌های زاگرس با استفاده از تصاویر OLI ماهواره لندست بود. در پژوهشی که با دو رهیافت ارزیابی میدانی و سنجش از دور انجام گرفت، بین نتایج حاصل از به‌کارگیری دو مدل رگرسیون خطی چندگانه و جنگل تصادفی در پیش‌بینی نیتروژن کل خاک (به عنوان مدل میدانی)، و سنجش از دور اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (Sadeghi & Ahmadi Nadoushan, 2021).

تشخیص داده شد. در رتبه دوم شدت فصلی بودن درجه حرارت، در رتبه سوم بارندگی و در رتبه چهارم مشابه با مدل رندوم فارست، متغیر دمایی میانگین روزانه (در رندوم فارست دمای میانگین طی فصل رشد است) قرار گرفت. این ویژگی‌ها ارتباط مستقیمی با رشد گیاهان به‌ویژه در مناطق گرم و خشک دارند و به همین دلیل در مدل ایکس‌جی‌بوست، به‌خصوص در مناطقی که گندم به‌میزان بیشتری تحت تأثیر گرما و خشکی که به‌طور مستقیم رشد و فیزیولوژی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند.

تحلیل نمودارهای اهمیت نسبی ویژگی‌ها (نمودارهای شیب ویولونی) مدل ایکس‌جی‌بوست برای شهرستان مشهد

داده‌های حاصل از مدل ایکس‌جی‌بوست برای شهرستان مشهد، ترتیب اهمیت متغیرها را متفاوت با مدل رندوم فارست نشان داد، با بیان این نکته مهم که در عین حال یک متغیر مهم این مدل در گروه پنج متغیری مهم مدل رندوم فارست نیز حضور دارند (به عبارت دیگر، اهمیت نسبی شدت فصلی بودن درجه حرارت را به‌خوبی تشخیص داده است) (شکل ۷). در این مدل، اولین و مهم‌ترین ویژگی، تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۷- نمودارهای شیب (ویولونی) اهمیت نسبی ویژگی‌ها در مدل‌های بهینه‌شده رندوم فارست (سمت چپ) و ایکس‌جی‌بوست (سمت راست) در پیش‌بینی عملکرد گندم در شهرستان مشهد. (شرح کامل ویژگی‌ها در جدول ۲ بخش مواد و روش‌ها آورده شده است)

Figure 7- SHAP (violin) plots of the relative importance of features in the optimized Random Forest model (left) and XGBoost model (right) for predicting wheat yield in Mashhad County. (A complete description of the features is provided in Table 2 in the Materials and Methods section)

بارندگی در مدل ایکس‌جی‌بوست، می‌تواند نقش تعیین‌کننده عوامل دمایی مشترک در هر دو مدل را تحت‌الشعاع قرار دهد. به عبارت دیگر، عدم قطعیت موجود در مدل‌ها و تفاوت شرایط واقعی با آنچه که در تئوری فرض می‌شود، در نظر گرفته شود و توجه داشت که معنی‌داری آماری، و معنی‌داری بیولوژیکی دو مفهوم کاملاً متفاوت هستند.

بارندگی در هر دو مدل اهمیت دارد، اما در جایی که این ویژگی به‌عنوان یک عامل کلیدی در پیش‌بینی‌ها دیده شود، تأثیرات آن در مدل ایکس‌جی‌بوست ممکن است بیشتر از مدل رندوم فارست باشد.

نکته قابل توجه اینکه در هر دو مدل، متغیرهای با ماهیت دمایی حائز بیشترین اهمیت نسبی تشخیص داده شده‌اند. ویژگی‌های بعدی (از رتبه دهم تا هفدهم) نسبت به مدل رندوم فارست، اهمیت بسیار کمتری را به خود اختصاص داده‌اند. در تحلیل و تفسیر نتایج این چینی، باید دقت شود تا از دلیل تراشی بی‌مورد و توجیه‌های غیرمنطقی پرهیز گردد. برای مثال، اهمیت عامل بارندگی، در مدل ایکس‌جی‌بوست در رتبه سوم تعیین شده است. همین متغیر، در مدل رندوم فارست در رتبه هشتم قرار گرفته است (پراکنش مقادیر شیب آن در هر دو مدل تقریباً یکسان است). تأکید بیش از حد بر اهمیت

کمینه روزانه (آبی‌رنگ) باعث کاهش عملکرد شده‌اند (سمت چپ خط متوسط عملکرد یا مقدار پایه ۳۶۰۰ کیلوگرم در هکتار قرار دارند؛ به عبارت دیگر، شیب این مقدار پایین منفی بوده، یعنی باعث کاهش عملکرد نسبت به میانگین مدل شده) که بیانگر حساسیت گیاه به دماهای پایین در مراحل ابتدایی رشد است.

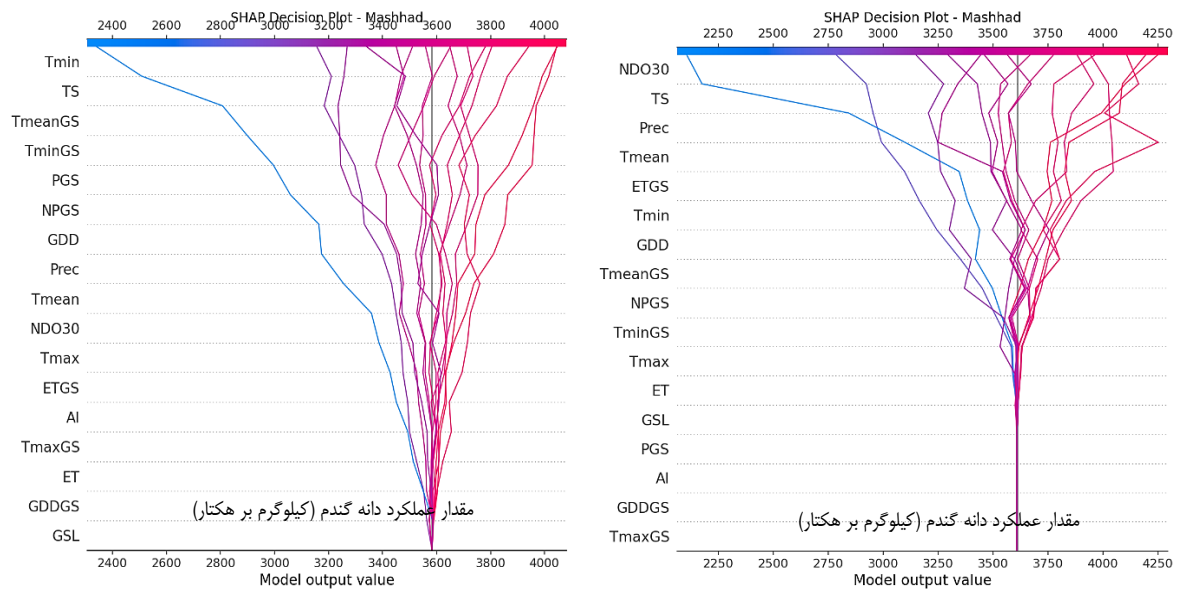
برای سایر ویژگی‌ها، به‌طور مشابه می‌توان تحلیل ارائه داد. به‌طور کلی، مدل رندوم‌فارست توانست رابطه پیچیده‌ای بین متغیرهای اقلیمی و عملکرد گندم استخراج کند. نمودار شیب تصمیم‌نشان می‌دهد که دمای کمینه روزانه، شدت فصلی بودن درجه حرارت، دمای مینگین طی فصل رشد، دمای میانگین روزانه و بارندگی طی فصل رشد مهم‌ترین نقش را در در پیش‌بینی عملکرد برای مشهد دارند. این تحلیل برای کشاورزان و سیاست‌گذاران می‌تواند در بهینه‌سازی تاریخ کاشت و آبیاری مؤثر باشد. نمودار تصمیم در الگوریتم ایکس‌جی‌بوست مشهد در سمت راست شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۹ که از کاربردی‌ترین خروجی‌های شیب محسوب می‌شود، نمودار وابستگی جزئی یا دی‌دی نام دارد که اثر مستقیم و جداگانه هر ویژگی بر عملکرد گندم را نمایش می‌دهد، درحالی‌که سایر ویژگی‌ها ثابت نگه داشته شده‌اند. در ساختار این نمودار، روی محور افقی مقدار ویژگی (مثلاً دمای میانگین روزانه، دمای میانگین طی فصل رشد یا غیره)، و روی محور عمودی، مقدار پیش‌بینی‌شده عملکرد (توسط مدل) قرار می‌گیرند. خطوط نمودار، منحنی پاسخ مدل نسبت به تغییرات هر ویژگی را نشان می‌دهد. در مدل رندوم‌فارست (شکل بالایی)، با افزایش تعداد دفعات وقوع بارندگی از ۱۱۲ تا ۱۳۰ مرتبه، مقدار عملکرد گندم در مشهد با شیب زیادی افزایش می‌یابد و به حدود ۳۶۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌رسد، ولی پس از آن با افزایش دفعات بارندگی تا حدود ۱۷۰، این شیب افزایشی کاهش یافت و به حالت تقریباً اشباع درآمد (یعنی افزایش بیشتر این ویژگی تأثیر محسوسی بر عملکرد ندارد). افزایش دمای کمینه روزانه، از ۶ تا ۸/۵ درجه سانتی‌گراد سبب افزایش یکنواخت عملکرد گندم شد. این روند افزایشی نشان می‌دهد که در شرایط آب‌وهوایی مشهد، گندم نسبت به افزایش دمای کمینه تا این بازه پاسخ مثبت دارد. با این توضیح که محدوده ۷ تا ۷/۵ درجه سانتی‌گراد، نوسانات جزئی وجود داشت که احتمالاً به اثرات پیچیده تعامل بین ویژگی‌ها یا نویز داده مربوط است. افزایش شاخص خشکی در بازه ۸/۵ تا حدود ۱۰/۵، اثر منفی چندانی ندارد، حتی گاهی عملکرد اندکی بیشتر هم می‌شود، اما پس از حدود ۱۰/۵، روند تغییر ناگهانی شده و با افزایش مقدار شاخص شدت فصلی بودن درجه حرارت به بیش از ۱۱/۵، عملکرد گندم حدود ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار افت می‌کند که این یک نقطه آستانه بحرانی است که از آن به بعد خشکی به‌طور محسوس به عملکرد آسیب می‌زند.

تحلیل نمودارهای شیب تصمیم و وابستگی جزئی مدل رندوم‌فارست برای شهرستان مشهد

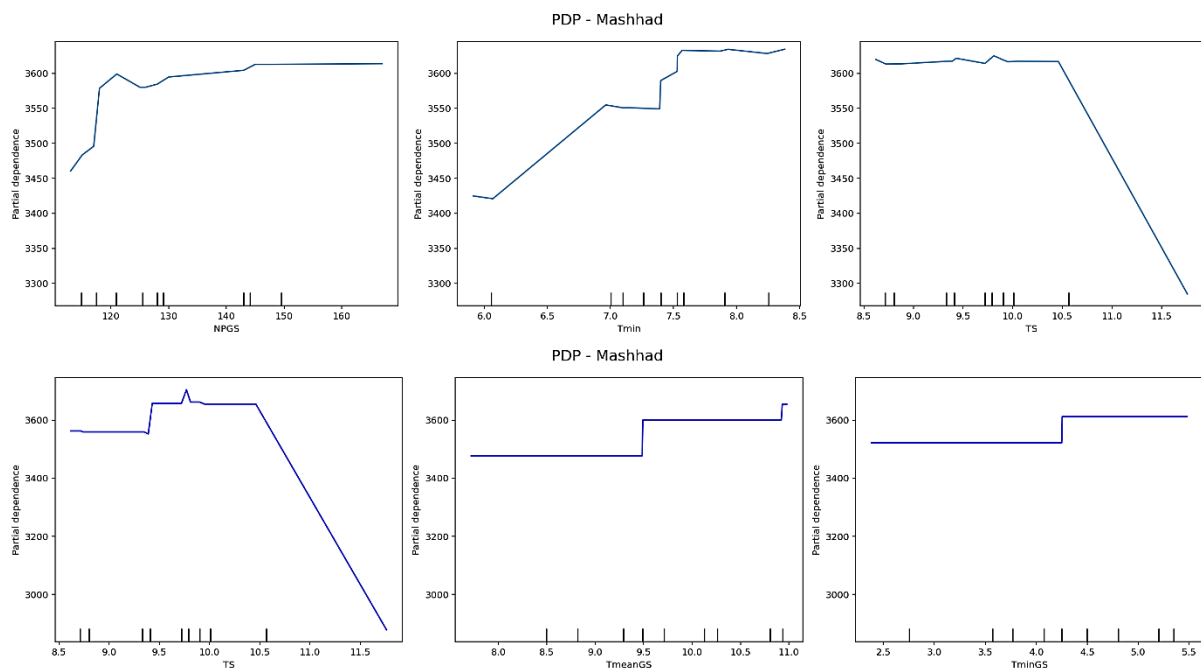
شکل ۸ یک نمودار تصمیم مبتنی بر مقادیر شیب برای مدل رندوم‌فارست (سمت چپ) و ایکس‌جی‌بوست (سمت راست) است که برای پیش‌بینی عملکرد گندم در شهرستان مشهد مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر شیب، ابزار قدرتمندی برای درک نحوه اثرگذاری هر ویژگی ورودی بر پیش‌بینی مدل هستند. در این تصویر، تغییرات مقادیر شیب برای هر ویژگی نسبت به مقادیر آن ویژگی در نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود. در این نمودار، محور افقی نمایانگر مقدار شیب است، که میزان تأثیر هر ویژگی را بر پیش‌بینی عملکرد نشان می‌دهد (مثلاً افزایش یا کاهش عملکرد). محور عمودی ویژگی‌های مدل را فهرست کرده است (مانند دمای کمینه روزانه، شدت فصلی بودن درجه حرارت، دمای میانگین طی فصل رشد و غیره). هر خط بیانگر یک نمونه (سال-مکان) در اینجا منظور عملکرد گندم در یک سال خاص در مشهد است) است. هر کدام از این خط‌های رنگی هنگام عبور از یک ویژگی (مثلاً دمای کمینه روزانه)، به سمت چپ یا راست منحرف می‌شوند: اگر به سمت چپ برود، یعنی شیب منفی بوده و عملکرد کاهش می‌یابد. اگر خط به سمت راست خط پایه منحرف شود، یعنی شیب مثبت بوده و عملکرد افزایش یافته است. در ویژگی‌هایی که قدرت توضیح‌دهندگی بالایی دارند، این انحراف‌ها زیاد و شدید هستند. اگر خطوط در یک ویژگی به‌صورت قابل توجهی از هم جدا بشوند (باز شوند)، یعنی آن ویژگی اثر زیادی در خروجی مدل دارد. اگر خطوط تقریباً صاف یا هم‌راستا باقی بمانند، آن ویژگی اثر چندانی در مدل نداشته است. اثر یک ویژگی همیشه خطی یا یکنواخت نیست؛ یعنی مقدار بیشتر یک ویژگی لزوماً همیشه به معنای بهتر یا بدتر بودن نیست، بلکه ممکن است از یک نقطه به بعد، اثر آن ویژگی کاهش پیدا یافته یا حتی برعکس شود. این پدیده در مدل‌های پیچیده مثل رندوم‌فارست یا ایکس‌جی‌بوست به‌وضوح دیده می‌شود و می‌تواند در تحلیل شیب یا نمودارهای تصمیم مشخص شود.

همان‌طور که در **شکل ۸** (سمت چپ) مشاهده می‌شود، دمای کمینه روزانه در رأس ویژگی‌های مؤثر قرار دارد، به عبارت دیگر، اولین ویژگی واردشونده در مدل است؛ یعنی مدل رندوم‌فارست در ابتدا تصمیم خود را براساس مقدار دمای کمینه روزانه در هر نمونه شکل می‌دهد. در شکل ۸ خط‌هایی که از ویژگی دمای کمینه روزانه عبور می‌کنند، به‌شدت به چپ یا راست منحرف شده‌اند (قرمزها به راست (عملکرد بالا) یعنی دمای کمینه روزانه بالا باعث افزایش عملکرد شده؛ آبی‌ها به چپ (عملکرد پایین) یعنی دمای کمینه روزانه پایین باعث افت عملکرد شده‌اند. بسیاری از نمونه‌ها، مقادیر پایین دمای



شکل ۸- نمودارهای شیب تصمیم برای پیش بینی عملکرد گندم در شهرستان مشهد توسط مدل رندوم فارست (سمت چپ) و ایکس جی بوست (سمت راست)

Figure 8- Decision SHAP plots for predicting wheat yield in Mashhad county by the Random Forest model (left) and XGBoost model (right)



شکل ۹- نمودار شیب وابستگی جزئی (دی پی دی) برای مدل رندوم فارست (بالا) و ایکس جی بوست (پایین) در پیش بینی عملکرد گندم مشهد

Figure 9- SHAP Partial Dependence (DPD) plots for the Random Forest model (top) and XGBoost model (bottom) in predicting wheat yield in Mashhad

هستند. همچنین وجود خشکی شدید (شاخص خشکی) یک تهدید محسوب می شود.

یافته‌ها تأیید می کنند که تعادل در گرما (دمای کمینه روزانه)، شاخص خشکی و شرایط مناسب آبی (تعداد دفعات وقوع بارندگی طی فصل رشد) برای دستیابی به عملکرد بهینه گندم در مشهد ضروری

نتیجه‌گیری

در مطالعات متعدد بیان شده است که مدل ایکس‌جی‌بوست به ویژگی‌های خاص‌تر و پیچیده‌تر مانند درجه روز رشد توجه دارد، و می‌تواند ویژگی‌ها و برهمکنش‌های بیشتری را مدل‌سازی کند، اما برای شهرستان مشهد این چنین نبود. این نمودارها به کارشناسان زراعت کمک می‌کنند تا دلیل تصمیم‌گیری مدل‌ها را بهتر درک کنند و از آن برای بهینه‌سازی کشت و مدیریت مزرعه در سال‌های آینده بهره ببرند. نمودارهای تکمیلی برای سایر شهرستان‌ها تولید شده و بنا به درخواست در دسترس علاقمندان قرار می‌گیرد.

گزارش شده است که الگوریتم رندوم‌فارست در ارزیابی توان اکولوژیک کاربری جنگلداری در حوزه آبخیز کن (استان تهران)، توان بسیار بالایی در پیش‌بینی مناطق مستعد از خود نشان داد و متغیرهای عمق خاک، بارندگی در فصل رویش، ارتفاع، بافت خاک، شیب و جهت به‌ترتیب دارای اهمیت از زیاد به کم بودند (Oghnoum, Fegghi, Makhdoum, Moghaddamnia, & Etemad, 2019). در به‌کارگیری مدل رگرسیونی جنگل تصادفی به‌منظور برآورد زیست‌توده روی زمین جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مشخص شد که شاخص‌های RVI، GNDVI، NDVI و DVI اهمیت بیشتری در ارائه مدل برآورد زیست‌توده داشتند. ضریب تبیین این مدل ۰/۸۰ و جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۲۸/۷ گزارش شد (Gheysarbeigi, Pir Bavaghar, & Valipour, 2024).

ارزیابی و تعیین اعتبار

به‌منظور تحلیل عمیق‌تر و مقایسه دقیق‌تر دقت دو الگوریتم در پیش‌بینی عملکرد گندم، چهار معیار ارزیابی مدل‌ها به تفکیک برای ۱۹ شهرستان، و همچنین میانگین معیارهای ارزیابی دو الگوریتم، در **جدول ۵** ارائه شده‌اند. ترتیب شهرستان‌ها بر مبنای معیارهای ارزیابی، در هر دو الگوریتم و نیز میانگین آن‌ها، از زیاد به کم، مرتب شده‌اند.

جذر میانگین مربعات خطا: هرچه این مقدار کمتر باشد، مدل پیش‌بینی دقیق‌تری دارد. درصد تفاوت برای RMSE نشان‌دهنده این است که کدام مدل به‌طور متوسط خطای بزرگ‌تری دارد. برای بیشتر شهرستان‌ها، مدل ایکس‌جی‌بوست خطای بالاتری دارد. در این بین، چند مورد وجود دارد که این مدل عملکرد بهتری نشان داده است (مثل شهرستان‌های خاف، مشهد، رشتخوار و تایباد).

○ **ضریب تبیین:** این مقدار نشان‌دهنده میزان تطابق پیش‌بینی‌ها با داده‌های واقعی است و هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، مدل بهتر عمل کرده است. درصد تفاوت در R^2 نشان‌دهنده این است که مدل‌ها چقدر در تطبیق داده‌ها موفق بوده‌اند. مدل رندوم‌فارست در شش شهرستان مقدار ضریب

تبیین بالاتری دارد. این موضوع نشان می‌دهد که این مدل در بیشتر موارد توانسته است توضیح‌دهنده بهتری برای داده‌ها باشد. وجود مقادیر صفر در ستون‌های ضریب تبیین، در نتیجه نرمال‌سازی این مقادیر ضریب تبیین حاصل شده است. نرمال‌سازی ضرایب تبیین در برخی موارد خاص مثل برخی مدل‌های رگرسیون غیرخطی یا رندوم‌فارست، امری معمول است.

○ **میانگین قدر مطلق خطا:** نشان‌دهنده خطای مطلق پیش‌بینی است، هرچه کمتر باشد، مدل بهتر است. برای MAE، در ۱۵ شهرستان مدل رندوم‌فارست عملکرد بهتری دارد که نشان‌دهنده این است که این مدل توانست پیش‌بینی‌های دقیق‌تری انجام دهد.

○ **شاخص توافق ویلموت نیز** برای اندازه‌گیری تطابق پیش‌بینی‌ها با مقادیر واقعی استفاده می‌شود و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، مدل بهتر است. شاخص d برای ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی داده‌ها مفید است. رندوم‌فارست در ۱۵ شهرستان شامل بردسکن، سرخس، تربت جام، رشتخوار، نیشابور، مه ولات، کاشمر و گناباد امتیاز بالاتری دارد که نشان‌دهنده دقت بیشتر در پیش‌بینی است.

تعیین الگوریتم برتر در هر شهرستان براساس معیارهای ارزیابی و رتبه‌بندی شهرستان‌ها: مدل بهتر برای هر شهرستان با استفاده از میانگین چهار معیار ارزیابی هر مدل تعیین شد (**جدول ۶**). این مقایسه نشان می‌دهد که کدام مدل در پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد گندم در هر شهرستان عمل کرده است. طبق تحلیل انجام‌شده، مدل رندوم‌فارست به‌عنوان مدل برتر برای اکثر شهرستان‌ها شناخته شده است. این موضوع به‌وضوح در شهرستان‌هایی که رندوم‌فارست امتیاز بهتری نسبت به ایکس‌جی‌بوست کسب کرده است، مشاهده می‌شود. مدل ایکس‌جی‌بوست در چند شهرستان خاص مانند بردسکن، مشهد، درگز و سرخس، امتیاز بهتری نسبت به رندوم‌فارست داشته است. این تفاوت‌ها ممکن است به ویژگی‌های خاص داده‌های این شهرستان‌ها، مانند توزیع متفاوت داده‌ها یا پیچیدگی‌های خاص این مناطق برگردد. برای شش شهرستان شامل کاشمر، چناران، خاف، مه ولات و کلات نادر، رتبه‌ها در هر دو مدل مشابه بود (۳۱/۵ درصد کل شهرستان‌ها) (**جدول ۶**). در هفت شهرستان شامل خایا آباد، سبزوار، تربت جام، رشتخوار، نیشابور، گناباد و تربت حیدریه، مدل رندوم‌فارست امتیازهای بیشتری نسبت به مدل ایکس‌جی‌بوست داشت. شهرستان‌های رتبه‌های اول تا پنجم براساس میانگین معیارهای ارزیابی دو الگوریتم، همان شهرستان‌های رتبه‌های یک تا پنج در هر دو مدل بود (**جدول ۶**).

جدول ۵- چهار معیار ارزیابی دو الگوریتم رندوم فارست و ایکس جی بوست در پیش‌بینی عملکرد گندم در استان خراسان رضوی به تفکیک شهرستان‌ها

Table 5- Four evaluation metrics of the Random Forest and XGBoost algorithms in predicting wheat yield in Khorasan Razavi province, broken down by county

شهرستان County	R ² (XGB)	R ² (RF)	RMSE (XGB)	RMSE (RF)	MAE (XGB)	MAE (RF)	d (XGB)	d (RF)
تربت جام Torbat-E-Jam	0.13	0.34	269.36	312.61	211.48	308.78	0.77	0.71
نیشابور Neyshabur	0	0.33	377.91	343.82	298.37	232.39	0.78	0.59
مه ولات Mahvelat	0	0.16	481	344.22	441.6	329.94	0.71	0.69
فریمان Fariman	0	0.07	205.41	314.79	175.52	253.8	0.62	0.75
بردسکن Bardeskan	0	0.05	387.03	187.69	341.11	149.23	0.6	0.8
چناران Chenaran	0	0.05	410.79	281.64	317.07	202.42	0.59	0.62
کاشمر Kashmar	0	0	472.61	217.93	424.28	164.5	0.51	0.56
گناباد Gonabad	0	0	683.93	444.72	579.88	372.6	0.46	0.55
تایباد Taybad	0	0	455.4	521.03	380.93	473.99	0.44	0.52
مشهد Mashhad	0	0	223.05	454	167.03	350.58	0.43	0.51
تربت حیدریه Torbat-E Heydariyeh	0	0	786.2	581.33	685.32	505.85	0.39	0.47
درگز Daregaz	0	0	678.69	432.65	484.36	388.38	0.38	0.44
سبزوار Sabzevar	0	0	465.75	345.44	311.6	234.95	0.35	0.44
خلیل آباد Khalil Abad	0	0	247.96	141.19	221.54	125.68	0.33	0.37
قوچان Quchan	0	0	943.99	667.65	797.74	622.39	0.25	0.36
رشتخوار Roshtkhar	0	0	515.13	352.85	415.8	285.01	0.2	0.18
سرخس Sarakhsh	0	0	663.58	622.78	551.74	532.25	0.08	0.11

کلات نادر Kalat-E-Nader	0	0	464.9	609.82	413.58	450.16	0.06	0.1
خاف Khaf	0	0	619.28	331.28	534.82	315.66	0.02	0.1
میانگین Mean	0.0068	0.0526	492.21	395.13	408.09	331.5	0.4194	0.4668

توضیح: مقایسه هر دو مدل در شهرستان‌ها براساس معیارهای ارزیابی مقدار R^2 و d مدل رندوم‌فارست انجام گرفته است (مقادیر شاخص‌ها صعودی و ترتیب اهمیت شهرستان‌ها نزولی مرتب شده است).

Note: The comparison of both models in the counties is based on the evaluation metrics of R^2 and d for the Random Forest model (the index values are ordered in ascending order, and the counties are arranged in descending order of importance)

مدل در پیش‌بینی داده‌ها ست. رتبه‌بندی براساس ضریب تبیین و شاخص توافق کمک می‌کند که مدل‌هایی که به‌ترتیب بیشتری دقت پیش‌بینی را دارند و عملکرد خوبی در مقایسه با داده‌های واقعی دارند، در صدر قرار بگیرند. به‌منظور تصمیم‌گیری بهتر در خصوص استفاده از نوع مدل در هر شهرستان، در ستون آخر زیر عنوان مدل برتر، شهرستان‌ها براساس میانگین هر چهار معیار ارزیابی در هر دو الگوریتم، مرتب شدند. با این روش، با استفاده از میانگین مدل‌های دقیق‌تر و معتبرتر برای هر شهرستان، شهرستان‌ها از بهترین تا ضعیف‌ترین در ستون مجزا در جدول ۶ قرار گرفتند.

مقایسه و ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین در طبقه‌بندی عملکرد گندم با استفاده از معیارهای دقت و بازیابی

ابتدا داده‌های خام هر شهرستان به تفکیک سال خوانده شده و مدل‌های ذخیره‌شده با استفاده از کتابخانه جولیپ^۱ بارگذاری شدند. داده‌های آب‌وهوایی، اقلیمی و اکوفیزیولوژیک به‌عنوان ورودی مدل‌ها استفاده گردید و پس از آموزش، عملکرد مدل‌ها با شاخص‌های مختلف ارزیابی شد. در این مطالعه، دو الگوریتم یادگیری ماشین شامل رندوم‌فارست و ایکس‌جی‌بوست برای پیش‌بینی عملکرد گندم در سطح شهرستان‌ها توسعه داده شد. مقدار عملکرد ابتدا به‌صورت عددی با استفاده از رگرسیون پیش‌بینی گردید و سپس با استفاده از صدک‌های آماری به سه کلاس مجزا تقسیم شد:

متوسط‌های جذر میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا در مدل برنده عموماً کمتر است. برای مثال، در شهرستان بردسکن، جذر میانگین مربعات خطا در مدل رندوم‌فارست برابر با $187/6$ و در ایکس‌جی‌بوست برابر با $205/4$ است که به‌وضوح اختلاف را نشان می‌دهد. در شهرستان‌هایی که ایکس‌جی‌بوست برتر بوده (مثل مشهد، رتبه ششم در برابر رتبه چهاردهم در رندوم‌فارست، مقدارهای آر ام اس ای تقریباً برابر و میانگین قدر مطلق خطا در مدل ایکس‌جی‌بوست اندکی کمتر است ($410/7$ در برابر 454) که حاکی از پیش‌بینی کمتر خطا توسط ایکس‌جی‌بوست در داده‌های آن شهرستان است. شاخص توافق ویلموت که شباهت پیش‌بینی به مشاهدات را می‌سنجد، در مدل برنده (رندوم‌فارست) بالاتر است. در مه ولات مقدار d برای رندوم‌فارست برابر $0/69$ و برای ایکس‌جی‌بوست برابر $0/51$ است؛ این تفاوت نشان می‌دهد که رندوم‌فارست در آن ناحیه خطای پیش‌بینی کمتر داشته و الگوهای مشاهداتی را بهتر بازتولید می‌کند. در مناطقی که پراکندگی داده زیاد است (نقاطی با جذر میانگین مربعات خطای بالا شامل همه شهرستان‌ها به‌جز خاف، مشهد، تایباد، و سرخس) رندوم‌فارست معمولاً پایدارتر است و خطای کمتری ثبت می‌کند. ایکس‌جی‌بوست در مناطقی با توزیع پیچیده‌تر و نویز کمتر (مثل مشهد، درگز، تایباد و سرخس) توانست کمی بهتر یا برابر با رندوم‌فارست عمل کند. این تحلیل نشان می‌دهد که علی‌رغم پتانسیل بالای ایکس‌جی‌بوست در موارد خاص، مدل رندوم‌فارست در اغلب شهرستان‌ها نتایج بهتری از نظر دقت پیش‌بینی (R^2)، کاهش خطا (RMSE/MAE) و شباهت به مشاهدات (d Willmott's) ارائه کرده است. این تفاوت در عملکرد ممکن است ناشی از نحوه یادگیری و ویژگی‌های مدل‌ها باشد که در برخی موارد، رندوم‌فارست قادر است روابط پیچیده‌تری را شبیه‌سازی کند (Khodjaev et al., 2025). به‌منظور بهبود کلی، توصیه می‌شود بر روش‌های ترکیبی یا تنظیم دقیق پارامترها تمرکز شود تا بیش‌برازش در ایکس‌جی‌بوست و کم‌برازش احتمالی در رندوم‌فارست کاهش یابد.

مقادیر ضریب تبیین برابر با صفر، به‌طور طبیعی به‌دلیل ضعف

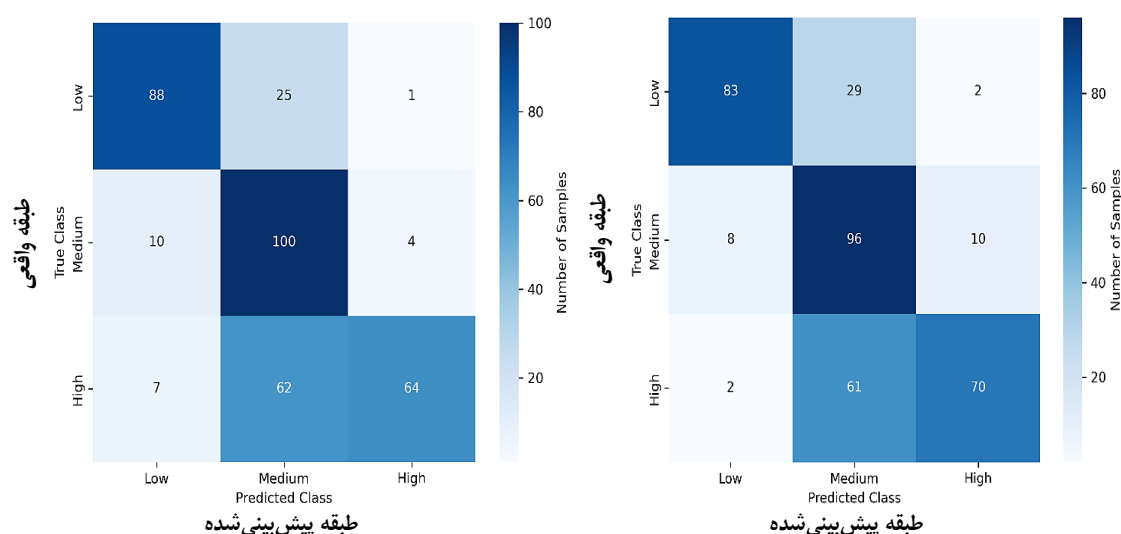
جدول ۶- رتبه‌بندی شهرستان‌ها از نظر دقت و توان مدل بهینه شده براساس معیارهای ارزیابی و تعیین اعتبار در دو مدل رندوم فارست، ایکس‌جی‌بوست و میانگین آن‌ها (رتبه در سمت چپ شهرستان آورده شده)

Table 6- Ranking of counties based on the accuracy and performance of the optimized model according to evaluation metrics and validation in the two models, Random Forest, XGBoost, and their average (rank listed on the left side of the county)

رتبه شهرستان در مدل رندوم فارست	رتبه شهرستان در مدل ایکس‌جی‌بوست	میانگین رتبه شهرستان‌ها
RF_rank_counties	XGB_rank_counties	Avg_rank_counties
خلیل آباد	خلیل آباد	خلیل آباد
1_Khalil Abad	2_Khalil Abad	1_Khalil Abad
بردسکن	بردسکن	بردسکن
2_Bardaskan	1_Bardaskan	2_Bardaskan
کاشمر	کاشمر	کاشمر
3_Kashmar	3_Kashmar	3_Kashmar
چناران	چناران	چناران
4_Chenaran	4_Chenaran	4_Chenaran
فریمان	فریمان	فریمان
5_Fariman	5_Fariman	5_Fariman
سبزوار	سبزوار	سبزوار
7_Sabzevar	8_Sabzevar	6_Sabzevar
خاف	خاف	خاف
10_Khaf	10_Khaf	7_Khaf
مشهد	مشهد	مشهد
12_Mashhad	6_Mashhad	8_Mashhad
تربت جام	تربت جام	تربت جام
8_Torbat-E-Jam	12_Torbat-E-Jam	9_Torbat-E-Jam
رشتخوار	رشتخوار	رشتخوار
9_Roshtkhar	13_Roshtkhar	10_Roshtkhar
مه ولات	مه ولات	مه ولات
11_Mahvelat	11_Mahvelat	11_Mahvelat
درگز	درگز	درگز
14_Daregaz	9_Daregaz	12_Daregaz
تایباد	تایباد	تایباد
15_Taybad	7_Taybad	13_Taybad
نیشابور	نیشابور	نیشابور
6_Neyshabur	15_Neyshabur	14_Neyshabur
گناباد	گناباد	گناباد
13_Gonabad	17_Gonabad	15_Gonabad
کلات نادر	کلات نادر	کلات نادر
16_Kalat-E-Nader	16_Kalat-E-Nader	16_Kalat-E-Nader
سرخس	سرخس	سرخس
18_Sarakhs	14_Sarakhs	17_Sarakhs
قوچان	قوچان	قوچان
19_Quchan	18_Quchan	18_Quchan
تربت حیدریه	تربت حیدریه	تربت حیدریه
17_Torbat-E Heydariyeh	19_Torbat-E Heydariyeh	19_Torbat-E Heydariyeh

ضعیف: (Low) صدک ۰ تا ۳۳؛ متوسط: (Medium) صدک ۳۳ تا ۶۶؛ خوب: (High) صدک ۶۶ تا ۱۰۰
این طبقه‌بندی براساس مقادیر واقعی و همچنین مقادیر پیش‌بینی شده برای هر شهرستان انجام شده است. نتایج این طبقه‌بندی در قالب ماتریس درهم‌ریختگی (confusion matrix) برای هر مدل ارائه گردید (شکل ۱۰).
در ماتریس ایکس‌جی‌بوست، مقادیر قطر اصلی (مقدارهای صحیح) بسیار بیشتر هستند و در نتیجه ماتریس متراکم‌تر روی قطر است. در ماتریس رندوم‌فارست، خطاهای بیشتری در خارج از قطر

اصلی دیده می‌شود که به معنی طبقه‌بندی اشتباه بالاتر است. مقایسه این دو مدل براساس امتیاز کلی مدل‌ها که نشان‌دهنده عملکرد کلی هر مدل در پیش‌بینی عملکرد گندم برای شهرستان‌های مختلف است، صورت می‌گیرد. این امتیاز به‌طور خاص به شبیه‌سازی عملکرد مدل در مجموع شهرستان‌ها توجه دارد و براساس معیارهای مشخصی مانند دقت کلی، دقت مثبت یا طبقه‌ای، بازیابی و امتیاز اف وان مدل در پیش‌بینی شهرستان‌های خاص محاسبه می‌شود (جدول ۷).



شکل ۱۰- ماتریس درهم‌ریختگی الگوریتم رندوم‌فارست (سمت راست) و ایکس‌جی‌بوست (سمت چپ) در طبقه‌بندی عملکرد گندم در استان خراسان رضوی

Figure 10- Confusion matrix of the Random Forest algorithm (right) and XGBoost algorithm (left) in classifying wheat yield in Khorasan Razavi province

جدول ۷- خلاصه دقت (accuracy)، دقت مثبت (precision)، بازیابی (recall) و امتیاز اف-وان برای دو الگوریتم طبقه‌بندی عملکرد گندم در استان خراسان رضوی

Table 7- Summary of accuracy, precision, recall, and F1 score for the two algorithms in classifying wheat yield in Khorasan Razavi province

مدل Model	دقت Accuracy (%)	دقت مثبت Precision (%)	بازیابی Recall (%)	F1-score (%)
رندوم‌فارست Random Forest	68.9	78.0	68.9	67.7
ایکس‌جی‌بوست XGBoost	69.8	73.8	69.8	66.8

بالاتری را نسبت به رندوم‌فارست ارائه داده است (۶۹/۸ درصد در برابر ۶۸/۹ درصد)، که نشان‌دهنده توانایی بیشتر این مدل در شناسایی صحیح کلاس‌های عملکرد می‌باشد. این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد، زیرا ایکس‌جی‌بوست با بهره‌گیری از روش‌های بوستینگ،

اعتبارسنجی: هر دو مدل ایکس‌جی‌بوست و رندوم‌فارست در پیش‌بینی عملکرد شهرستان‌ها قابل اعتماد هستند، با این تفاوت که ایکس‌جی‌بوست به‌طور کلی کلاس‌های عملکرد را با دقت بالاتری تفکیک کرده است. با این حال، مدل ایکس‌جی‌بوست به‌طور کلی دقت

توانایی بیشتری در مدل سازی الگوهای پیچیده و اصلاح خطاهای مدل های ضعیف تر دارد.

مقایسه شاخص های کلیدی نیز تفاوت هایی را بین این دو مدل نشان می دهد:

مقایسه دقیق تری از معیارهای دقت، دقت طبقه ای و بازیابی برای هر مدل می تواند به درک بهتر نقاط قوت و ضعف هر مدل کمک کند. در این تحقیق، عملکرد بیشتر شهرستان ها با ایکس جی بوست پیش بینی شده اند، اما در برخی موارد خاص، رندوم فارست عملکرد بهتری نشان داده است که می تواند به نوع داده ها و ویژگی های آن ها بستگی داشته باشد.

۱. **دقت یا صحت:** ایکس جی بوست با دقت کلی ۶۹/۸ درصد عملکرد بهتری نسبت به رندوم فارست (۶۸/۹ درصد) دارد. فقط درصد درست پیش بینی شده ها را می سنجد و اگر داده ها نامتوازن باشند (مثلاً کلاس های زیاد با هم فرق داشته باشند)، می تواند گمراه کننده باشد.

۲. **دقت مثبت یا دقت طبقه ای:** برخلاف دقت کلی، در این شاخص، رندوم فارست عملکرد بهتری از خود نشان داده است (۷۸ درصد در برابر ۷۳/۸ درصد). این بدان معنا است که رندوم فارست نسبت به ایکس جی بوست در کاهش خطاهای مثبت کاذب^۱ موفق تر بوده است. دقت مثبت، دقت پیش بینی کلاس مثبت را نشان می دهد (چند درصد پیش بینی های مثبت درست بودند).

۳. **بازیابی:** درصد نمونه های مثبت واقعی که مدل به درستی شناسایی کرده است. این معیار نشان می دهد که مدل چه مقدار از کل نمونه های مثبت را شناسایی کرده است. به عبارت دیگر، بازیابی به طور خاص به درصدی از نمونه های مثبت واقعی که به درستی توسط مدل شناسایی شده اند، اشاره دارد. به عبارت ساده تر، بازیابی به مدل می گوید که از تمامی نمونه های که باید به کلاس مثبت تعلق داشته باشند، چه مقدار توسط مدل به درستی شناسایی شده اند.

فرمول بازیابی به صورت رابطه (۱) است:

$$Recall = TP / (TP + FN) \quad (1)$$

که در آن، P^2 : نشان دهنده تعداد نمونه هایی که مدل به درستی به عنوان مثبت شناسایی کرده است.

FN^3 تعداد نمونه هایی که مدل به اشتباه به عنوان منفی شناسایی کرده است، در حالی که باید مثبت می بودند. در نتیجه، بازیابی بالا به معنای این است که مدل به خوبی قادر است نمونه های مثبت را

شناسایی کند، اما ممکن است همراه با اشتباهاتی (FN) باشد. به این ترتیب، بازیابی می تواند در برخی موارد، اهمیت بیشتری از دقت بالاتر داشته باشد، به خصوص زمانی که اشتباه در شناسایی نمونه های مثبت پیامدهای جدی تری داشته باشد.

هر دو مدل در بازیابی کلاس های صحیح عملکرد مشابهی دارند، اما ایکس جی بوست با مقدار ۶۹/۸ درصد اندکی بهتر از رندوم فارست (۶۸/۹ درصد) عمل کرده است. این شاخص نشان دهنده توانایی مدل در شناسایی نمونه های واقعی هر کلاس است.

۴. **امتیاز اف-وان:** ترکیبی از دقت مثبت و بازیابی است که میانگینی متوازن از این دو معیار را می دهد و در مسائل کلاس بندی مفید واقع می شود. رندوم فارست با مقدار ۶۷/۷ درصد اندکی بهتر از ایکس جی بوست (۶۶/۸ درصد) بود که بیانگر تعادل بهتر بین دقت و بازیابی در این مدل است. بهترین شاخص است وقتی که داده ها نامتوازن باشند یا هم خطاهای مثبت و هم منفی اهمیت داشته باشند.

به طور کلی، اگرچه ایکس جی بوست از نظر دقت کلی کمی برتر است، اما رندوم فارست در دقت طبقه ای و امتیاز اف-وان عملکرد قابل توجهی دارد. این تفاوت ها می توانند ناشی از ویژگی های داده ها، نوع توزیع کلاس ها، یا حساسیت مدل ها نسبت به ویژگی های خاص باشند. بنابراین، انتخاب نهایی مدل باید با در نظر گرفتن هدف های مدل، نوع کاربرد و پیامدهای هر نوع خطا انجام شود. به عنوان مثال، در شرایطی که هدف کاهش هشدارهای اشتباه یا پیش بینی های نادرست مثبت است، مدلی با دقت بالاتر مانند رندوم فارست ترجیح داده می شود. اما اگر هدف شناسایی کامل تر تمامی موارد واقعی باشد، مدلی با بازیابی بالاتر مانند ایکس جی بوست می تواند مفیدتر باشد. افزون بر این، میزان پیچیدگی مدل، زمان آموزش و نیاز به تنظیم پارامترها نیز باید در تصمیم گیری لحاظ شود. رندوم فارست عموماً ساختار ساده تری دارد و به تنظیمات کمتری نیاز دارد، در حالی که اگرچه ایکس جی بوست پیچیده تر و زمان برتر است، اما پتانسیل بیشتری برای استخراج الگوهای دقیق تر در داده های پیچیده دارد. در نهایت، ارزیابی عملکرد مدل ها باید همیشه در بستر کاربرد واقعی و با توجه به نیازهای تصمیم گیری انجام گیرد، چرا که یک مدل از نظر آماری بهتر ممکن است در عمل کاربرپذیری کمتری داشته باشد.

در شکل ۱۱، اف وان-اسکور دو مدل برای تمام شهرستان ها نشان داده شده، تا تحلیل عمیق تر را ممکن سازد. مطابق این شکل، مدل رندوم فارست در پیش بینی عملکرد گندم شهرستان های بردسکن، چناران، درگز، گناباد، کلات نادر، کاشمر، خاف، خلیل آباد، مه ولات، مشهد، نیشابور، رشتخوار، سبزوار، سرخس و تربت جام بهتر از ایکس جی بوست عمل کرده است. مدل ایکس جی بوست در پیش بینی عملکرد گندم تنها دو شهرستان فریمان (با اختلاف سه کیلوگرم) و

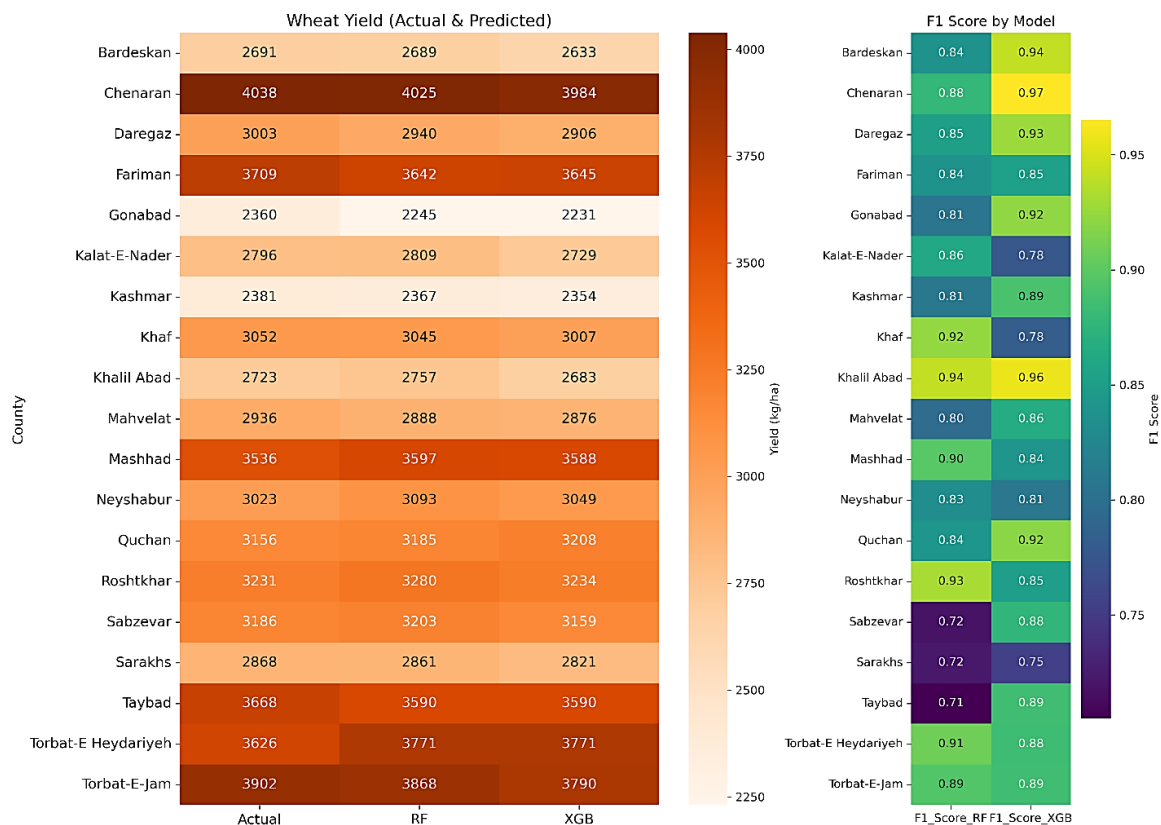
1- False Positives

2- True Positives

3- False Negatives

مدل بسیار نزدیک بوده‌اند و برای مدل ایکس‌جی‌بوست اندکی بیشتر بوده است، به عبارت دیگر پیش‌بینی‌های این مدل به مقادیر واقعی عملکرد نزدیک‌تر بودند.

قوچان بهتر از رندم فارست عمل کرد. برای دو شهرستان تربت حیدریه و تایباد پیش‌بینی دو مدل عیناً یکسان بود. مقایسه مقادیر اف-وان اسکور (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که این مقادیر برای هر دو



شکل ۱۱- مقادیر عملکرد گندم واقعی و پیش‌بینی شده توسط رندوم فارست و ایکس‌جی‌بوست در استان خراسان رضوی به همراه امتیاز اف-وان برای هر مدل و شهرستان

Figure 11- Actual and predicted wheat yield values by Random Forest and XGBoost in Khorasan Razavi province, along with the F1 score for each model and county

اشتباهات «Medium→High» و «Low→High» توانست مرزهای میانی را دقیق‌تر تشخیص دهد؛ ولی در عوض اندکی اشتباهات شدید (High→Low) را افزایش داده است. به‌طور خاص، در مدل رندوم‌فارست موارد متعددی وجود داشت که شهرستان‌های با عملکرد ضعیف به‌اشتباه در کلاس متوسط یا حتی خوب قرار گرفتند. این موضوع در ایکس‌جی‌بوست با شدت کمتری مشاهده شد و نشان‌دهنده قدرت بیشتر این مدل در یادگیری الگوهای پیچیده‌تر از داده‌ها است. مدل رندوم‌فارست مناسب شرایطی است که داده‌ها کمی نویزدار یا پیچیده باشند، چون درخت‌های تصادفی می‌توانند روی ویژگی‌های متفاوت تمرکز کنند. مدل ایکس‌جی‌بوست به‌خاطر سازوکار بوستینگ، توانست بهتر الگوهای دقیق‌تر را یاد بگیرد و رکورد بهتری ثبت کند.

تحلیل خطا و محدودیت‌های دو الگوریتم در طبقه‌بندی عملکرد گندم

در هر دو مدل، برجسب‌های واقعی و پیش‌بینی شده در سه کلاس پایین، متوسط و بالا طبقه‌بندی شده‌اند. نتایج بیشتر به‌منظور مقایسه دو مدل در جدول ۸ آورده شده است. در رندوم‌فارست، بیشترین اشتباهات مربوط به جابه‌جایی از «High» به «Medium» و از «Low» به «Medium» است و تنها دو مرتبه برجسب «High» مستقیماً به «Low» یا برعکس تغییر یافت که نشان‌دهنده پراکندگی نسبتاً زیاد در مرزهای مجاور کلاس‌ها است. خطاهای طبقه‌بندی به نسبت زیاد دیده می‌شود. به‌ویژه در برخی سال‌ها، پیش‌بینی از Medium به Low یا از High به Medium تغییر کرده است. پراکندگی بین کلاس‌های پیش‌بینی شده نسبت به واقعیت زیاد است. ایکس‌جی‌بوست با بهبود جزئی در دقت کلی و کاهش چشمگیر

جدول ۸- تحلیل خطاهای دو الگوریتم رندوم فارست و ایکس جی بوست در پیش بینی طبقه عملکرد گندم در استان خراسان رضوی
Table 8- Error analysis of the two algorithms, Random Forest and XGBoost, in predicting wheat yield classification in Khorasan Razavi province

معیار / الگوی اشتباه Criteria/ Error pattern	رندوم فارست Random Forest	ایکس جی بوست XGBoost
دقت کلی Accuracy	68.98%	69.81%
میانگین امتیاز اف-وان F1 Score	0.678	0.668
میانگین دقت مثبت Precision	0.780	0.738
میانگین بازیابی Recall	0.690	0.698
تعداد اشتباه High → Medium Error	61	62
تعداد اشتباه Low → Medium Error	29	25
تعداد اشتباه Medium → High Error	10	4
تعداد اشتباه Medium → Low Error	8	10
تعداد اشتباه High → Low Error	2	7
تعداد اشتباه Low → High Error	2	1

- خوشه اول (جنوب و شرق استان؛ اقلیم بسیار خشک با تغییرات دمایی زیاد و دوره رشد بسیار گرم و طولانی) شهرستان های بردسکن، خلیل آباد، مهولات و سرخس قرار دارند که در همه این شهرستان ها مدل رندوم فارست نسبت به ایکس جی بوست عملکرد بهتری ارائه داده است.
- خوشه دوم (مرکز استان؛ اقلیم نیمه خشک تا نیمه مرطوب با تغییرات دمایی کم و دوره رشد خنک تر و کوتاه تر) شامل شش شهرستان چناران، فریمان، کلات نادر، مشهد، نیشابور و قوچان است که در چهار شهرستان چناران، کلات نادر، مشهد و نیشابور، رندوم فارست عملکرد برتر داشته است. در دو شهرستان فریمان و قوچان، ایکس جی بوست با اختلاف اندک (حدود سه کیلوگرم در فریمان) بهتر عمل کرده است.
- خوشه سوم (غرب و جنوب غرب استان؛ اقلیم نیمه خشک گرم با تغییرات دمایی متوسط و دوره رشد نسبتاً گرم و طولانی) شامل نه شهرستان درگز، گناباد، کاشمر، خاف، رشتخوار، سبزوار، تایباد، تربت جام و تربت حیدریه است که در هفت شهرستان (درگز، گناباد، کاشمر، خاف، رشتخوار، سبزوار و تربت جام)، رندوم فارست دقت بالاتری نسبت به ایکس جی بوست نشان داد. در دو شهرستان تایباد و تربت حیدریه، هر دو مدل دقیقاً نتایج یکسانی ارائه داده اند. با توجه به نتایج خوشه بندی ناحیه های اقلیمی (سه خوشه) و ادغام آن با کلاس بندی عملکرد دو مدل در پیش بینی عملکرد گندم، و همچنین توجه به این نکته که مدل رندوم فارست در ۸۰ درصد کل شهرستان ها پیش بینی دقیق تری از مدل ایکس جی بوست ارائه داد، این مدل به عنوان گزینه مناسب تر برای تحلیل های آتی در حوزه پیش بینی عملکرد گندم بر مبنای ناحیه اقلیمی پیشنهاد می شود.

نکات مهم و پیشنهاد: ایکس جی بوست: کاهش قابل توجه «Medium→High» و «Low→High»؛ اندکی دقت کلی بالاتر؛ افزایش اشتباهات شدید «High→Low». رندوم فارست: امتیاز اف-وان و دقت مثبت بالاتر؛ اشتباهات شدید کمتر؛ پراکندگی بیشتر در اشتباهات بین کلاس های مجاور. اگر اولویت، تفکیک دقیق مرزهای میانی (کاهش خطاهای جابه جایی مجاور) و حداکثر دقت کلی است، ایکس جی بوست مناسب تر است. اگر اولویت، دستیابی به امتیاز اف-وان و دقت مثبت بالاتر و کاهش اشتباهات شدید باشد، رندوم فارست گزینه بهتری است. نتایج حاکی از آن است که در طبقه بندی کلاس های عملکرد گندم، مدل رندوم فارست با مدل ایکس جی بوست تفاوت محسوسی ندارد، بنابراین بهبود عملکرد ایکس جی بوست به دلیل خود مدل است نه تغییر در توزیع داده ها. به طور کلی، اگر هدف طبقه بندی بهتر عملکرد گندم آبی در شرایط اقلیمی استان خراسان رضوی به سه طبقه (کلاس) باشد، ایکس جی بوست انتخاب بسیار بهتری نسبت به رندوم فارست است و در صورت وجود منابع محاسباتی کافی، به کارگیری آن توصیه می شود.

۳- تحلیل عملکرد مدل ها بر اساس خوشه های مکانی شهرستان ها

برای بررسی دقیق تر عملکرد مدل های یادگیری ماشین در مناطق مختلف، شهرستان ها بر اساس شباهت های مکانی و اقلیمی به سه خوشه تقسیم شدند (جدول ۹). این خوشه بندی به کمک الگوریتم های تحلیل خوشه ای و برپایه ویژگی های مکانی انجام شده است (مطالعات اقلیمی با استفاده از نقشه های جهانی به روز شده کوپن-گایگر (Peel et al., 2007) بر این تفکیک اقلیمی تأکید دارند):

جدول ۹- مدل برتر در پیش‌بینی عملکرد گندم در استان خراسان رضوی بر مبنای خوشه‌بندی شهرستان‌ها در ناحیه‌های اقلیمی سه گانه
Table 9- The best model for predicting wheat yield in Khorasan Razavi province based on the clustering of counties in the three climatic regions

شهرستان County	شماره خوشه Cluster No	مدل برتر Better model
نیشابور Neyshabur	2	رندوم فارست RF
چناران Chenaran	2	رندوم فارست RF
قوچان Quchan	2	ایکس جی بوست XGB
گناباد Gonabad	3	رندوم فارست RF
تربت جام Torbate-Jam	3	رندوم فارست RF
سبزوار Sabzevar	3	رندوم فارست RF
رشتخوار Roshtkhar	3	رندوم فارست RF
درگز Daregaz	3	رندوم فارست RF
بردسکن Bardeskan	1	رندوم فارست RF
خلیل آباد Khalil Abad	1	رندوم فارست RF
مه ولات Mahvelat	1	رندوم فارست RF
سرخس Sarakhs	1	رندوم فارست RF
فریمان Fariman	2	ایکس جی بوست XGB
کلات نادر Kalat-E-Nader	2	رندوم فارست RF
مشهد Mashhad	2	رندوم فارست RF
تربت حیدریه Torbate Heydarieh	3	Equal
تایباد Taybad	3	Equal
خاف Khaf	3	رندوم فارست RF
کاشمر Kashmar	3	رندوم فارست RF

۱: اقلیم بسیار خشک با تغییرات دمایی زیاد و دوره رشد بسیار گرم و طولانی.

۲: اقلیم نیمه‌خشک تا نیمه‌مرطوب با تغییرات دمایی کم و دوره رشد خنک‌تر و کوتاه‌تر.

۳: اقلیم نیمه‌خشک گرم با تغییرات دمایی متوسط و دوره رشد نسبتاً گرم و طولانی.

1: Hyper-arid climate with high temperature variations and a very hot and long growing season.

2: Semi-arid to semi-humid climate with low temperature variations and a cooler and shorter growing season.

3: Warm semi-arid climate with moderate temperature variations and a relatively warm and long growing season.

نتیجه گیری

سیاسگزاری

دو الگوریتم پس از بهینه سازی با رگرسیونهای مربوط به خود، تفاوت قابل توجهی از نظر توان و دقت پیش بینی نداشتند، با این حال با توجه به عملکرد اندکی دقیق تر رندوم فارست، این مدل می تواند گزینه ای مناسب تر برای استفاده در سیستم های تصمیم گیری در حوزه کشاورزی باشد، به ویژه در شرایطی که شناسایی شهرستان های با عملکرد بالا (برای سرمایه گذاری یا الگوبرداری) یا شهرستان های با عملکرد پایین (برای مداخلات حمایتی) اهمیت داشته باشد، مدل رندوم فارست می تواند تصمیم گیری های بهتری فراهم کند.

بخشی از هزینه های این تحقیق توسط معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد، در قالب طرح پژوهشی به شماره ۲/۶۴۲۶۴ مصوب ۱۴۰۴/۰۲/۲۱ تأمین شده است که به این وسیله قدردانی می شود. از جناب آقای مهندس مهدی سلطانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد اگرواکولوژی که بخش عمده داده های خام مورد نیاز را در اختیار قرار دادند، سپاسگزارم.

References

1. Arun, G., and Ghimire, K. (2019). Estimating post-harvest loss at the farm level to enhance Food Security: A Case of Nepal. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, 3(September), 127–136. available from <https://doi.org/10.31015/jaefs.2019.3.3>
2. Aslan, M. F., Sabanci, K., & Aslan, B. (2024). Artificial intelligence techniques in crop yield estimation based on Sentinel-2 data: A comprehensive survey. *Sustainability*, 16(18), 8277. <https://doi.org/10.3390/su16188277>
3. Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M. P., Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggrawal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., & Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
4. Dhillon, M. S., Dahms, T., Kuebert-Flock, C., Rummler, T., Arnault, J., Steffan-Dewenter, I., & Ullmann, T. (2023). Integrating Random Forest and crop modeling improves the crop yield prediction of winter wheat and oil seed rape. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 1010978. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.1010978>
5. Everingham, Y., Sexton, J., Skocaj, D., & Inman-Bamber, G. (2016) Accurate prediction of sugarcane yield using a Random Forest algorithm. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(2), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0364-z>
6. Farhadi, M., Bannayan, M., Fallah, M. H., & Jahan, M. (2024). Identification of climatic and management factors influencing wheat's yield variability using AgMERRA dataset and DSSAT model across a temperate region. *Discover Life*, 54(8). <https://doi.org/10.1007/s11084-024-09651-8>
7. Gheysarbeigi, S., Pir Bavaghar, M., & Valipour, A. (2024). Forest aboveground biomass estimation using satellite imagery and Random Forest regression model. *Geography and Environmental Sustainability*, 14(1), 85-100. <https://doi.org/10.22126/GES.2024.9971.2715>
8. Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
9. IPCC. (2022). *Sixth Assessment Report*. Available Online at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2022/04/AR6_Factsheet_April_2022.pdf
10. Javadi, A., Ghahremanzadeh, M., Sassi, M. Javanbakht, O., & Hayati, B. (2024). Impact of climate variables change on the yield of wheat and rice crops in Iran (Application of Stochastic Model based on Monte Carlo Simulation). (2024). *Computational Economics*, 63, 983–1000. <https://doi.org/10.1007/s10614-023-10389-0>
11. Jhajharia, K., Mathur, P., Jain, S., & Nijhawan, S. (2023). Crop yield prediction using machine learning and deep learning techniques. *Procedia Computer Science*, 218, 406-417. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.023>
12. Khodabandehloo, E., Azadbakht, M., Radiom, S., Ashourloo, D., & Alimohammadi, A. (2021). Prediction of wheat fusarium head blight severity by using Random Forest. *Iranian Remote Sensing & GIS*, 13(4), 1-44. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.52547/gisj.13.4.1>
13. Khodjaev, S., Bobojonov, I., Kuhn, L., & Glauben, T. (2025). Optimizing machine learning models for wheat yield estimation using a comprehensive UAV dataset. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11, 15. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02188-9>
14. Kim, Y., & Kim, Y. (2022). Explainable heat-related mortality with random forest and SHapley Additive exPlanations (SHAP) models. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103677. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103677>
15. Koocheki, A., Nassiri-Mahallati, M., Kamali, Gh., Shahandeh, Gh. (2006). Potential Impacts of Climate Change on Agroclimatic Indicators in Iran, *Arid Land Research and Management* 20(3):245-259. <https://doi.org/10.1080/15324980600705768>
16. Krishnadoss, N., & Ramasamy, L. K. (2024). Crop yield prediction with environmental and chemical variables

- using optimized ensemble predictive model in machine learning. *Environmental Research Communication*, 6(10), 101001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad7e81>
17. Monavar Sabegh, S., Zare Haghi, D., Samadianfard, S., Neishabouri, M. R., & Mikaeili, F. (2023). Estimation of daily reference evapotranspiration using Random Forest optimized by genetic algorithm. *Water and Soil Science*, 33(4), 33-53. <https://doi.org/10.22034/ws.2021.48756.2449>
18. Moreno Sánchez, J. C., Acosta Mesa, H. G., Trueba Espinosa, A., Ruiz Castilla, S., & García Lamont, F. (2025). Improving wheat yield prediction through variable selection using Support Vector Regression, Random Forest, and Extreme Gradient Boosting. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100791. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100791>
19. 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.*, 2022, 287, 108640. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108640>
20. Oghnoum, M., Feghhi, J., Makhdoum, M., Moghaddamnia, A., & Etemad, V. (2019). Land capability evaluation of afforestation using Random Forest algorithm (Kan Watershed, Tehran). *Journal of Forest Research and Development*, 5(3), 387-403.
21. Pang, A., Chang, M. W., & Chen, Y. (2022). Evaluation of Random Forest for regional and local-scale wheat yield prediction in Southeast Australia. *Sensors*, 22, 717. <https://doi.org/10.3390/s22030717>
22. Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
23. Ray, D. K., Gerber, J. S., Macdonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 6, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>
24. Raymundo, R., Asseng, S., Robertson, R., Petsakos, A., Hoogenboom, G., Quiroz, R., Hareau, G., & Wolf, J., (2018). Climate change impact on global potato production. *European Journal of Agronomy*, 100, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.008>
25. Remman, S. B., Lekkas, A. M. (2021). *Robotic lever manipulation using hindsight experience replay and shapley additive explanations*. European Control Conference (ECC). Cornell University, USA. <https://doi.org/10.23919/ecc54610.2021.9654850>
26. Roell, Y. E., Beucher, A., Møller, P. G., Greve, M. B., & Greve, M. H. (2020). Comparing a Random Forest based prediction of winter wheat yield to historical yield potential. *Agronomy*, 10(3), 3. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030395>
27. Sadeghi, M., & Ahmadi Nadoushan, M. (2021). Modeling soil nitrogen using Remote Sensing, Regression and Random Forest models. *Journal of Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)*, 11(2), 97-111.
28. Shen, Y., Mercatoris, B., Liu, Q., Yao, H., Li, Z., Chen, Z., & Wang, W. (2024). Use Self-Training Random Forest for Predicting Winter Wheat Yield. *Remote Sensing*, 16(24), 4723. <https://doi.org/10.3390/rs16244723>
29. Si, Z., Qin, A., Liang, Y., Duan, A., & Gao, Y. (2023). A review on regulation of irrigation management on wheat physiology, grain yield, and quality. *Plants*, 12(4), 692. <https://doi.org/10.3390/plants12040692>
30. Slafer, G. A., Savin, R., Sadras, V. O., & Calderini, D. F. (2023). Wheat yield improvement: Physiological and agronomic basis. *Field Crops Research*, 291, 108757.
31. Soleimannejad, L., Bonyad, A. E., Naghdi, R., & Latifi, H. (2018). Classification of quantitative attributes of Zagros forest using Landsat 8-OLI and Random Forest algorithm (Case study: Protected area of Manesht forests). *Journal of Forest Research and Development*, 4(4), 415-434.
32. Soltani, M., Jahan, M., & Yaghoubi, F. (2025). Evaluation of power and accuracy of AgMERRA and ERA5 dataset to simulate long term data for temperature and radiation in grat Khorasan province. (Under referee process)
33. Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2018). *Fundamentals of Plant Physiology*. New York, USA: Oxford University Press. ISBN 978160535790
34. Ting, K. M. (2011). Confusion Matrix. In C. Sammut & G. I. Webb, (eds) *Encyclopedia of Machine Learning*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_157
35. Vieira, H. V., Bradford, B. Z., Osterholzer, A., Pierce, E. S., Cockrell, D., Peairs, F., Frost, K., Groves, R., & Nachappa, P. (2025). A new growing degree-day phenology model for wheat stem sawfly (Hymenoptera: Cephidae) in Colorado wheat fields. *Plos One*, 20(4), e0320497. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320497>
36. Wang, Z., & Li, S. (2002). Effects of water deficit and supplemental irrigation at different growing stages on uptake and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 8(3), 265–270. <https://dx.doi.org/10.11674/zwf.2002.0302>
37. Yaghoubi, F., Bannayanm, M., & Asadi, G. (2020). Performance of predicted evapotranspiration and yield of rainfed wheat in the northeast Iran using gridded AgMERRA weather data. *International Journal of Biometeorology*, 64, 1519–1537. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01931-y>

Contents

Research Articles

The Effect of Silicon Spraying and Nitrogen Fertilizer in Reducing the Drought Stress Damage on Growth, Grain Yield and Phenologic Stages of Black Cumin (<i>Nigella sativa</i> L.)	375
F. Kashkooli, M. Ghobadi, S. Jalali Honarmand	
Parameterization and Evaluation of the SSM-iCrop Model for Predicting Growth, Phenological Development, and Yield of Grain Maize (<i>Zea mays</i> L.) in Iran	399
N. Bayatian, A. Soltani, E. Zeinali	
Investigating the Effects of Sugarcane (<i>Saccharum officinarum</i>) Drainage Water, Foliar Application of Amino Acids, and Salicylic Acid on Morpho-Physiological Characteristics of Camelina (<i>Camelina sativa</i> L.) Cultivars	417
H. Nezhad Gharebaghi, P. Hassibi, A. Rahnama, D. Kehrizi, A. Monsafi	
Effect of Iron Nano-Fertilizer on Grain Yield and Genotypic and Environmental Indices of Cowpea (<i>Vigna unguiculata</i> L.) Genotypes	439
A. A. Ghanbari, H. Naghdi Badi, A. A. Ghanbari, A. M. Naji	
Investigating How Seed Yield is Influenced by Different Agronomic Traits in Local Sesame (<i>Sesamum indicum</i> L.) Lines Through the Utilization of Path Analysis and Principal Components Analysis	461
B. Masoudi, M. Abbasali, A. Aien, S. Saif Amiri	
Improving Antioxidant Enzyme Activities, Seed and Oil Yield of Sunflower (<i>Helianthus annuus</i> L.) with Brassinolide Foliar Application under Different Irrigation Regimes	479
M. Ghasemi, Sh. Jahanbin, H. Latifmanesh, A. Mirshekari, H. Alahdadi	
The Effect of Microtuber Size and Phosphate Biofertilizer on Growth and Tuber Yield of Sante Potato (<i>Solanum tuberosum</i> L.) Cultivar	497
N. Gharehbaghli, A. Sepehri	
Optimization and Validation of Two Machine Learning Algorithms for Accurate Prediction of Irrigated Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Yield and Identification of its Influential Factors in Khorasan Razavi Province	511
M. Jahan	

Iranian Journal of Field Crops Research

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

Vol. 23

No. 4

2025

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>

Contents

Research Articles

- The Effect of Silicon Spraying and Nitrogen Fertilizer in Reducing the Drought Stress Damage on Growth, Grain Yield and Phenologic Stages of Black Cumin (*Nigella sativa* L.) 375**
F. Kashkooli, M. Ghobadi, S. Jalali Honarmand

- Parameterization and Evaluation of the SSM-iCrop Model for Predicting Growth, Phenological Development, and Yield of Grain Maize (*Zea mays* L.) in Iran..... 399**
N. Bayatian, A. Soltani, E. Zeinali

- Investigating the Effects of Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Drainage Water, Foliar Application of Amino Acids, and Salicylic Acid on Morpho-Physiological Characteristics of Camelina (*Camelina sativa* L.) Cultivars..... 417**
H. Nezhad Gharebaghi, P. Hassibi, A. Rahnama, D. Kehrizi, A. Monsafi

- Effect of Iron Nano-Fertilizer on Grain Yield and Genotypic and Environmental Indices of Cowpea (*Vigna unguiculata* L.) Genotypes..... 439**
A. A. Ghanbari, H. Naghdi Badi, A. A. Ghanbari, A. M. Naji

- Investigating How Seed Yield is Influenced by Different Agronomic Traits in Local Sesame (*Sesamum indicum* L.) Lines Through the Utilization of Path Analysis and Principal Components Analysis 461**
B. Masoudi, M. Abbasali, A. Aien, S. Saif Amiri

- Improving Antioxidant Enzyme Activities, Seed and Oil Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) with Brassinolide Foliar Application under Different Irrigation Regimes 479**
M. Ghasemi, Sh. Jahanbin, H. Latifmanesh, A. Mirshekari, H. Alahdadi

- The Effect of Microtuber Size and Phosphate Biofertilizer on Growth and Tuber Yield of Sante Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivar 497**
N. Gharehbaghi, A. Sepehri

- Optimization and Validation of Two Machine Learning Algorithms for Accurate Prediction of Irrigated Wheat (*Triticum aestivum* L.) Yield and Identification of its Influential Factors in Khorasan Razavi Province 511**
M. Jahan