



شماره ۲

جلد ۲۳

سال ۱۴۰۴

(شماره پیاپی: ۷۸)

نشریه علمی

پژوهشهای زراعی ایران

شاپا: ۱۴۷۲-۲۰۰۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- مقایسه عملکرد و کیفیت علوفه در کشت مخلوط چاودار (*Secale cereale* L.) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa* Roth.) ۱۱۱
طالب صلواتی، غلامرضا حیدری، محمد مجیدی، شیوا خالص‌رو
- بهبود جذب عناصر غذایی و عملکرد نخود (*Cicer arietinum*) و جو (*Hordeum vulgare*) در کشت مخلوط ردیفی با محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد در شرایط خاک شور ۱۳۳
علی طالبی، محمد رحیم اوجی، فرهاد مهاجری، محمد رضا بازاریار
- ارزیابی ریسک خشکسالی گندم دیم (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری و مخاطره خشکسالی (مطالعه موردی: استان‌های خراسان رضوی و خراسان شمالی) ۱۵۱
هدا لطیفی، سرور خرم‌دل، علیرضا کوچکی، محمد بنایان اول، محمودرضا فرزانه بلگردی
- تأثیر مدت زمان تنش غرقاب در مراحل مختلف رشد بر برخی ویژگی‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیمی اکسیدانی و عملکرد گلرنگ زراعی (*Carthamus tinctorius* L.) ۱۷۳
فاطمه عسکری فروشانی، افراسیاب راهنما، موسی مسکرباشی، ایمان کامرانفر
- اثر محلول‌پاشی روی و آهن در مراحل مختلف نمو بر ویژگی‌های کمی و کیفی دانه دو رقم گندم دیم (*Triticum aestivum* L.) ۱۸۹
شهرنوش عجم، عباس بیابانی، رحمت‌اله محمدی، علی راحمی کاریزکی، حجت قربانی واقعی
- تأثیر ۲۴-پی براسینولید و عصاره گل کلم (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) بر عملکرد دانه و برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی ارقام حساس و متحمل به شوری کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) ۲۰۳
روژین سهرابی، علیرضا پیرزاد، محسن نیازخانی، تورج میرمحمودی
- اثر محلول‌پاشی آهن و اسید سالیسیلیک بر خصوصیات رشدی و عملکرد کنگد (*Sesamum indicum* L.) در شرایط کم‌آبایی ۲۲۹
محمد بهزاد امیری، محمد سپهری بیمرغی، عاطفه میرزائیان

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 ۲

جلد ۲۳

دانشگاه فردوسی مشهد

صاحب امتیاز:

پرویز رضوانی مقدم

مدیر مسئول:

حمیدرضا خزاعی

سردبیر:

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

اعضای هیئت تحریریه:

مجید آقاعلیخانی

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

پرویز احسان زاده

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

یحیی امام

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

عبدالرضا باقری

گروه بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

محمدعلی بهدانی

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

محمد بنایان اول

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

مجید جامی الاحمدی

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

یعقوب راعی

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

حمیدرضا خزاعی

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

حمید رحیمیان مشهدی

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

غلامرضا زمانی

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

احمد زارع فیض آبادی

مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، ایران

فرح اله شهریاری احمدی

گروه بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

محمد کافی

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

احمد نظامی

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

احسان عیشی رضایی

مرکز مطالعات کشاورزی بنیاد لابنتز (زالف)، آلمان

اعظم لشکری

مرکز جان اینس، 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

- ۱۱۱ مقایسه عملکرد و کیفیت علوفه در کشت مخلوط چاودار (*Secale cereale* L.) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa* Roth.) تحت سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی
طالب صلواتی، غلامرضا حیدری، محمد مجیدی، شیوا خالص‌رو
- ۱۳۳ بهبود جذب عناصر غذایی و عملکرد نخود (*Cicer arietinum*) و جو (*Hordeum vulgare*) در کشت مخلوط ردیفی با محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد در شرایط خاک شور
علی طالبی، محمد رحیم اوجی، فرهاد مهاجری، محمد رضا بازیار
- ۱۵۱ ارزیابی ریسک خشکسالی گندم دیم (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری و مخاطره خشکسالی (مطالعه موردی: استان‌های خراسان رضوی و خراسان شمالی)
هدا لطیفی، سرور خرم‌دل، علیرضا کوچکی، محمد بنایان اول، محمودرضا فرزانه بلگردی
- ۱۷۳ تأثیر مدت زمان تنش غرقاب در مراحل مختلف رشد بر برخی ویژگی‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های اکسیدانی و عملکرد گل‌رنگ زراعی (*Carthamus tinctorius* L.)
فاطمه عسکری فروشانی، افراسیاب راهنما، موسی مسکرباشی، ایمان کامرانفر
- ۱۸۹ اثر محلول‌پاشی روی و آهن در مراحل مختلف نمو بر ویژگی‌های کمی و کیفی دانه دو رقم گندم دیم (*Triticum aestivum* L.)
شهرنوش عجم، عباس بیابانی، رحمت‌اله محمدی، علی راحمی کاریزکی، حجت قربانی واقعی
- ۲۰۳ تأثیر ۱-۲۴ پی‌براسینولید و عصاره گل کلم (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) بر عملکرد دانه و برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی ارقام حساس و متحمل به شوری کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.)
روژین سهرابی، علیرضا پیرزاد، محسن نیازخانی، تورج میرمحمودی
- ۲۲۹ اثر محلول‌پاشی آهن و اسید سالیسیلیک بر خصوصیات رشدی و عملکرد کنگد (*Sesamum indicum* L.) در شرایط کم‌آبایی
محمدبهبزاد امیری، محمد سپهری بیمرغی، عاطفه میرزائیان



Comparison of Yield and Quality of Forage in the Intercropping of Rye (*Secale cereale* L.) and Vetch (*Vicia villosa* Roth.) under Different Tillage Systems

T. Salavati¹, Gh. Heidari^{1*}, M. Majidi², Sh. Khalesro¹

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

2- Agricultural Jihad Organization of Kurdistan Province, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding author's Email: g.heidari@uok.ac.ir)

Received: 13 May 2024
Revised: 02 October 2024
Accepted: 07 October 2024
Available Online: 11 March 2025

How to cite this article:

Salavati, T., Heidari, Gh., Majidi, M., & Khalesro, Sh. (2025). Comparison of Yield and Quality of Forage in the Intercropping of Rye (*Secale cereale* L.) and Vetch (*Vicia villosa* Roth.) under Different Tillage Systems. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 109-129. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.88050.1325>

Introduction

Conservation tillage systems are a key component of sustainable agricultural management, significantly contributing to the improvement of soil's physical, biological, and chemical properties. One of effective factors in increasing sustainable production is the intercropping of crops and fodder. In addition to increasing the diversity of economic resources of the farm, intercropping increases the yield per unit area, biodiversity and efficient use of resources and reduces possible damage from pests and diseases. One of the common types of forage intercropping is the mixed crop of legumes and cereals. Cereals are at a high level in terms of dry matter, but they are poor in terms of protein, and on the other hand, legumes are at a high level in terms of protein. Therefore, the mixture of cereals and legumes will lead to the production of high-quality forage. Since the effects of the combined use of mixed cropping and conservation tillage on fodder production have been less evaluated, and considering the importance of vetch and rye crops in fodder production and livestock feeding, improving soil fertility and production stability in agroecosystems, it seems necessary to evaluate the effect of mixed cultivation of these plants in different tillage systems.

Materials and Methods

In order to investigate the effect of different tillage systems on intercropping of rye (*Secale cereale* L.) and vetch (*Vicia villosa* Roth), an experiment was carried out in the cropping year of 2018-2019 in the Gariza Agricultural Research Station of Sanandaj. The experiment was carried out as a split plot based on a randomized complete block design in three replications. Tillage methods include no tillage, reduced tillage and conventional tillage as the main factor and rye and vetch intercropping system in 5 levels including 100% vetch, 75% vetch + 25% rye, 50% vetch + 50% rye, 25% vetch + 75% rye and 100% rye were considered as secondary factor. In conventional tillage system, reversible plow and disk were used, and in reduced tillage system, goose claw was used for plowing. In all three tillage systems, sowing of two crops was done simultaneously and manually on 15th of October. The studied traits included the number of nodes in the hairy vetch root, dry forage yield of hairy vetch and rye, land equivalent ratio, neutral and acid detergent insoluble fiber, digestible dry matter, and ash percentage. SAS 9.1 software was used to analyze the data and LSD test was used to compare the average of the treatments. Graphs were also drawn using Excel.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

 <https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.88050.1325>

Results and Discussion

The results of analysis of variance showed that dry forage yield of rye and hairy vetch was influenced by the intercropping pattern and tillage systems. Among the mixed cropping combinations, the highest dry forage yield of rye (1625 kg ha^{-1}) was achieved in the treatment of 75% rye + 25% hairy vetch under conventional tillage, which did not show a significant difference compared to the treatment of 75% rye + 25% hairy vetch under reduced tillage. In all studied tillage systems, the 50% vetch and 50% rye intercropping pattern had a higher land equivalent ratio (LER). The lowest total LER was related to the conventional tillage system and the treatment of 75% vetch + 25% rye. Assessment of the forage quality showed that the insoluble fibers in acidic (ADF) and neutral (NDF) detergent in conventional tillage and rye monoculture were more than other treatments. The amounts of ADF and NDF were reduced in low tillage and no tillage systems. Also, by increasing the proportion of vetch in intercropping treatments, the amount of insoluble fibers in acidic (ADF) and neutral (NDF) detergents decreased. The highest digestible dry matter (DMD) was in the reduced tillage treatment. The percentage of forage ash in the mixed cropping treatment with the combination of 75% vetch and 25% rye was higher than other ratios of mixed cropping.

Conclusion

According to the results of the present experiment, the high value of land equivalent ratio (LER) in intercropping patterns indicates a better utilization of the unit of land area in intercropping. Overall, to maximize forage yield and enhance forage quality, the findings clearly demonstrate that intercropping outperforms monoculture for the crops studied.

Keywords: Conservation tillage, Forage digestibility, Forage yield, Land equivalent ratio

مقاله پژوهشی

جلد ۲۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۰۹-۱۲۹

مقایسه عملکرد و کیفیت علوفه در کشت مخلوط چاودار (*Secale cereale* L.) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa* Roth.) تحت سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی

طالب صلواتی^۱، غلامرضا حیدری^{۱*}، محمد مجیدی^۲، شیوا خالص‌رو^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶

چکیده

به منظور بررسی تأثیر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی در کشت مخلوط چاودار (*Secale cereale* L.) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa* Roth) آزمایشی در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. روش‌های خاک‌ورزی شامل بدون خاک‌ورزی، کم خاک‌ورزی و خاک‌ورزی رایج به عنوان فاکتور اصلی و الگوهای کشت مخلوط چاودار و ماشک در پنج سطح شامل ۱۰۰ درصد ماشک، ۷۵ درصد ماشک + ۲۵ درصد چاودار، ۵۰ درصد ماشک + ۵۰ درصد چاودار، ۲۵ درصد ماشک + ۷۵ درصد چاودار و ۱۰۰ درصد چاودار به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. صفات مورد مطالعه شامل تعداد گره در ریشه ماشک، عملکرد علوفه خشک ماشک و چاودار، نسبت برابری زمین، الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و خنثی، ماده خشک قابل هضم و درصد خاکستر بود. نتایج نشان داد که در بین ترکیب‌های کشت مخلوط، بیشترین عملکرد علوفه خشک چاودار (1625 kg ha^{-1}) در تیمار ۷۵ درصد چاودار + ۲۵ درصد ماشک و در سیستم خاک‌ورزی متداول حاصل شد که با تیمار ۷۵ درصد چاودار + ۲۵ درصد ماشک در سیستم خاک‌ورزی کاهش یافته اختلاف معنی‌داری نداشت. در تمامی سیستم‌های خاک‌ورزی مورد آزمایش، الگوی کشت ۵۰ درصد ماشک + ۵۰ درصد چاودار، نسبت برابری زمین (LER) بالاتری داشت. بررسی نتایج کیفیت علوفه نشان داد که الیاف نامحلول در شوینده اسیدی (ADF) و خنثی (NDF) در خاک‌ورزی رایج و کشت خالص چاودار بیشتر از سایر تیمارهای مورد آزمایش بود، در حالی که با افزایش نسبت ماشک در کشت مخلوط، مقدار الیاف نامحلول کاهش پیدا کرد. بیشترین ماده خشک قابل هضم (DMD) به میزان ۴۴۵/۶ گرم بر کیلوگرم به تیمار شخم کاهشی مربوط بود. این یافته‌ها بر پتانسیل استفاده از خاک‌ورزی حفاظتی و سیستم‌های کشت مخلوط به عنوان راهبردهای مؤثر کشاورزی برای افزایش کمیت و کیفیت تولید علوفه تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: خاک‌ورزی حفاظتی، عملکرد علوفه، قابلیت هضم علوفه، نسبت برابری زمین

مقدمه

سیستم خاک‌ورزی فراهم می‌شود (Schillinger, Young, Kennedy, & Paulitz, 2010). در روش رایج خاک‌ورزی، بستر رشد گیاهان از طریق مخلوط کردن بقایای احتمالی باقی مانده با خاک و حذف آن‌ها از سطح خاک و همچنین شکستن چرخه زندگی موجودات خاک‌زی انجام می‌گیرد (Issaka et al., 2019). علاوه بر موارد مذکور، عدم کشت به موقع محصول، فرسایش بادی و آبی، کاهش ماده آلی خاک، تخریب ساختمان خاک، مصرف آب زیاد، مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی برای آماده سازی بسترکاشت و در نهایت افزایش هزینه‌های تولید و از بین بردن بقایای گیاهی از معایب این سیستم می‌باشد (Bagnall et al., 2020). با توجه به وجود آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک در ایران، حفظ بقایای گیاهی در خاک و اعمال روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی یکی از راهکارهای رفع این

عملیات خاک‌ورزی و آماده‌سازی بستر به تنهایی بخش مهمی از هزینه‌های تولید گیاهان زراعی را به خود اختصاص می‌دهد و می‌تواند بر خصوصیات خاک نظیر رطوبت، دما و فشردگی خاک مؤثر باشد (Bagnall, Jones, Balke, Morgan, & McBratney, 2020). ایجاد بستر مناسب رشد گیاهان با انتخاب و اجرای صحیح یک

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان، سنندج، ایران

(Email: g.heidari@uok.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88050.1325>

۲۸/۶، ۱۰/۹، ۱۹/۶ و ۱۷/۱ درصد افزایش داشتند (Javanmard et al., 2022).

کشت مخلوط به عنوان یکی از مهم ترین سیستم های کشاورزی قابل اجرا در بسیاری از کشورهای توسعه یافته شناخته شده که به جهت تنوع محصولات و افزایش سود حاصله در واحد سطح و زمان از اهمیت ویژه ای برخوردار است (Mohavieh-Asadi, Bijanzadeh, Behpouri, & Barati, 2020). در همین راستا، یکی از عوامل تشکیل دهنده و مؤثر در افزایش تولید پایدار، سیستم کشت مخلوط گیاهان زراعی و علوفه ای می باشد. کشت مخلوط به غیر از بالا بردن تنوع منابع اقتصادی مزرعه، باعث افزایش عملکرد در واحد سطح، استفاده کارآمدتر از منابع، کاهش خسارت احتمالی آفات و بیماری ها، افزایش تنوع زیستی و تغذیه مطلوب تر انسان و دام و کاهش خسارت آفات می شود (Shahbazi, Jalilian, Alizadeh, & Javanmard, 2022). هدف اصلی از کشت مخلوط گیاهان علوفه ای، افزایش عملکرد در واحد سطح و کیفیت محصول می باشد و در اغلب موارد از گیاهان خانواده بقولات و غلات استفاده می شود. غلات از نظر ماده خشک در سطح بالایی قرار دارند، ولی از حیث پروتئین فقیر هستند و در نقطه مقابل، بقولات از نظر میزان پروتئین در سطح بالایی قرار دارند. از این رو، مخلوط غلات و بقولات منجر به تولید علوفه ای با کیفیت بالا خواهد شد (Heydarpour, Namdari, & Baghbani-Arani, 2018).

چاودار با نام علمی *Secale cereale* گیاهی از تیره Poaceae است که دارای رشد بسیار سریع و تولید زیست توده ای بالا می باشد، جهت تقویت مواد آلی خاک، افزایش میزان نفوذپذیری خاک، کمک به حفظ رطوبت موجود در خاک، زیست توده متراکم، داشتن ترکیب های دگرآسیب و همچنین مهار فرسایش های بادی و آبی از مناسب ترین گیاهان در کشت های مخلوط می باشد (Pinnamaneni, Mubvumba, Anapalli, & Reddy, 2022). ماشک نیز از تیره بقولات و جزء گیاهان یک ساله محسوب است که از مهم ترین فواید کشت آن تثبیت نیتروژن در خاک، جلوگیری از فرسایش خاک، تهیه علوفه تازه و خشک برای دام ها، تهیه کود سبز، مهار علف های هرز تابستانه و رعایت تناوب زراعی و جلوگیری از آلودگی آب های زیرزمینی را می توان نام برد. این گیاه دارای گره هایی روی ریشه است که حاوی باکتری بوده و می توانند نیتروژن هوا را تثبیت نمایند. این گیاه چون دارای استقرار سریع تر، ایجاد پوشش مناسب بر روی سطح خاک، رشد خوب و تحمل تراکم بالا و همچنین تثبیت نیتروژن بالا است، می تواند به عنوان یک گیاه مطلوب برای استفاده در کشت مخلوط و یا استفاده به عنوان کود سبز و یا به عنوان گیاه پوششی مورد استفاده قرار گیرد (Shahbazi et al., 2022).

در کشت مخلوط غلات با گیاهان تیره بقولات، به دلیل استفاده بهینه از نور و استفاده از نیتروژن تولید شده بقولات توسط گیاهان تیره

مشکلات می باشد (Asadi, Rezaei-Chiyaneh, & Amirnia, 2019). خاک ورزی، از طریق ایجاد تغییر در خصوصیات خاک، به پایداری کشاورزی و بهبود کیفیت خاک منتهی می گردد و یکی از مهم ترین عملیات زراعی مؤثر در تعیین خصوصیات فیزیکی (بافت و وزن مخصوص ظاهری) و هیدرولیکی (نفوذ آب و میزان رطوبت) خاک می باشد (Gozubuyuk Sahin, Ozturk, Celik, & Adiguzel, 2014).

در مدیریت های تولید پایدار، سیستم های خاک ورزی حفاظتی یکی از مؤلفه های مهم به شمار می روند. این سیستم ها در بهبود خصوصیات فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی خاک نقش بسزایی دارند (Heidari Mohammadi, & Sohrabi, 2016). اجرای خاک ورزی حفاظتی در مقایسه با خاک ورزی رایج، در سطح خاک اختلال کمتری ایجاد می کند، به نیروی کار کمتری نیاز دارد و موجب افزایش ذخیره رطوبتی و ماده آلی خاک می شود (Simmons & Coleman, 2008). بنابراین، سیستم های خاک ورزی حفاظتی ضمن عدم کاهش عملکرد و کیفیت محصول، آسیب به خاک و مصرف انرژی را نیز کاهش می دهند و جایگزین مناسبی برای سیستم های خاک ورزی رایج به حساب می آیند (Heidari et al., 2016).

بر اساس مطالعات قبلی، رویکرد به کم خاک ورزی و بی خاک ورزی به کاهش هزینه ها و مصرف انرژی و استهلاک ادوات، صرفه جویی در زمان اجرای عملیات، حفظ محیط زیست و پایداری سیستم تولید در جهان منجر شده است (Issaka et al., 2019). در سیستم های خاک ورزی حفاظتی، کاهش هزینه های تولید نمی تواند دلیل برتری روش های کم خاک ورزی باشد و لازم است که این روش ها از نظر تأثیر بر عملکرد و کیفیت محصول گیاهان زراعی نیز ارزیابی شوند و پاسخ خاک به سیستم های خاک ورزی کاهش یافته منوط به یک دوران گذار است (Indoria, Srinivasa-Rao, Sharma, & Sammi Reddy, 2017). نتایج بررسی تأثیر بلندمدت روش های مختلف خاک ورزی نشان داد که روش بی خاک ورزی موجب افزایش عملکرد گندم (۶۶ درصد) نسبت به روش خاک ورزی حفاظتی در شرایط دیم شد (Chaghazardi, Jahansuz, Ahmadi, & Gorji, 2016). در تحقیقی دیگر، افضل نی و کرمی (Afzalnia & Karami, 2018) افزایش عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) را در روش بی خاک ورزی و کم خاک ورزی نسبت به خاک ورزی مرسوم گزارش کردند. در پژوهشی، اثر سیستم های خاک ورزی بر صفات رشدی، عملکرد و بازده اقتصادی نخود در شرایط دیم مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد که بین سیستم های مختلف خاک ورزی اختلاف معنی داری وجود داشت، به طوری که، بیشترین تعداد غلاف در بوته، ارتفاع بوته، تعداد شاخه اصلی و جانبی، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و عملکرد پروتئین در سیستم شخم کاهشی به دست آمد که نسبت به شخم مرسوم به ترتیب ۲۶/۴، ۱۶/۸، ۲۷/۴،

این، الگوهای کشت مذکور از بیشترین نسبت برابری زمین (LER)^۲ برخوردار بودند. توریفی و همکاران (Toreifi, Fateh, & Aynehband, 2018) در بررسی کشت مخلوط شنبليله (*Trigonella foenum-graecum* L.) و جو نشان دادند که بیشترین وزن خشک مخلوط (۱۲۷۷ گرم در مترمربع) و بیشترین نسبت برابری زمین (۱/۱۵) از تیمار کشت مخلوط افزایشی ۲۰ درصد شنبليله با جو به دست آمد. بالاترین درصد پروتئین خام و قابلیت هضم ماده خشک و خاکستر علوفه از کشت خالص شنبليله به دست آمد. همچنین این محققان گزارش کردند که وجود شنبليله در کشت مخلوط با جو باعث افزایش کیفیت مخلوط می‌شود، چون هر چه میزان شنبليله در کشت مخلوط بیشتر باشد، میزان پروتئین در آن نسبت مخلوط افزایش و میزان الیاف نامحلول اسیدی و خنثی کمتر و به‌دنبال آن کیفیت و خوش‌خوراکی آن افزایش می‌یابد. با وجود اقلیم خشک در کشور و کاهش حاصلخیزی خاک، افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیاز به بهره‌گیری از سیستم‌های کشاورزی حفاظتی در جهت حفظ و ثبات عملکرد و پایداری و تعادل عوامل زیست‌محیطی امری لازم به نظر می‌رسد. از سوی دیگر با توجه به مرور تحقیقات انجام‌شده، از آنجایی که اثرات کاربرد ترکیبی کشت مخلوط و خاک‌ورزی حفاظتی بر تولید علوفه کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است و نیز با توجه به اهمیت دو گیاه ماشک و چاودار در تولید علوفه و تغذیه دام، اصلاح حاصلخیزی خاک و ثبات تولید در آگرواکوسیستم‌ها و ارزیابی اثر کشت مخلوط این گیاهان در سامانه‌های خاک‌ورزی مختلف، این آزمایش با اهداف بررسی تأثیر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی بر عملکرد علوفه و خصوصیات کیفی چاودار و ماشک در کشت مخلوط سری‌های جایگزینی طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ به‌صورت دیم در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گریزه با مشخصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۴۰۵ متر از سطح دریا، واقع در شهرستان سنندج انجام شد. اطلاعات مربوط به میزان بارندگی و درجه حرارت محل اجرای آزمایش و برخی مشخصات خاک زراعی محل اجرای آزمایش به‌ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

گرامینه، عملکرد کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی افزایش پیدا می‌کند. مخلوط غلات و لگوم می‌تواند منجر به جذب کارآمدتر منابع محدودکننده رشد و افزایش و تثبیت عملکرد شود (Neugschwandtner & Kaul, 2015). نقش لگوم‌ها نیز به‌عنوان منبع مهمی در جیره غذایی تغذیه انسان، دام و افزایش حاصلخیزی خاک شناخته شده است (Stagnari, Maggio, Galieni, & Pisante, 2017).

در یک تحقیق، ترکیب جو (*Hordeum vulgare* L.) و ماشک (*Vicia sativa* L.) در نسبت‌های مختلف، بوته‌های ماشک از نظر فیزیکی توسط جو حمایت می‌شوند که این موضوع به استقرار و نمو بهتر بوته و در نهایت عملکرد بالاتر منجر می‌گردد (Heydarpour et al., 2018). افزایش تعداد گره‌های تثبیت‌کننده نیتروژن نیز در این سامانه، میزان دسترسی و جذب نیتروژن را افزایش می‌دهد (Asadi et al., 2019). از طرفی دیگر، کشت مخلوط گندم- نخود سبب افزایش حاصلخیزی خاک گردیده و به‌عنوان یک روش سازگار با محیط زیست به‌واسطه کاهش نیاز به مصرف کودهای شیمیایی توصیه گردیده است (Akhtar, Jamil, Ahamd, & Abbasi, 2017). کشت مخلوط ذرت (*Zea mays* L.) و سویا (*Glycine max* L.) باعث افزایش عملکرد دانه ذرت و افزایش تولید در سویا شده است که منجر به تعادل بالای تولید محصول و پایداری کشاورزی می‌شود (Du et al., 2018). نتایج تحقیقی دیگر نشان داد که کشت مخلوط اثر معنی‌داری بر کلیه صفات عملکرد و اجزای عملکرد مورد بررسی تربیتکاله داشت، به‌طوری‌که بیشترین عملکرد دانه تربیتکاله از کشت خالص و کمترین عملکرد دانه از کشت مخلوط تربیتکاله با ماشک گل‌خوشه‌ای (*Vicia villosa* Roth) به دست آمد (Salehi, Amirnia, Rezaei-Chiyaneh, & Khalilvandi-Behrozyar, 2018). نتایج یک بررسی حاکی از آن بود که مخلوط لگوم و گراس از طریق کاهش شاخص‌های NDF و ADF^۱ کیفیت علوفه را افزایش می‌دهد (Van der Werf et al., 2021). نتایج تحقیق صالحی و همکاران (Salehi et al., 2018) نشان داد که کشت مخلوط بر تمامی خصوصیات زراعی و کیفی علوفه مؤثر بوده است و از طریق کاهش NDF و ADF موجب افزایش کیفیت علوفه شد. در تحقیق دهقانیان و همکاران (Dehghanian, Barmaki, Dabbagh-Mohamadi-Nasab, & Seifdavati, 2020) که روی کشت مخلوط جو، تربیتکاله (*Triticosecale* Withmack)، یولاف (*Avena sativa* L.) و خلر (*Lathyrus sativus* L.) در سه الگوی کشت ۲۵:۱۰۰، ۵۰:۱۰۰ و ۵۰:۸۰ انجام گرفت، مشاهده شد که بین تیمارهای مخلوط، ترکیب جو + خلر و یولاف + خلر (۵۰:۸۰) بیشترین کمیت و کیفیت علوفه را به خود اختصاص دادند. علاوه‌بر

1- Neutral detergent fiber

2- Acid detergent fiber

جدول ۱- بارندگی ماهیانه و حداقل و حداکثر دمای مکان آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸

Table 1- Monthly precipitation and minimum and maximum temperatures of the test location in the agricultural year 2018-2019

پارامترهای هواشناسی Meteorological parameters	دی Jan.	بهمن Feb.	اسفند Mar.	فروردین Apr.	اردیبهشت May	خرداد Jun.	تیر Jul.	مرداد Aug.	شهریور Sep.	مهر Oct.	آبان Nov.	آذر Dec.
بارندگی Precipitation (mm)	145.4	58.5	176.2	114.2	10.5	2.3	0	1.3	0.1	15.2	67.5	120.3
حداقل دما Minimum temperature (°C)	6.9	8.9	13.8	19.8	28.7	33.7	36.6	37.5	30.7	27.7	14.8	12.9
حداکثر دما Maximum temperature (°C)	-11.9	-5.9	-5.8	-1.0	6.9	11.9	11.9	11.6	9.9	1.0	-2.9	-7.0

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه قبل از اجرای آزمایش

Table 2- Physical and chemical characteristics of farm soil before the experiment

رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	بافت Texture	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	pH	کربن آلی Organic carbon (%)	نیتروژن N (%)	فسفر قابل جذب P (ppm)	پتاسیم قابل جذب K (ppm)
34	36	30	لومی رسی	0.9	7.3	0.77	0.093	11	170

و مناسب برای کشت مخلوط با غلات) با تراکم ۲۰۰ بوته در مترمربع (Renzi, Chantre, & Cantamutto, 2016) و چاودار رقم دانکو^۱ (تیپ رشد پاییزه، متوسط ارتفاع بوته ۱۴۰ سانتی متر، میانگین وزن هزار دانه ۲۶ گرم، رنگدانه تیره، کیفیت نانوائی خوب، نیمه مقاوم نسبت به خوابیدگی و ریزش دانه، متحمل به سرما، مقاوم به زنگ‌های زرد و قهوه‌ای) با تراکم ۴۰۰ بوته در مترمربع (Schlegel, 2013) کاشته شدند و در تیمارهای ترکیبی با توجه به نسبت هر گیاه، تراکم مورد نظر اعمال گردید. در هر کرت ۱۰ ردیف با فاصله ۳۵ سانتی متر کشت شدند. طول خطوط کاشت چهار متر بود. در طول اجرای آزمایش، مراقبت‌های زراعی از قبیل مهار علف‌های هرز اعمال شد.

عملیات برداشت علوفه هنگامی انجام شد که ۵۰ درصد از بوته‌های ماشک به گل رفته بودند. در این زمان، بوته‌های چاودار در مرحله شیری و ابتدای خمیری بودند. بدین صورت که بعد از حذف دو ردیف از هر طرف و ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای تمام ردیف‌ها برای تعیین عملکرد بیولوژیک هر دو گونه گیاهی، دو مترمربع از هر کرت برداشت شد. جهت اندازه‌گیری عملکرد علوفه خشک، نمونه‌های تر به مدت ۴۸ ساعت در داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و وزن خشک نمونه‌ها توسط ترازوی دیجیتال برحسب گرم در مترمربع اندازه‌گیری و به کیلوگرم در هکتار تعمیم داده شدند.

آزمایش به صورت اسپلیت پلات و بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. سطوح خاک‌ورزی به عنوان عامل اصلی شامل شخم رایج، کم خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی بود. کشت مخلوط نیز به عنوان عامل فرعی در پنج سطح شامل کشت خالص چاودار، کشت خالص ماشک، ۲۵ درصد ماشک + ۷۵ درصد چاودار، ۵۰ درصد ماشک + ۵۰ درصد چاودار و ۲۵ درصد چاودار + ۷۵ درصد ماشک بود. زمین مورد آزمایش، سال زراعی قبل زیر کشت نخود بود که بقایای آن حفظ شده بود. فاصله بین تکرارها چهار متر و در هر تکرار، فاصله بین سیستم‌های خاک‌ورزی دو متر در نظر گرفته شد. اندازه کرت‌های اصلی ۴ × ۱۲ منظور شد. در سیستم خاک‌ورزی مرسوم از گاوآهن برگردان‌دار و دیسک و در سیستم کم خاک‌ورزی از پنجه غازی برای انجام شخم استفاده شد. با توجه به نتایج آزمایش خاک، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر (P₂O₅) از منبع سوپرفسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم کود پتاسیم (K₂O) از منبع سولفات قبل از کاشت در زمین پخش شد. همچنین در بهار، مقدار ۶۰ کیلوگرم کود نیتروژن از منبع اوره به صورت سرک به تمامی تیمارها داده شد. در هر سه سیستم خاک‌ورزی، کشت دو گیاه به طور هم‌زمان و به صورت دستی در تاریخ ۱۱ مهر ماه ۱۳۹۷ انجام شد. به منظور دستیابی به تراکم مناسب کشت در تیمارهای کشت خالص، ماشک گل‌خوشه‌ای (*Vicia villosa* Roth.) رقم گلشن (تیپ رشد پاییزه، سازگاری بالا به اقلیم سرد و معتدل کشور، ارتفاع بوته بیشتر نسب به سایر ارقام، عملکرد علوفه بالا، متحمل به خشکی، داشتن تیپ رونده

1- Danko

عناصر غذایی موجود در خاک را به همراه خواهد داشت. این رفتار کلی به طور مستقیم با اختلالات مکانیکی ایجادشده توسط خاک‌ورزی مرتبط است که ممکن است بر گسترش گره‌های ریشه و در نتیجه امکان ارتباط باکتری ریزوبیوم با گیاهان تأثیر بگذارد (Oehl & Koch, 2018). در آزمایشی روی کشت مخلوط تریتیکاله و باقلا (*Vicia faba* L.) مشاهده شد که بیشترین تعداد گره به تیمار کشت مخلوط این دو گیاه مربوط بوده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Sori et al., 2020).

عملکرد علوفه خشک چاودار

جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) بیانگر آن بود که اثر متقابل سیستم خاک‌ورزی و الگوی کشت بر عملکرد علوفه خشک چاودار در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل روش‌های خاک‌ورزی در نسبت‌های تراکمی نشان داد که کشت خالص چاودار با میانگین ۱۸۴۰ کیلوگرم در هکتار در روش خاک‌ورزی متداول بیشترین مقدار علوفه خشک را داشت که با همین الگوی کشت در سطوح خاک‌ورزی بدون شخم (۱۸۳۳ کیلوگرم در هکتار) و شخم کاهش‌یافته (۱۸۳۳ کیلوگرم در هکتار) اختلاف معنی‌داری نداشت. در بین الگوهای کشت مخلوط، تیمار جایگزینی ۷۵ درصد چاودار و ۲۵ درصد ماشک در سیستم خاک‌ورزی متداول، بیشترین عملکرد علوفه‌ی خشک را داشت که اختلاف آن با تیمار ۷۵ درصد چاودار و ۲۵ درصد ماشک در خاک‌ورزی کاهش‌یافته معنی‌دار نبود. عملکرد علوفه خشک چاودار در تیمار ۷۵ درصد ماشک و ۲۵ درصد چاودار در هر سه سیستم خاک‌ورزی در سطح مشابه آماری قرار داشت (شکل ۲). احسانی‌فر و همکاران (Ehsanifar, Dahmardeh, & Khammari, 2015) در آزمایشی روی کشت مخلوط ارزن و گاوآینه نشان دادند که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی از لحاظ عملکرد بیولوژیک تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند، اما نسبت‌های مختلف کشت مخلوط از لحاظ این صفت از اختلاف معنی‌داری برخوردار بودند. پوریوسف و علیزاده (Pooryousef & Alizadeh, 2018) بیان کردند که بیشترین عملکرد علوفه خشک جو نیز در کشت خالص آن به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با کشت مخلوط دو سهم جو و یک سهم ماشک نداشت. نتایج تحقیق صالحی و همکاران (Salehi et al., 2018) نشان داد که کاهش عملکرد علوفه خشک تریتیکاله در الگوهای مختلف کشت مخلوط، در مقایسه با کشت خالص ممکن است به دلیل بالا بودن رقابت لگومها با تریتیکاله و یا عدم انتقال نیتروژن کافی باشد. محققان اظهار داشتند که کمتر بودن عملکرد علوفه خشک تریتیکاله در کشت مخلوط با ماشک گل‌خوشه‌ای نسبت به سایر تیمارها، به دلیل رشد سریع و بیشتر ماشک گل‌خوشه‌ای در مقایسه با سایر لگومها و افزایش رقابت برون‌گونه‌ای باشد.

همچنین اندازه‌گیری نسبت برابری زمین (LER) در هر سه سیستم خاک‌ورزی و در تمام ترکیب‌های کشت مخلوط با استفاده از روابط (۱) و (۲) انجام شد (Yilmaz, Atak, & Erayman, 2008):

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{LERt} = \text{LERa} + \text{LERb}$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{LERt} = \text{Yab/Ya} + \text{Yba/Ya}$$

که در آن، LERa و LERb: به ترتیب، بیانگر نسبت برابری زمین برای گونه a و گونه b می‌باشد، Yab و Yba: به ترتیب نشان‌دهنده عملکرد گونه a و b در کشت مخلوط هستند، از سوی دیگر، Ya: بیانگر عملکرد گونه a در کشت خالص و Yb: به مفهوم عملکرد گونه b در کشت خالص می‌باشد و LERt: نیز نشان‌دهنده مجموع کل نسبت برابری زمین برای دو گونه مورد مطالعه می‌باشد.

در این آزمایش، شاخص‌های مرتبط با کیفیت علوفه شامل درصد خاکستر (AOAC, 1990)، هضم‌پذیری ماده خشک قابل هضم (DMD) به روش اودی و همکاران (Oddy, Robards, & Low, 1983)، الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDF) و الیاف نامحلول در شوینده اسیدی (ADF) به روش وان سوست و همکاران (Van Soest, Robertson, & Lewis, 1991) اندازه‌گیری شدند.

قبل از تجزیه واریانس، آزمون نرمال بودن داده‌ها انجام شد و پس از اطمینان از توزیع نرمال داده‌ها، برای تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار SAS 9.1 و برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون LSD در سطح احتمال یک و پنج درصد استفاده گردید. همچنین رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

تعداد گره در ریشه ماشک

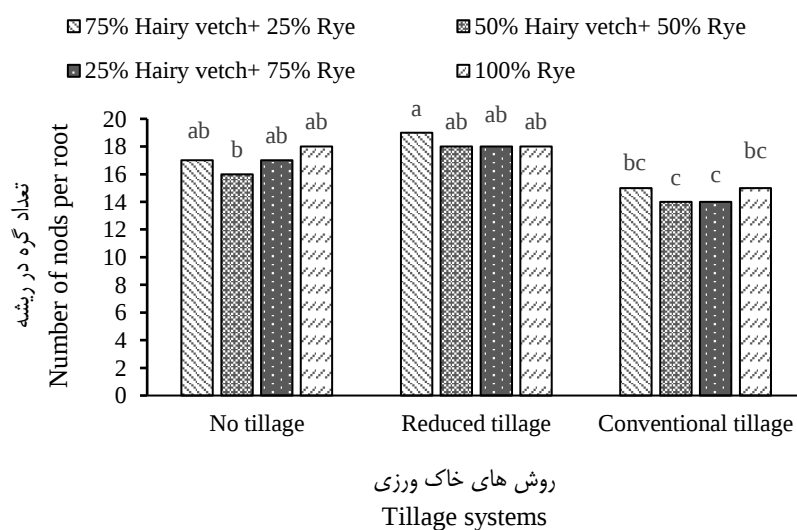
جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) بیانگر آن بود که اثر خاک‌ورزی و اثر متقابل سیستم خاک‌ورزی و الگوی کشت بر تعداد گره در ریشه ماشک در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل عامل‌ها نشان داد که در روش کم‌خاک‌ورزی، اختلاط تراکمی ۷۵ درصد ماشک و ۲۵ درصد چاودار با ۱۹ عدد گره در ریشه بیشترین تعداد گره را داشت، ولی با سایر سطوح کشت مخلوط در تیمار کم‌خاک‌ورزی اختلاف معنی‌دار نداشت. در روش خاک‌ورزی متداول، نسبت‌های مختلف کشت مخلوط از کمترین تعداد گره در ریشه برخوردار بودند و با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۱). به نظر می‌رسد که به هم‌خوردگی خاک و تخریب ساختمان خاک در روش‌های متداول خاک‌ورزی، از بین رفتن مواد آلی و کاهش

- 1- Land equivalent ratio
- 2- Digestible dry matter
- 3- Neutral detergent fiber
- 4- Acid detergent fiber

جدول ۳- تجزیه واریانس عملکرد علوفه تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و نسبت‌های کشت مخلوط چاودار و ماشک
Table 3- ANOVA for forage yield affected by tillage methods and intercropping ratios of rye and vetch

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (MS)		
		تعداد گره ریشه ماشک Number of root nuds in vetch	عملکرد علوفه خشک چاودار Yield of dry rye forage	عملکرد علوفه خشک ماشک Yield of dry vetch forage
بلوک Replication	2	3.9 ^{ns}	23557.2*	636.7 ^{ns}
سیستم خاک‌ورزی Tillage systems (T)	2	19.5**	45885.4*	69027.1*
خطای ۱ Error 1	4	2.1	2621.4	4670.3
الگوی کشت Planting pattern (P)	3	2.7 ^{ns}	3009209.4**	5289065.5**
خاک‌ورزی × الگوی کشت T×P	6	5.7**	12415.5**	20893.3**
خطای ۲ Error 2	18	1.6	2132.9	6408.8
ضریب تغییرات C.V (%)	-	6.9	5.6	7.4

ns و **: به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.
ns and **: are non-significant and significant at 1% probability levels, respectively.



شکل ۱- مقایسه میانگین تعداد گره در ریشه ماشک تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و نسبت‌های کشت مخلوط با آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد

Figure 1- Mean comparison of number of nuds per root in hairy vetch under tillage systems and intercropping ratios with LSD 1%

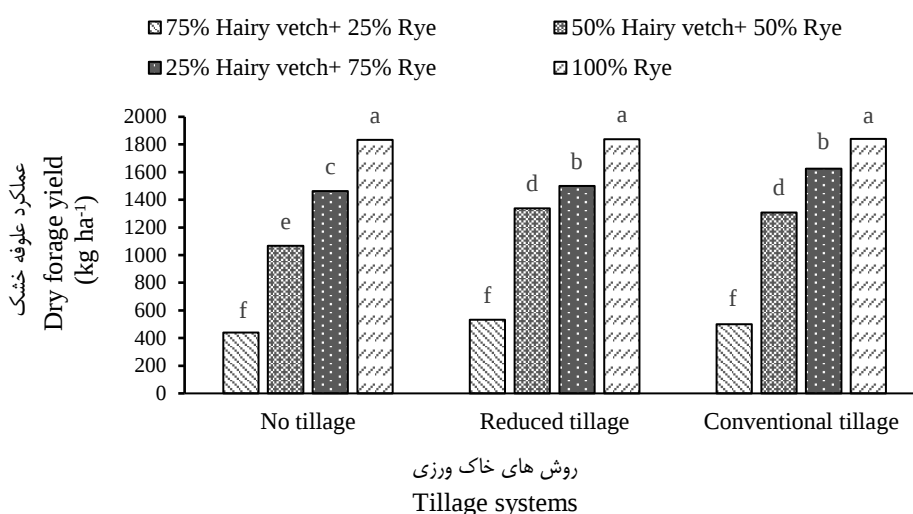
حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است
Similar letters indicate statistically insignificant differences.

نتایج پژوهش دیگری نشان داد که در کشت مخلوط نخود فرنگی با تریتیکاله، گندم و چاودار، بیشترین میزان عملکرد علوفه خشک، از کشت خالص تریتیکاله حاصل شد (Lithourgidis, 2021). در پژوهش دیگری، افزایش عملکرد علوفه خشک تریتیکاله در تیمار ۳۰ درصد ماشک + ۷۰ درصد تریتیکاله نسبت به سایر الگوهای کشت مخلوط

نتایج پژوهش دیگری نشان داد که در کشت مخلوط نخود فرنگی با تریتیکاله، گندم و چاودار، بیشترین میزان عملکرد علوفه خشک، از کشت خالص تریتیکاله حاصل شد (Lithourgidis, 2021). در پژوهش دیگری، افزایش عملکرد علوفه خشک تریتیکاله در تیمار ۳۰ درصد ماشک + ۷۰ درصد تریتیکاله نسبت به سایر الگوهای کشت مخلوط

اختلاط به دست آمد، به طوری که بیشترین وزن خشک علوفه ذرت از تیمار ۲۵:۷۵ ذرت- سویا حاصل شد، که این تیمار از نظر آماری تفاوتی با تیمار کشت ۵۰:۵۰ ذرت- سویا نداشت (Baghdadi, Halim, Ghasemzadeh, & Ebrahimi, 2016). در کشت مخلوط ماشک و تریتیکاله عملکرد کل علوفه خشک حاصل از کشت مخلوط ۵۰:۵۰ ماشک- تریتیکاله، نسبت به سایر تیمارها برتری داشت.

گزارش شده است (Rabiee & Farahdahr, 2020). این افزایش می تواند ناشی از افزایش تراکم و همچنین الگوهای مکمل استفاده از منابع و اثرات متقابل تسهیل کنندگی بین دو گونه باشد. به نظر می رسد که در این ترکیب، از عوامل محیطی مؤثر در رشد از جمله نور خورشید، استفاده بهتری شده است (Ansar et al., 2010). براساس بررسی محققان، بیشترین وزن خشک کل علوفه سویا (*Glycine max*) و ذرت (*Zea mays* L.) از کشت مخلوط و نسبت های مختلف



شکل ۲- مقایسه میانگین عملکرد علوفه خشک چاودار تحت تأثیر روش های خاک ورزی و نسبت های کشت مخلوط با آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد

Figure 2- Mean comparison of yield of rye dry forage under tillage systems and intercropping ratios with LSD 1%

حروف همسان نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار است

Similar letters indicate statistically insignificant differences.

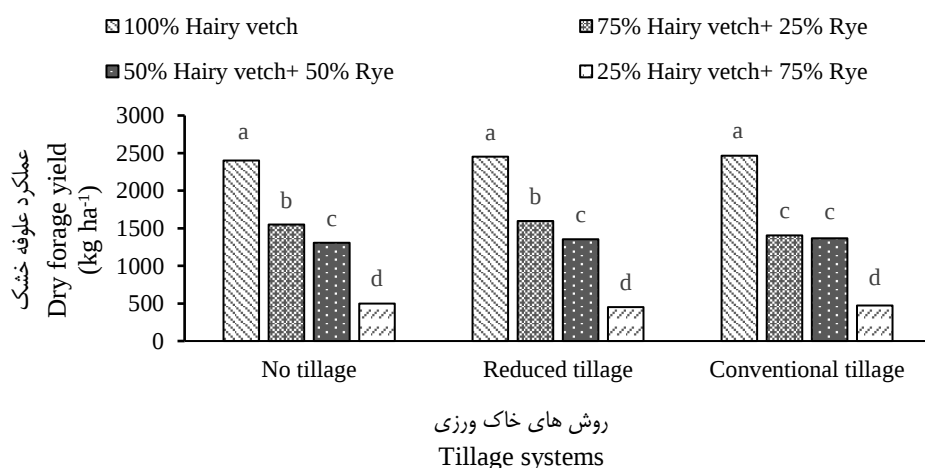
کاهش یافته و رایج بود (شکل ۳). بالا بودن عملکرد علوفه در الگوی کشت خالص در مقایسه با الگوهای کشت مخلوط ممکن است به دلیل بالا بودن رقابت بین گونه های در مقایسه با رقابت درون گونه ای باشد. در آزمایشی که روی کشت مخلوط بقولات یک ساله (خلر، نخود علوفه ای، ماشک گل خوشه ای و ماشک مجاری) با جو انجام شد گزارش گردید که بیشترین عملکرد علوفه خشک جو از کشت خالص جو به دست آمده است (Lamei Hervani, 2013). همچنین طی مطالعه ای گزارش گردید که ذرت در کشت مخلوط با لگومهایی مانند شبدر برسیم (*Trifolium alexandrinum*)، ماشک گل خوشه ای (*Vicia villosa* Roth)، لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) و گاودانه (*L. Vicia ervilia*) به ویژه ماشک گل خوشه ای و گاودانه، علوفه خشک کمتری در مقایسه با کشت خالص دارا بود که به دلیل رشد سریع این گیاهان در مقایسه با ذرت و افزایش رقابت برون گونه ای در مراحل اولیه رشد ذرت بود (Javanmard, Dabbagh- Mohammadi-Nasab, Javanshir, Moghaddam, &

عملکرد علوفه خشک ماشک گل خوشه ای

جدول تجزیه واریانس داده ها (جدول ۳) نشان داد که اثر متقابل سیستم خاک ورزی و الگوی کشت بر عملکرد علوفه خشک ماشک گل خوشه ای در سطح آماری یک درصد معنی دار بود. مقایسه میانگین اثر متقابل عامل های مورد مطالعه نشان داد که بیشترین عملکرد علوفه خشک ماشک متعلق به تیمار کشت خالص ماشک و خاک ورزی متداول با ۲۴۶۶/۹ کیلوگرم در هکتار مربوط بود که با تیمارهای ۱۰۰ درصد ماشک و خاک ورزی کاهش یافته و ۱۰۰ درصد ماشک و بدون خاک ورزی اختلاف معنی داری نداشت. در بین تیمارهای کشت مخلوط، بیشترین عملکرد علوفه خشک به تیمار ۷۵ درصد ماشک و ۲۵ درصد چاودار در خاک ورزی کاهش یافته مربوط بود. کمترین عملکرد علوفه خشک ماشک متعلق به تیمار ترکیب ۲۵ درصد ماشک و ۷۵ درصد چاودار به ترتیب معادل ۴۹۸/۷، ۴۵۳/۶ و ۴۷۴/۱ کیلوگرم در هکتار در سیستم خاک ورزی بدون شخم،

دانه نخود و تعداد سنبلچه در سنبله، تعداد دانه در سنبله، عملکرد دانه گندم تحت تأثیر الگوهای مختلف کشت قرار گرفتند، به طوری که بیشترین عملکرد دانه در هر دو گونه به کشت خالص تعلق داشت (Javanmard, Rostami, Nouraein, & Gharekhany, 2016). در بررسی افزایش رشد و عملکرد گندم و باقلا نشان داده شد که تعامل مثبت بین غلات و حبوبات می تواند باعث افزایش بهره‌وری سیستم کشت مخلوط شود (Xiao et al., 2018). در پژوهش دیگری که با هدف بررسی آرایش‌های مختلف کشت مخلوط جو و نخود فرنگی بر عملکرد علوفه و شاخص‌های رقابت مورد مطالعه قرار گرفت، بیشترین عملکرد نخودفرنگی (*Pisum sativum* L.) و جو در تیمار خالص مشاهده شد (Nakhzari Moghaddam, 2016). کشت مخلوط لگوم با غله باعث افزایش عملکرد علوفه غله و کاهش عملکرد علوفه لگوم شد. عملکرد بالاتر در کشت خالص غله نسبت به لگوم و کشت مخلوط توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است (Awal, Pramanik, & Hossein, 2007).

(Janmohammadi, 2009). افزایش عملکرد در کشت مخلوط می‌تواند ناشی از تفاوت سیستم ریشه‌ای دو گیاه باشد. گیاه چاودار دارای سیستم ریشه‌ای افشان و گیاه ماشک دارای سیستم ریشه‌ای عمیق می‌باشد که باعث می‌شود آب و مواد غذایی در لایه‌های مختلف خاک به راحتی توسط هر دو گیاه جذب شود. تثبیت بیولوژیک ازت موجود در هوا به وسیله ریشه ماشک می‌تواند یکی دیگر از عوامل موفقیت کشت مخلوط قلمداد شود. ویژگی‌های زراعی واریته‌های مختلف غلات دانه‌ریز و گیاهان علوفه‌ای، نسبت‌های کشت و رقابت بین اجزای ترکیب در کشت مخلوط، بر عملکرد و کیفیت علوفه تولیدی تأثیر می‌گذارد (Lamei Hervani, 2013). در آزمایشی مشاهده شد که کشت مخلوط اثر معنی‌داری بر صفات مورد مطالعه گیاه تریتیکاله داشت، بیشترین عملکرد دانه تریتیکاله از کشت خالص و کمترین عملکرد دانه از کشت مخلوط تریتیکاله با ماشک گل‌خوشه‌ای به دست آمد (Salehi et al., 2018). در ارزیابی زراعی، اکولوژیکی و اقتصادی کشت مخلوط گندم با نخود در شرایط دیم مراغه گزارش شد که تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در بوته، عملکرد



شکل ۳- مقایسه میانگین عملکرد علوفه خشک ماشک تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و نسبت‌های کشت مخلوط با آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد

Figure 3- Comparison of the average yield of dry vetch forage under tillage systems and intercropping ratios with LSD 1%

حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است
Similar letters indicate statistically insignificant differences.

علوفه‌ای + ۲۵ درصد چاودار و معادل ۰/۸۴ بود (جدول ۴). با توجه به بیشتر بودن LER جزئی چاودار در ترکیب‌های تراکمی برابر دو گیاه (کشت مخلوط ۵۰ درصد ماشک و ۵۰ درصد چاودار) می‌توان نتیجه گرفت که گیاه چاودار تأثیر مثبت بیشتری از کشت مخلوط گرفته است (جدول ۴). نسبت برابری زمین معیاری است که اغلب جهت ارزیابی در مؤثر بودن کشت مخلوط مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معیار مساحت زمین تک‌کشتی لازم برای تولید عملکرد برابر با یک هکتار کشت مخلوط را نشان می‌دهد. زمانی که LER بیشتر از یک

شاخص نسبت برابری زمین

کشت مخلوط ۵۰ درصد ماشک و ۵۰ درصد چاودار در همه سیستم‌های خاک‌ورزی از نسبت برابری زمین (LER) بیشتر از یک برخوردار بود و نسبت‌های تراکمی دیگر، مقادیر عددی پایین‌تری نسبت به ترکیب ذکر شده نشان دادند. بیشترین مقدار نسبت برابری زمین به کشت مخلوط ۵۰ درصد ماشک و ۵۰ درصد چاودار در سیستم خاک‌ورزی کاهشی معادل ۱/۲۸ مربوط بود. کمترین LER کل مربوط به سیستم خاک‌ورزی رایج و تیمار ۷۵ درصد ماشک

تفاوت در میزان توسعه عمقی و جانبی و همچنین افزایش تراکم ریشه‌ها در کشت مخلوط، باعث افزایش میزان جذب عناصر غذایی در مقایسه با کشت خالص می‌شود (Budakli & Celik, 2014) و این مسئله سبب افزایش تولید و به دنبال آن، افزایش نسبت برابری زمین می‌شود. همچنین علت افزایش LER را می‌توان به اختلافات مورفولوژیک و فیزیولوژیک بین گونه‌ها، تثبیت نیتروژن در خاک توسط گیاه لگوم و بهبود شرایط محیطی برای جزء دیگر مخلوط، استفاده بهتر از منابع محیطی، بهبود کارایی مصرف نور، کاهش فشار رقابتی بین دو گونه و زیست‌توده علف‌های هرز نسبت داد (Fateh, Tarighi, & Ayneband, 2018). افزایش نسبت برابری زمین در کشت مخلوط توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Xiao et al., 2018). پوریوسف و علیزاده (Pooryousef & Alizadeh, 2018)، نخزری مقدم (Nakhzari Moghaddam, 2016)، عاشوری و همکاران (Ashoori, Abdi, Golzardi, Ajali, 2016)، ربیعی و فرح‌دهر (Rabiee & Farahdahr, 2021) و نیز سودمندی کشت مخلوط را به کشت خالص گزارش نموده‌اند.

می‌شود، بدین معنی است که در کشت مخلوط، سودمندی وجود دارد و این موضوع نشان می‌دهد که تسهیل بین گونه‌ای بیشتر از رقابت بین گونه‌ای بوده است. در نقطه مقابل، اگر LER کمتر از یک باشد می‌توان نتیجه گرفت که کشت خالص سودمندی بیشتری دارد، و زمانی که این شاخص برابر یک باشد، هیچ‌کدام از این دو نظام نسبت به یکدیگر برتری ندارند (Metwally, Safina, & Noaman, 2015). اختلافات مورفولوژیک گندمیان و لگوم‌ها در نتیجه ایجاد اشکوب‌های مختلف و استفاده مکملی از منابع، بهره‌برداری بهتر از نور و یا افق‌های مختلف خاک می‌تواند دلیل نسبت برابری زمین بزرگ‌تر از یک باشد (Xiao et al., 2018). علاوه بر این، نتایج تحقیقات نشان داده است که برتری اکولوژیک کشت مخلوط، نتیجه استفاده کارآمد از منابع رشد است. اجزای مخلوط ممکن است از نظر استفاده از منابع رشد تفاوت داشته باشند و در صورتی که با هم کاشته شوند، استفاده مؤثرتری از منابع موجود نسبت به کشت جداگانه خواهند داشت. به عبارت دیگر، برتری بیولوژیک زراعت مخلوط به کشت خالص وقتی است که رقابت بین گونه‌ای برای منابع رشد نسبت به رقابت درون گونه‌ای کمتر باشد. اگر رقابت بین گونه‌ها شدید نباشد، کشت مخلوط بر تک کشتی برتری دارد (Metwally et al., 2015).

جدول ۴- مقایسه تیمارهای کشت مخلوط در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی با استفاده از شاخص نسبت برابری زمین

Table 4- Comparison of intercropping treatments in different tillage systems using the index of land equivalent ratio

تیمارها Treatments	سهم چاودار LER _{Rye}	سهم ماشک LER _{Vetch}	کل LER _{Total}
بدون خاک‌ورزی No tillage			
ماشک ۷۵٪ + چاودار ۲۵٪ Vetch 75%+Rye 25%	0.24	0.64	0.88
ماشک ۵۰٪ + چاودار ۵۰٪ Vetch 50%+Rye 50%	0.58	0.54	1.12
ماشک ۲۵٪ + چاودار ۷۵٪ Vetch 25%+Rye 75%	0.80	0.21	1.01
کم‌خاک‌ورزی Reduced tillage			
ماشک ۷۵٪ + چاودار ۲۵٪ Vetch 75%+Rye 25%	0.29	0.65	0.94
ماشک ۵۰٪ + چاودار ۵۰٪ Vetch 50%+Rye 50%	0.73	0.55	1.28
ماشک ۲۵٪ + چاودار ۷۵٪ Vetch 25%+Rye 75%	0.81	0.18	0.99
خاک‌ورزی متداول Conventional tillage			
ماشک ۷۵٪ + چاودار ۲۵٪ Vetch 75%+Rye 25%	0.27	0.57	0.84
ماشک ۵۰٪ + چاودار ۵۰٪ Vetch 50%+Rye 50%	0.71	0.55	1.26
ماشک ۲۵٪ + چاودار ۷۵٪ Vetch 25%+Rye 75%	0.88	0.19	1.07

از لحاظ درصد خاکستر کل علوفه دارای اختلاف معنی‌داری هستند (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که روش کم‌خاک‌ورزی دارای بیشترین (۵/۷۹ درصد) و تیمار بدون خاک‌ورزی دارای کمترین

مقایسه میانگین صفات مرتبط با کیفیت علوفه

درصد خاکستر کل

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که روش‌های مختلف خاک‌ورزی

(۵/۷۵ درصد) درصد خاکستر بودند (شکل ۴). به نظر می‌رسد که سیستم خاک‌ورزی حداقل از طریق افزایش مواد آلی سبب بالا رفتن سطح عناصر غذایی در خاک می‌شود که به تبع آن میزان خاکستر علوفه افزایش یافته است. نتایج یک بررسی نشان داد که علوفه‌های تولیدشده در شرایط خاک‌ورزی کاهش‌یافته دارای تعادل عناصر معدنی مطلوب‌تری هستند که منجر به افزایش محتوای خاکستر در مقایسه با علوفه‌هایی که تحت نظام‌های خاک‌ورزی رایج رشد می‌کنند، می‌شود (Nurjaya & Agung, 2012).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که درصد خاکستر در ترکیب تراکمی ۷۵ درصد ماشک و ۲۵ درصد چاودار نسبت به سایر ترکیب‌ها با مقدار ۶/۰۳ گرم بیشترین مقدار بود که با ترکیب تراکمی ۵۰ درصد ماشک و ۵۰ درصد چاودار اختلاف معنی‌داری نداشت، ولی با سایر ترکیبات تراکمی از اختلاف معنی‌داری برخوردار بود (شکل ۵). درصد خاکستر علوفه، میزان مواد معدنی موجود در بافت‌های گیاهی را نشان می‌دهد و از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت علوفه است. هرچه جذب عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن، بیشتر باشد، این عناصر سبب رشد بهتر ریشه و گسترش بیشتر آن در خاک می‌گردند که این امر سبب جذب بیشتر مواد معدنی و افزایش خاکستر کل می‌شود (Fateh et al., 2018). به نظر می‌رسد که درصد خاکستر در کشت مخلوط به‌دلیل مکمل بودن اجزای کشت مخلوط در جذب عناصر غذایی افزایش

می‌یابد. فاتح و همکاران (Fateh et al., 2018) نشان دادند که کشت مخلوط جو و شنبلیله، میزان خاکستر علوفه را نسبت به کشت خالص گیاه دارای خاکستر کم، افزایش و نسبت به کشت خالص گیاه دارای خاکستر زیاد، کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، احمدی و همکاران (Ahmadi, Fateh, & Aynehband, 2019) بیان کردند که با افزایش درصد ماشک گل‌خوشه‌ای در نسبت‌های کاشت، بر میزان خاکستر علوفه افزوده می‌شود. نتایج آزمایش عموری و همکاران (Amori, Roshanfekar, & Hasibi, 2017) نشان داد که هر چه سهم یولاف در کشت مخلوط بیشتر بود از درصد خاکستر علوفه کاسته شد، ولی این حالت برای گیاه ماشک بالعکس بود؛ به‌طوری‌که با افزایش سهم ماشک در کشت مخلوط، درصد خاکستر علوفه افزایش یافت. در برخی بررسی‌های صورت‌گرفته با مقایسه جداگانه، میزان خاکستر هر یک از گیاهان خانواده غلات و بقولات موجود در مخلوط، با افزایش درصد غله، میزان خاکستر علوفه کاهش و در بقولات افزایش یافته است. در کشت مخلوط غلات و بقولات اکثراً با افزایش میزان بقولات در ترکیب، روند کاهشی میزان خاکستر علوفه قابل مشاهده است که از جمله دلایل ذکرشده محققان می‌توان به استفاده بهتر غلات از منابع و عناصر غذایی در کشت مخلوط اشاره کرد (Pakgohar, Ghanbari, & Farahbakhsh, 2014).

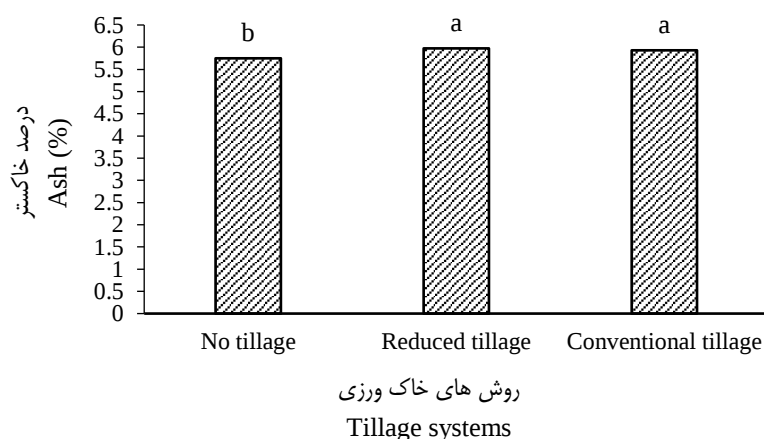
جدول ۵- تجزیه واریانس صفات مرتبط با کیفیت علوفه تحت اثر روش‌های خاک‌ورزی و الگوی کشت دو گیاه چاودار و ماشک

Table 5- ANOVA for traits related to forage quality affected by tillage systems and the planting pattern of rye and vetch

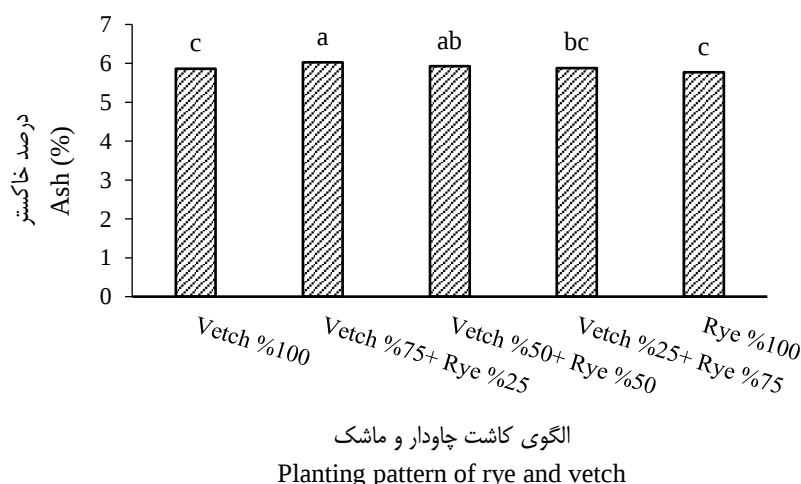
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares			
		خاکستر Ash	الیاف نامحلول در شوینده اسیدی Acid detergent fiber	الیاف نامحلول در شوینده خنثی Neutral detergent fiber	ماده خشک قابل هضم Digestible dry matter
بلوک Replication	2	6.15*	41.8 ^{ns}	11.4 ^{ns}	301.4 ^{ns}
سیستم خاک‌ورزی Tillage systems (T)	2	18.02**	23.8**	61.5*	1494.7*
خطای ۱ Error 1	4	0.72	6.36	4.6	177.2
الگوی کشت Planting pattern (P)	3	8.86*	59.39*	38.8*	752.1*
خاک‌ورزی × الگوی کشت T×P	6	4.44 ^{ns}	9.2 ^{ns}	6.22 ^{ns}	279.2 ^{ns}
خطای ۲ Error 2	18	2.14	20.53	11.00	262.4
ضریب تغییرات C.V (%)	-	2.5	2.5	1.8	3.7

ns و **: به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

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



شکل ۴- مقایسه میانگین درصد خاکستر کل متأثر از مختلف روش‌های خاک‌ورزی با آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد
 Figure 4- Comparison of the average percentage of total ash affected by different tillage methods with LSD 1%
 حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است
 Similar letters indicate statistically insignificant differences.



شکل ۵- مقایسه میانگین درصد خاکستر در نسبت‌های اختلاط ماشک و چاودار با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد
 Figure 5- Mean comparison of ash percentage in mixing ratios of vetch and rye with LSD 5%
 حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است
 Similar letters indicate statistically insignificant differences.

پرکن دام، برای پیش‌بینی مصرف اختیاری غذا مورد استفاده قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده پتانسیل مصرف علوفه توسط دام است (Salehi et al., 2018). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی روش‌های خاک‌ورزی از لحاظ آماری دارای اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال یک درصد بودند (جدول ۵). مقایسه میانگین نیز حاکی از آن بود که روش خاک‌ورزی متداول با میانگین ۳۲۳/۳ گرم بر کیلوگرم ماده خشک دارای بیشترین مقدار الیاف نامحلول در شوینده اسیدی بود و کمترین مقدار آن به روش بدون خاک‌ورزی مربوط بود که با روش کم‌خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۶). نتایج مقایسه میانگین اثر الگوی کشت بر این صفت نشان داد که کشت خالص چاودار دارای بیشترین مقدار الیاف نامحلول با ۳۱۱/۴ گرم بر

در کشت مخلوط افزایشی سورگوم (*Sorghum bicolor* L. Moench) و ارزن مرواریدی (*Pennisetum glaucum* L.)، کاهش درصد خاکستر علوفه را نشان داد که این نتیجه بیانگر اهمیت نوع گیاهان انتخابی در کشت مخلوط می‌باشد، زیرا پایین بودن میزان مواد معدنی موجود در غلات دانه‌ریز، عامل مؤثر در کم شدن میزان خاکستر علوفه حاصل از کشت مخلوط افزایشی این دو گیاه از خانواده غلات است (Ditsch & Bitzer, 2005).

الیاف نامحلول در شوینده اسیدی (ADF)

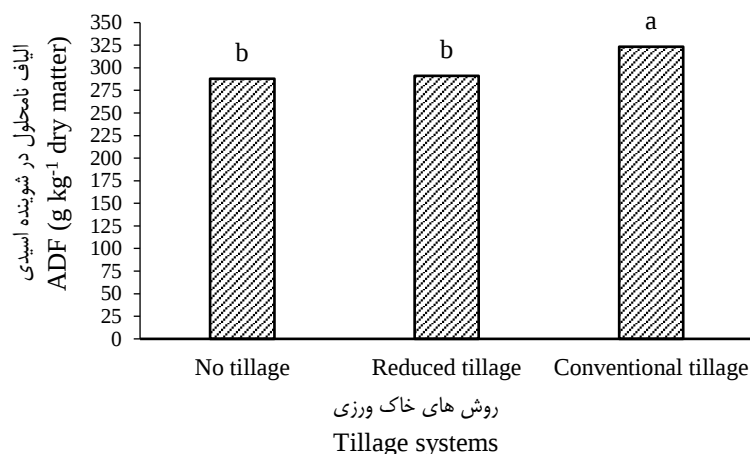
الیاف نامحلول در شوینده اسیدی از صفات مهم کیفی علوفه هستند. الیاف نامحلول در شوینده اسیدی به‌عنوان یک معیار شکم

گل خوشه‌ای نسبت داد. نتایج مطالعه دیگری بیانگر آن بود که الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در مخلوط ذرت - لوبیاچیتی نسبت به کاشت خالص ذرت کمتر بود که دلیل آن، محتوای کمتر ADF در لوبیاچیتی است (Moradi, Asghari, Mohsen-Abadi, & Samiezadeh, 2015). کاهش این صفت در تیمارهای مخلوط با لگوم‌ها، می‌تواند از زیاد بودن سطح برگ و تعداد برگ لگوم‌ها در شرایط سایه ناشی شده باشد، زیرا این گیاهان در شرایط سایه برای افزایش جذب نور، مواد فتوسنتزی بیشتری را به تولید برگ و رشد آن‌ها اختصاص می‌دهند. بنابراین، بر اثر افزایش نسبت برگ به ساقه، مقدار ADF کاهش می‌یابد (Ditsch & Bitzer, 2015).

الیاف نامحلول در شوینده‌های خنثی (NDF)

الیاف نامحلول در شوینده خنثی تحت تأثیر سطوح مختلف خاک‌ورزی و الگوی کشت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که روش خاک‌ورزی متداول با ۴۶۱/۵ گرم بر کیلوگرم ماده خشک بیشترین مقدار این صفت را داشت و سیستم‌های بدون خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری مقادیر کمتری نشان دادند و با هم در یک گروه آماری جداگانه قرار گرفتند (شکل ۸).

کیلوگرم ماده خشک بود. کمترین مقدار الیاف محلول نیز به کشت‌های خالص ماشک و کشت مخلوط ۷۵ درصد ماشک و ۲۵ چاودار تعلق داشت (شکل ۷). ارزیابی مقدار الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در کشت مخلوط تربیتیکاله با چند لگوم علوفه‌ای یک‌ساله شامل باقلا، نخودفرنگی، ماشک گل‌خوشه‌ای و گاودانه نشان داد که الگوهای مختلف کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص تربیتیکاله مقدار الیاف نامحلول در شوینده اسیدی کمتری داشتند و بنابراین از کیفیت علوفه‌ی بالاتری برخوردار بودند (Salehi et al., 2018). نتایج تحقیق احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2019) نشان داد که الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در الگوهای مختلف کشت مخلوط در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری داشت. به‌طوری‌که بیشترین الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در الگوی کشت افزایشی ۱۰۰ درصد جو: ۱۰ درصد ماشک گل خوشه‌ای و کمترین میزان آن در کشت خالص ماشک گل خوشه‌ای به دست آمد که تفاوت آن‌ها ۱۵/۲ درصد بود. آن‌ها با مقایسه الگوهای مختلف کشت مشاهده کردند که هر چه میزان جو در الگوهای کشت بیشتر باشد، ADF آن نیز بیشتر است. به‌طور کلی، با کاهش درصد جو در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط از مقدار این شاخص نیز کاسته شد، علت این کاهش را می‌توان به جایگزینی جو به‌جای ماشک گل خوشه‌ای به‌دلیل بیشتر بودن چرخه زندگی آن در مقایسه با ماشک

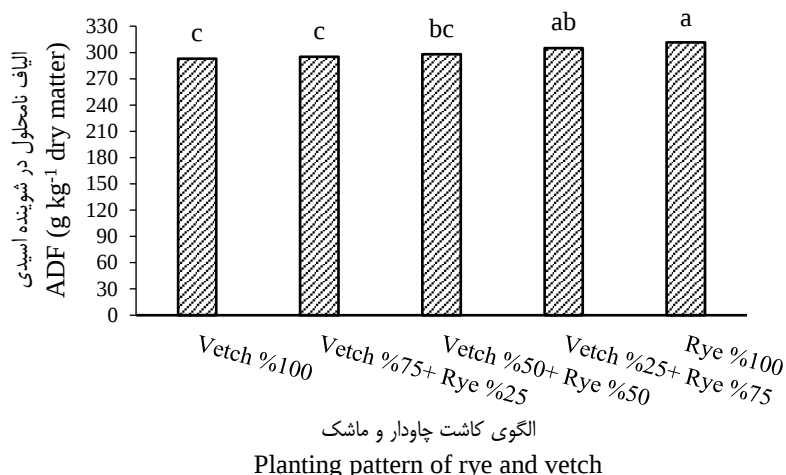


شکل ۶- مقایسه میانگین میزان الیاف نامحلول در شوینده اسیدی تحت تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی با آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد

Figure 6- Mean comparison of acid detergent fiber (ADF) affected by different tillage systems with LSD 1%

حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است

The same letters indicate statistically insignificant differences.



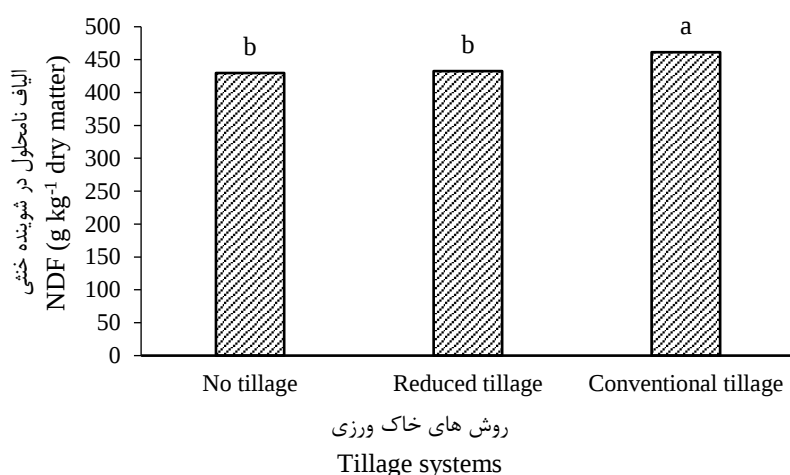
شکل ۷- مقایسه الیاف نامحلول در شوینده اسیدی متأثر از نسبت‌های اختلاط تراکمی ماشک و چاودار با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد
Figure 7- Mean comparison of acid detergent fiber (ADF) affected by mixing ratios of vetch and rye with LSD 5%

حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است

The same letters indicate statistically insignificant differences.

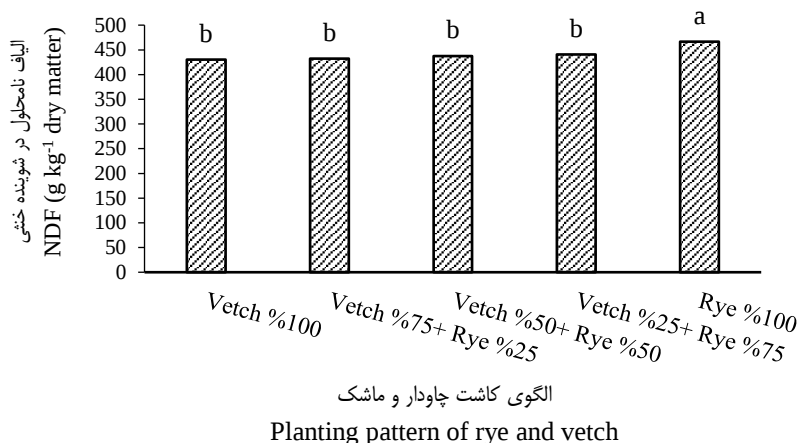
و ADF، کیفیت علوفه را بهبود بخشیده است. نتایج سایر محققان نیز حاکی از پایین بودن میزان NDF در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص بوده است (Favre, Castiblanco, Combs, Wattiaux, & Picasso 2019). فاتح و همکاران (Fateh et al., 2018) با مقایسه نسبت‌های مختلف کشت نشان دادند که هر چه میزان جو در نسبت‌های کشت بیشتر باشد، NDF آن بیشتر است که نشان‌دهنده کاهش کیفیت علوفه مخلوط بوده و هرچه درصد جو در مخلوط کاهش پیدا کند، کیفیت علوفه افزایش پیدا می‌کند. با افزایش محتوی فیبر در علوفه، میزان خشبی بودن بیشتر و قابلیت هضم و خوش‌خوراکی آن کمتر می‌شود (Bakhtiyari, Zamanian, & Golzardi, 2020). افزایش نسبت شبدر به سورگوم در کشت مخلوط، باعث کاهش محتوی همی سلولز و الیاف نامحلول در شوینده خنثی در علوفه شد که می‌تواند با بالاتر بودن محتوی الیاف نامحلول در شوینده خنثی و الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در گیاه سورگوم نسبت به شبدر مرتبط باشد (Ashoori et al., 2021). نتایج پژوهش دیگری نشان داد که محتوی الیاف نامحلول در شوینده خنثی در شبدر کمتر از گندم و در کشت مخلوط آن‌ها متوسط بود (Contreras-Govea, Albrecht, & Muck, 2006). محققان گزارش کردند که کشت مخلوط شبدر قرمز با علف گندمی (*Thinopyrum intermedium*) در مقایسه با کشت خالص باعث کاهش محتوی الیاف نامحلول در شوینده خنثی و در نتیجه افزایش پتانسیل مصرف علوفه توسط دام شد (Favre et al., 2019).

نتایج مقایسات میانگین اثر الگوی کشت بر الیاف نامحلول در شوینده خنثی نشان داد که کشت خالص چاودار با مقدار ۴۶۶/۵ گرم بر کیلوگرم ماده خشک بیشترین مقدار این صفت را داشت و در مقایسه با سایر نسبت‌های تراکمی اختلاف معنی‌دار آماری داشت. تیمارهای اختلاط تراکمی و کشت خالص ماشک در یک گروه آماری قرار گرفتند (شکل ۹). در خاک‌ورزی رایج به‌واسطه سست شدن خاک سطحی، بهبود تهویه خاک، تسریع در تجزیه مواد آلی و رهاسازی عناصر غذایی مانند کلسیم و افزایش رشد جانبی و شاخه‌دهی سبب افزایش بافت‌های ساختاری می‌شود و گیاه فرصت بیشتری برای انباشت الیاف سلولزی و نامحلول پیدا می‌کند که به تبع آن کیفیت علوفه کاهش پیدا می‌کند (Idowu, Sultana, Darapuneni, Beck, & Steiner, 2019). برخلاف این نتیجه، در پژوهش انجام‌شده در هندوستان مشاهده شد که روش خاک‌ورزی رایج، از طریق کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش رشد رویشی گیاه می‌شود که در نتیجه آن، کیفیت علوفه بهبود می‌یابد (Saha, Chakraborty, Sharma, & Kalra, 2010). به نظر می‌رسد که دلیل این اختلاف در اثرات خاک‌ورزی رایج به میزان بارندگی زیاد در هندوستان مربوط باشد، به‌طوری‌که روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی به‌واسطه افزایش بیش از حد رطوبت در خاک، شرایط رشد گیاه را نامناسب می‌سازند. صالحی و همکاران (Salehi et al., 2018) در بررسی کشت مخلوط تربیتکاله با چند لگوم علوفه‌ای یک‌ساله بیان داشتند که کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص تربیتکاله، از طریق کاهش NDF



شکل ۸- مقایسه میانگین الیاف نامحلول در شوینده خنثی متأثر از روش‌های مختلف خاک‌ورزی با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد
Figure 8- Mean comparison of neutral detergent fiber (NDF) affected by different tillage systems with LSD 5%

حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است
Similar letters indicate statistically insignificant differences.



شکل ۹- مقایسه میانگین الیاف نامحلول در شوینده خنثی در نسبت‌های اختلاط تراکمی ماشک و چاودار با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد
Figure 9- Mean comparison of neutral detergent fiber (NDF) affected by mixing ratios of vetch and rye with LSD 5%

حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است
Similar letters indicate statistically insignificant differences.

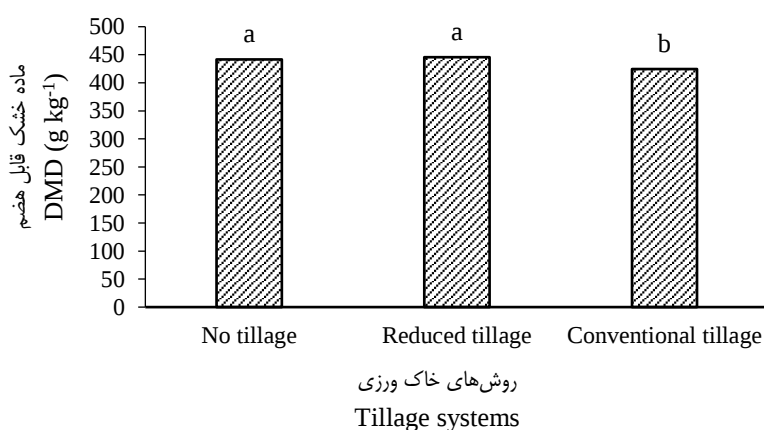
به تیمارهای کشت خالص ماشک و اختلاط تراکمی ۷۵ درصد ماشک و ۲۵ درصد چاودار (۴۵۰ گرم بر کیلوگرم) مربوط بود که با تیمار اختلاط تراکمی ۵۰ درصد ماشک و ۵۰ درصد چاودار اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱۱). در تحقیقی مشخص گردید که روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر خصوصیات مورفولوژیک محصول تأثیر معنی‌داری دارند و در سیستم کم‌خاک‌ورزی، خصوصیات مورفولوژیک گیاه نسبت به روش معمول خاک‌ورزی بهبود می‌یابد (Rashidi & Keshavarzpour, 2007). نتایج مطالعه خان و همکاران (Khan, Biswas, Kundu, Jana, & Bandopadhyay,)

ماده خشک قابل هضم (DMD)

نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش نشان داد که قابلیت هضم گیاهان چاودار و ماشک تحت تأثیر اثرات اصلی سیستم خاک‌ورزی و الگوی کشت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که سیستم کم‌خاک‌ورزی با ۴۴۵/۶ گرم بر کیلوگرم دارای بیشترین مقدار ماده خشک قابل هضم گیاهان چاودار و ماشک بود که با مقدار این صفت در تیمار بدون خاک‌ورزی در سطح مشابه آماری قرار داشتند (شکل ۱۰). بالاترین قابلیت هضم

و متغیرهای کاهنده کیفیت علوفه الیاف خام، الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDF) و الیاف نامحلول در شوینده اسیدی (ADF) بر هضم‌پذیری علوفه تأثیر دارند. در آزمایشی با هدف بررسی کیفیت و کمیت علوفه در سیستم کشت مخلوط ماشک و تریتیکاله انجام شد، نتایج نشان داد که ترکیب ۲۵ درصد تریتیکاله و ۷۵ درصد ماشک و همچنین ترکیب ۵۰ درصد ماشک و ۵۰ درصد تریتیکاله دارای بیشترین کیفیت علوفه و بیشترین مقدار علوفه قابل هضم بودند (Shahbazi et al., 2022).

2021) نشان داد که سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی مانند شخم حداقل در مقایسه با خاک‌ورزی متداول به بهبود کیفیت علوفه منجر می‌شوند. آن‌ها بهبود کیفیت علوفه را به حفظ رطوبت بیشتر در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی نسبت دادند که به رشد بیشتر برگ‌ها منجر می‌شود. از هضم‌پذیری اغلب به‌عنوان ارزشمندترین سنجش کیفیت علوفه نام برده می‌شود، زیرا ارتباط نزدیکی با عملکرد دام دارد. قابلیت هضم علوفه به ترکیبات شیمیایی علوفه بستگی دارد. متغیرهای افزایش کیفیت علوفه (نیترژن، پروتئین خام و مواد معدنی)

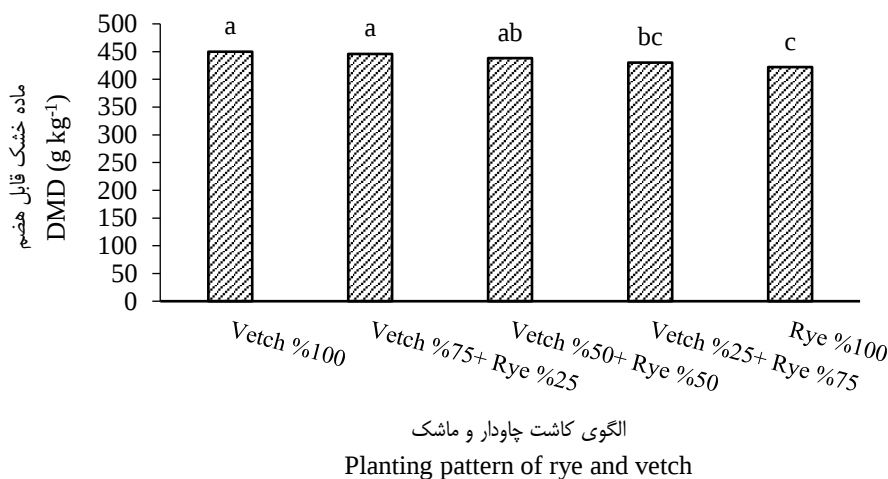


شکل ۱۰- مقایسه میانگین ماده خشک قابل هضم در روش‌های مختلف خاک‌ورزی با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد

Figure 10- Mean comparison of DMD (Digestible Dry Matter) in different tillage systems with LSD 5%

حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است.

The same letters indicate statistically insignificant differences.



شکل ۱۱- مقایسه میانگین ماده خشک قابل هضم در نسبت‌های اختلاط تراکمی ماشک و چاودار با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد

Figure 11- Mean comparison of DMD (Digestible Dry Matter) affected by mixing ratios of vetch and rye with LSD 5%

حروف همسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است.

The same letters indicate statistically insignificant differences.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی عملکرد و کیفیت علوفه در کشت مخلوط ماشک و چاودار نشان داد که بالاترین عملکرد علوفه خشک چاودار در تیمار ۷۵ درصد چاودار و ۲۵ درصد ماشک در سیستم‌های خاک‌ورزی متداول و کاهش یافته حاصل شد. بیشترین نسبت برابری زمین در همه تیمارهای خاک‌ورزی در تیمار ۵۰ درصد چاودار و ۵۰ درصد ماشک حاصل گردید. کیفیت علوفه حاصل نیز تحت تأثیر سیستم خاک‌ورزی و نسبت‌های کشت مخلوط قرار گرفت. بیشترین مقادیر خاکستر علوفه، الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و خنثی به سیستم خاک‌ورزی رایج مربوط بود. همچنین بیشترین مقدار الیاف نامحلول در شوینده خنثی و اسیدی در کشت خالص چاودار حاصل شد و با افزایش نسبت ماشک، مقدار الیاف نامحلول کاهش یافت. خاکستر علوفه در تیمار کشت مخلوط با ترکیب ۷۵ درصد ماشک و ۲۵ درصد چاودار بیشتر از سایر نسبت‌های کشت مخلوط بود. با توجه به نتایج آزمایش حاضر، به منظور حصول حداکثر عملکرد و افزایش کیفیت علوفه، برتری کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی را در رابطه با محصولات مورد مطالعه به وضوح نشان داد.

نتایج پژوهشی نشان داد که ماده خشک قابل هضم در تیمارهای کشت خالص جو و کشت مخلوط و همچنین بین تیمارهای کشت خالص خردل و کشت مخلوط فاقد اختلاف معنی‌دار آماری بودند. با افزایش نسبت خردل در تیمارهای کشت مخلوط جایگزین، درصد ماده خشک قابل هضم به دلیل پایین بودن نسبت عملکرد جو به عملکرد خردل، کاهش جزئی یافت (Nakhzari Moghaddam, 2014). با وجود گزارش‌های متداول مبنی بر هضم‌پذیری بیشتر بقولات نسبت به غلات، تفاوت میزان هضم‌پذیری انواع بقولات نیز توسط برخی محققان گزارش شده است. محققان در مطالعه کشت مخلوط بقولات و گندمیان، به بالا بودن میزان قابلیت هضم غلات نسبت به برخی از بقولات مانند ماشک معمولی اشاره کرده‌اند که از دلایل آن می‌توان به کمتر بودن میزان لیگنین موجود در غلات مورد مطالعه نسبت به لیگنین ماشک معمولی و در نتیجه، پایین بودن میزان الیاف نامحلول در شوینده‌های اسیدی غلات اشاره کرد (Lithourgidis et al., 2021). محققان دیگری در بررسی تأثیر کشت مخلوط ذرت و سویا بر میزان ماده خشک و جذب عناصر غذایی علوفه، افزایش میزان قابلیت هضم ماده خشک علوفه با افزایش سویا در سیستم کشت مخلوط با ذرت را گزارش کردند که از دلایل آن به افزایش میزان غلظت پروتئین حاصل از افزودن سویا در مخلوط اشاره شده است (Baghdadi et al., 2016).

References

1. Afzalnia, S., & Karami, A. (2018). Effect of conservation tillage on soil properties and corn yield in the corn-wheat rotation. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 49(1), 129-137. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.243058.664995>
2. Ahmadi, S., Fateh, E., & Ayneband, A. (2019). The effect of different barley and hairy vetch row intercropping sowing pattern and phosphorus fertilizer on dry matter production and forage quality. *Electronic Journal of Crop Production*, 11(4), 89-102. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2019.14529.2098>
3. Akhtar, M. F. U. Z., Jamil, M., Ahamd, M., & Abbasi, G. H. (2017). Evaluation of biofertilizer in combination with organic amendments and rock phosphate enriched compost for improving productivity of chickpea and maize. *Soil and Environment*, 36(1), 59-69.
4. Amori, A., Roshanfekr, H., & Hasibi, P. (2017). The study of mixcropping on row of oat and vetch in Ahvaz. *Journal of Crops Improvement*, 19(2), 303-317. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2017.60414>
5. Ansar, M., Ahmed, Z. I., Malik, M. A., Nadeem, M., Majeed, A., & Rischkowsky, B. A. (2010). Forage yield and quality potential of winter cereal-vetch mixtures under rainfed conditions. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 22(1), 25-36. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v22i1.4904>
6. AOAC. (1990). Official Methods of Analysis of AOAC International. AOAC International.
7. Asadi, S., Rezaei-Chiyaneh, E., & Amirnia, R. (2019). Effect of planting pattern and fertilizer source on agronomic characteristics of linseed (*Linum usitatissimum* L.) and chickpea (*Cicer arietinum* L.) in intercropping under rainfed conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21(1), 16-30. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/abj.21.1.16>
8. Ashoori, N., Abdi, M., Golzardi, F., Ajali, J., & Ilkaee, M. N. (2021). Forage potential of sorghum-clover intercropping systems in semi-arid conditions. *Bragantia*, 80, e1421. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200423>
9. Awal, M. A., Pramanik, M. H. R., & Hossen, M. A. (2007). Interspecies competition, growth and yield in barley-peanut intercropping. *Asian Journal of Plant Sciences*, 6(4), 577-584. <https://doi.org/10.3923/ajps.2007.577.584>
10. Baghdadi, A., Halim, R. A., Ghasemzadeh, A., & Ebrahimi, M. (2016). Effect of intercropping of corn and soyabean on dry matter yield and nutritive value of forage corn. *Legume Research*, 39(6), 976-981.

11. <https://doi.org/10.18805/lr.v39i6.6643>
11. Bagnall, D. K., Jones, E. J., Balke, S., Morgan, C. L., & McBratney, A. B. (2020). An *in situ* method for quantifying tillage effects on soil structure using multistripe laser triangulation. *Geoderma*, 380, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114642>
12. Bakhtiyari, F., Zamanian, M., & Golzardi, F. (2020). Effect of mixed intercropping of clover on forage yield and quality. *South-Western Journal of Horticulture, Biology and Environment*, 11(1), 49-65.
13. Budakli Carpici, E., & Celik, N. (2014). Forage yield and quality of common vetch mixtures with triticale and annual ryegrass. *Turkish Journal of Field Crops*, 19(1), 66-69.
14. Chaghazardi, H., Jahansuz, M. R., Ahmadi, A., & Gorji, M. (2016). Study of different tillage methods on some soil properties, seed yield and morphological traits of wheat and chickpea under rainfed conditions of Sarpolezahab region. *Journal of Crops Improvement*, 18(3), 581-594. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2016.56622>
15. Contreras-Govea, F. E., Albrecht, K. A., & Muck, R. E. (2006). Spring yield and silage characteristics of kura clover, winter wheat, and in mixtures. *Agronomy Journal*, 98(3), 781-787.
16. Dehghanian, H., Barmaki, M., Dabbagh Mohammadi Nasab, A., & Seifdavati, J. (2020). Grass pea (*Lathyrus sativus* L.)-cereal intercropping: Evaluation of productivity and some indices of forage quality. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(3), 61-76. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24764310.1399.30.3.4.9>
17. Ditsch, D. D., & Bitzer, M. J. (2005). Managing small grains for livestock forage. Department of Agronomy. University of Kent. Available at: https://forages.ca.uky.edu/files/small_grains_for_forage_agr160.pdf.
18. Du, J. B., Han, T. F., Gai, J. Y., Yong, T. W., Xin, S. U. N., Wang, X. C., & Yang, W. Y. (2018). Maize-soybean strip intercropping: Achieved a balance between high productivity and sustainability. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(4), 747-754. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61789-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61789-1)
19. Ehsanifar, A. R., Dahmardeh, M., & Khammari, I. (2015). Effect of different tillage systems on yield and yield components in cowpea-millet intercropping. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(11), 1-8. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i11/71779>
20. Fateh, E., Tarighi, S., & Ayneband, A. (2018). The effect of different barley (*Hordeum vulgare*) and fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) intercropping planting ratio under nitrogen fertilizer on dry matter quality and quantity. *Crop Production*, 11(1), 23-35. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2018.12601.1982>
21. Favre, J. R., Castiblanco, T. M., Combs, D. K., Wattiaux, M. A., & Picasso, V.D. (2019). Forage nutritive value and predicted fiber digestibility of Kernza intermediate wheatgrass in monoculture and in mixture with red clover during the first production year. *Animal Feed Science and Technology*, 258, 114-298. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114298>
22. Gozubuyuk, Z., Sahin, U., Ozturk, I., Celik, A., & Adiguzel, M.C. (2014). Tillage effects on certain physical and hydraulic properties of a loamy soil under a crop rotation in a semi-arid region with a cool climate. *Catena*, 118, 195-205. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.006>
23. Heidari, G., Mohammadi, K., & Sohrabi, Y. (2016). Responses of soil microbial biomass and enzyme activities to tillage and fertilization systems in soybean (*Glycine max* L.) production. *Frontiers in Plant Science*, 7, 17-30. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01730>
24. Heydarpour, N., Namdari, A., & Baghbani-Arani, A. (2018). Evaluation of quantitative yield and some physical properties of soil in three years mixed barley (Khorram)-vetch forage (*Vicia sativa*) cropping system under rainfed conditions. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 28(4), 1-14. (in Persian with English abstract).
25. Idowu, O. J., Sultana, S., Darapuneni, M., Beck, L., & Steiner, R. (2019). Short-term conservation tillage effects on corn silage yield and soil quality in an irrigated, arid agroecosystem. *Agronomy*, 9(8), 455. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080455>
26. Indoria, A. K., Srinivasa-Rao, C., Sharma, K. L., & Sammi-Reddy, K. (2017). Conservation agriculture—A panacea to improve soil physical health. *Current Science*, 112(52), 52-61.
27. Issaka, F., Zhang, Z., Zhao, Z.Q., Asenso, E., Li, J. H., Li, Y. T., & Wang, J. J. (2019). Sustainable conservation tillage improves soil nutrients and reduces nitrogen and phosphorous losses in maize farmland in Southern China. *Sustainability*, 11(8), 1-13. <https://doi.org/10.3390/su11082397>
28. Javanmard, A., Dabbagh-Mohammadi-Nasab, A., Javanshir, A., Moghaddam, M., & Janmohammadi, H. (2009). Forage yield and quality in intercropping of maize with different legumes as double-cropped. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7(1), 163-166.
29. Javanmard, A., Nouri, M., Ostadi, A., Rebat, J., Nouraein, M., & Shabahang J. (2022). The effects of different tillage systems and fertilizer resources on the growth, yield component, and economic efficiency of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under rainfed condition. *Journal of Agroecology*, 14(2), 251-274. <https://doi.org/10.22067/agry.2021.20326.0>
30. Javanmard, A., Rostami, A., Nouraein, M., & Gharekhan, G. (2016). Agronomical, ecological and economical

- evaluation of wheat-chickpea intercropping under rainfed condition of Maragheh. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 26(1), 19-37. (In Persian with English Summary).
31. Khan, R., Biswas, S., Kundu, C. K., Jana, K., & Bandopadhyay, R. R. P. (2021). Effect of conservation tillage practices on growth attributes of different fodder crops and soil moisture depletion. *International Journal of Chemical Studies*, 9(1), 1846-1852. <https://doi.org/10.22271/chemi.2021.v9.i1z.11494>
 32. Lamei Hervani, J. (2013). Assessment of dry forage and crude protein yeilds, competition and advantage indices in mixed cropping of annual forage legume crops with barley in rainfed comditions of Zanjan province in Iran. *Seed and Plant Production Journal*, 29(2), 169-183. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/sppj.2017.110508>
 33. Lithourgidis, A. S., Vlachostergios, D. N., Dordas, C. A., & Damalas, C. A. (2021). Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea–cereal intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, 34(4), 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.007>
 34. Metwally, A. A., Safina, S. A., & Noaman, A. H. (2015). Yield and land equivalent ratio of intercropping maize with Egyptian cotton. *Journal of Agri-Food and Applied Sciences*, 3(4), 85-93.
 35. Mohavieh Asadi, N., Bijanzadeh, E., Behpouri, A., & Barati, V. (2020). Effect of relay intercropping of chickpea (*Cicer arietinum* L.) with barley (*Hordeum vulgare* L.) on biochemical traits and yield under late season drought stress. *Iranian Journal Pulses Research*, 11(2), 164-182. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v11i2.78361>
 36. Moradi, P., Asghari, J., Mohsen-Abadi, G.R., & Samiezadeh, H. (2015). Evaluation of forage quantity and quality in intercropping maize with pinto bean and naked pumpkin. *Journal of Crops Improvement*, 17(3), 683-699. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2015.54379>
 37. Nakhzari Moghaddam, A. (2014). The yield and forage quality of intercropping barley and mustard in different planting dates. *Journal of Crop Production*, 5(4), 173-190. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008739.1391.5.4.10.5>
 38. Nakhzari Moghaddam, A. (2016). Effects of nitrogen and different intercropping arrangements of barley (*Hordeum vulgare* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) on forage yield and competitive indices. *Journal of Agroecology*, 8(1), 47-58. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v8i1.12534>
 39. Neugschwandtner, R. W., & Kaul, H. P. (2015). Nitrogen uptake, use and utilization efficiency by oat–pea intercrops. *Field Crops Research*, 179, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.018>
 40. Nurjaya, I. G. M. O., & Agung, I. G. A. M. S. (2012). Effects of tillage on forage legumes growth and subsequent dry matter yields of corn planted for livestock feeding. *American Journal of Experimental Agriculture*, 2(4), 616-625. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2012/1660>
 41. Oddy, V. H., Robards, G. E., & Low, S. G. (1983). Prediction of *in vivo* dry matter digestibility from the fibre and nitrogen content of a feed. In 'Feed Information and Animal Production'. G. E. Robards, & R. G. Packham (Eds). pp. 395–398.
 42. Oehl, F., & Koch, B. (2018). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in no-till and conventionally tilled vineyards. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 91, 56–60. <http://dx.doi.org/10.5073/JABFQ.2018.091.008>
 43. Pakgohar, N., Ghanbari, A., & Farahbakhsh, A. (2014). Investigation of quantitative and qualitative characteristics of green pea (*Lathyrus sativus* L.) and nutrified millet (*Pennisetum* sp.) forage in different cultivation patterns. *Agroecology*, 6(1), 108-117. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v6i1.35678>
 44. Pinnamaneni, S. R., Mubvumba, P., Anapalli, S., & Reddy, K. N. (2022). Cereal rye cover crop impacts on soybean (*Glycine max* L.) root growth and soil properties. *Frontiers in Soil Science*, 2, 970380. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.970380>
 45. Pooryousef, M., & Alizadeh, K. (2018). Evaluation of different smooth vetch and winter type barley mix cropping systems under Mahabad cold dryland conditions. *Iranian Journal of Dryland Agriculture*, 7(1), 1-13. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/idaj.2018.115759.183>
 46. Rabiee, M., & Farahdahr, F. (2020). Evaluation of yield and advantages of forage legumes with cereals intercropping as second crop in paddy fields. *Plant Productions*, 43(3), 363-374. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27838.1689>
 47. Rashidi, M., & Keshavarzpour, F. (2007). Effect of different tillage methods on soil physical properties and crop yield of watermelon (*Citrullus vulgaris*). *Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2, 1-16.
 48. Renzi, J. P., Chantre, G. R., & Cantamutto, M. A. (2016). Self-regeneration of hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) as affected by seedling density and soil tillage method in a semi-arid agroecosystem. *Grass and Forage Science*, 72(3), 524-533. <https://doi.org/10.1111/gfs.12255>
 49. Saha, S., Chakraborty, D., Sharma, A. R., & Kalra, N. (2010). Effect of tillage and residue management on soil Physical-Indian mustard system. *Indian Journal of Agricultural Science*, 80(8), 679-685.
 50. Salehi, Z., Amirnia, R., Rezaei-Chiyaneh, E., & Khalilvandi-Behrozyar, H. (2018). Evaluation of yield and some

- qualitative traits of forage in intercropping of triticale with annual legumes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 28(4), 59-76. (in Persian with English abstract).
51. Schillinger, W. F., Young, D. L., Kennedy, A. C., & Paulitz, T. C. 2010. Diverse no-till irrigated crop rotations instead of burning and plowing continuous wheat. *Field Crops Research*, 115(1), 39-49. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.001>
52. Schlegel, R. H. J. (2013) Rye: Genetics, Breeding, and Cultivation. Boca Raton, FL: Taylor and Francis. 359 pp. <https://doi.org/10.1201/b15553>
53. Shahbazi, S., Jalilian, J., Alizadeh, K., & Javanmard, A. (2022). Evaluation of chemical and organic-biofertilizer treatments on yield and forage quality of triticale and Maragheh Smooth vetch under sole and intercropping systems in rainfed condition. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 10(2), 199-226. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/idaaj.2022.356297.352>
54. Simmons, B. L., & Coleman, D. C. (2008). Microbial community response to transition from conventional to conservation tillage in cotton fields. *Applied Soil Ecology*, 40, 518-528. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.08.003>
55. Sori, S., Amirnia, R., Rezaei-Chiyaneh, E., & Sheikh, F. (2020). Evaluation of yield and yield components of different faba bean (*Vicia faba* L.) varieties in intercropping with triticale (*Triticum secale*). *Journal of Agroecology*, 12(1), 143-159. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v12i1.81918>
56. Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A., & Pisante, M. (2017). Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4(2), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0085-1>
57. Toreifi, S. H., Fateh, E., & Ayneband, A. (2018). Effect of different barley (*Hordeum vulgare*) and fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) intercropping planting ratio and nitrogen fertilizer on dry matter quality and quantity. *Journal of Crop Production*, 11(1), 23-35. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2018.12601.1982>
58. Van der Werf, W., Zhang, L., Li, C., Chen, P., Feng, C., Xu, Z., Zhang, C., Gu, C., Bastiaans, L., Makowski, D., & Stomph, T. J. (2021). Comparing performance of crop species mixtures and pure stands. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8, 481-489. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021413>
59. Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
60. Xiao, J. X., Yin, X. H., Ren, J. B., Zhang, M., Tang, L., & Zheng, Y. (2018). Complementation drives higher growth rate and yield of wheat and saves nitrogen fertilizer in wheat and faba bean intercropping. *Field Crops Research*, 221, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.009>
61. Yilmaz, S., Atak, M., & Erayman, M. (2008). Identification of advantages of maize – legume intercropping over solitary cropping through competition indices in the east Mediterranean region. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32(2), 111-119.



Improving the Nutrient Absorption and Yield of Chickpeas (*Cicer arietinum*) and Barley (*Hordeum vulgare*) under Row Inter-cropping with Foliar Application of Plant Growth Regulators in Saline Soil Conditions

A. Talebi¹, M. R. Owji^{1*}, F. Mohajeri¹, M. R. Baziar¹

1- Department of Agriculture, Fa.C., Islamic Azad University, Fasa, Iran

(*- Corresponding author's Email: mr.owji@iau.ac.ir)

Received: 09 June 2024

Revised: 19 October 2024

Accepted: 26 October 2024

Available Online: 11 March 2025

How to cite this article:

Talebi, A., Owji, M. R., Mohajeri, F., & Baziar, M. R. (2025). Improving the Nutrient Absorption and Yield of Chickpeas (*Cicer arietinum*) and Barley (*Hordeum vulgare*) under Row Inter-cropping with Foliar Application of Plant Growth Regulators in Saline Soil Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 131-147. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88429.1331>

Introduction

Soil salinity is one of the environmental stresses that is an important threat to agricultural production in the world. The global scientific community has been testing possible technologies for increasing salt stress tolerance in plants for more than three decades. New advances and perspectives have been obtained to restore the productivity of plants under salt stress. Utilization of plant growth regulators is one of the promising strategies to overcome the adverse effects of salinity. Also, row inter-cropping can increase the efficiency of the used resources. Improving the yield of chickpeas and barley in row inter-cropping using foliar spraying of salicylic acid, jasmonic acid and brassinosteroid was the hypothesis proposed in this research. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of these hormones' application in mixed cropping of chickpeas and barley under salt stress conditions.

Materials and Methods

A split plot experiment was conducted in the form of a randomized complete block design with three replications during the growing seasons of 2021 and 2022. This research was carried out in Fasa, Iran. The main factor was the planting arrangement included monocropping of chickpeas and barley and their row inter-cropping (75% chickpeas + 25% barley, 50% chickpeas + 50% barley and 25% chickpeas + 75% barley as row intercrop). The second factor was the foliar spray of growth regulators consisting of salicylic acid, jasmonic acid, brassinosteroid and distilled water as control. Data variance analysis for different traits was done using SAS statistical software version 9.1.

Results and Discussion

In the row inter-cropping of 25% chickpeas + 75% barley, compared to the monocropping of these two plants the leaf sodium concentration of chickpeas and barley showed a decrease of 5 and 3%, respectively. An increase in leaf nitrogen concentration was observed in the mixed cropping of chickpeas and barley compared to the monocropping system. In the monocropping of chickpeas and barley, salicylic acid and jasmonic acid foliar application improved the leaf potassium content of chickpeas and barley. In the conditions of mixed cropping,



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

 <https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88429.1331>

foliar spray of salicylic acid and jasmonic was able to increase the leaf potassium concentration of chickpeas compared to the control. The plant's ability to remove sodium from the cytosol increases water absorption and preserves photosynthetic pigments. The results of this experiment confirmed the hypothesis of synergistic effects of row inter-cropping compared to monocropping. Positive changes in the row inter-cropping can be related to the diverse absorption of ions by plants, changes in ion solubility and interaction between ions. In 2021, the highest biological yields of chickpeas and barley (3199 and 10351 kg ha⁻¹) were observed in mixed cropping of 50% chickpeas + 50% barley. In 2022, the row inter-cropping of 50% chickpeas + 50% barley increased the biological yield of chickpeas and barley by 9% and 18%, respectively, compared to monocropping. The highest yield of chickpeas and barley seeds was observed in row inter-cropping of 75% chickpea + 25% barley, using foliar spray of salicylic acid and jasmonic acid. The increase in the grain yield of chickpeas and barley plants in other treatments of row inter-cropping was also observed with foliar spray of salicylic acid and jasmonic acid.

Conclusion

The results of this research showed that salt stress and sodium absorption cause disturbances in the absorption of nutrients. Foliar spray of growth regulators improved growth by reducing sodium and increasing nutrient absorption. Also, the positive effect of row inter-cropping of chickpeas and barley compared to their monocropping on increasing the growth and grain yield under salt stress conditions was a successful result. Therefore, row inter-cropping can be used to ensure production stability under salinity stress conditions.

Acknowledgment

We would like to thank the Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, and the Islamic Azad University of Fasa for their sincere assistance in carrying out this research.

Keywords: Grain yield, Nitrogen, Photosynthetic pigments, Sodiums

علی طالبی^۱، محمد رحیم اوجی^{۱*}، فرهاد مهاجری^۱، محمد رضا بازاریار^۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

از راهکارهای امیدوارکننده برای غلبه بر تنش شوری، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است. همچنین برای بهینه‌سازی کارایی استفاده از منابع، کشت مخلوط نسبت به کشت خالص می‌تواند مفیدتر باشد. این آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار در طی دو سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ در شرایط خاک شور انجام شد. عامل اصلی آرایش کاشت شامل کشت خالص و مخلوط از دو گیاه نخود و جو و عامل فرعی محلول‌پاشی تنظیم‌کننده رشد گیاه شامل اسید سالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، اسید جاسمونیک با غلظت ۱۰۰ میکرومولار، براسینواستروئید با غلظت یک میکرومولار و شاهد بود. نتایج نشان داد که در کشت مخلوط ۲۵ درصد نخود + ۷۵ درصد جو، غلظت سدیم برگ نخود و جو در مقایسه با کشت خالص این دو گیاه به‌ترتیب کاهش معنی‌دار پنج و سه درصدی نشان داد. کشت مخلوط سبب افزایش پتاسیم برگ، شاخص سبزینگی و عملکرد زیست‌توده نسبت به تک‌کشتی شد. بیشترین کلروفیل b برگ نخود در اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک مشاهده شد که نسبت به شاهد به‌ترتیب افزایش معنی‌دار شش و پنج درصدی نشان داد. محلول‌پاشی براسینواستروئید توانست سبب بهبود محتوای کلروفیل a و b برگ نخود و جو شود. در سال دوم، کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو سبب افزایش ۱۰ درصدی عملکرد دانه نخود نسبت به کشت خالص شد. در مجموع، با توجه به تأثیر مثبت محلول‌پاشی تنظیم‌کننده رشد گیاه در افزایش عملکرد دانه نخود و جو در شرایط کشت مخلوط می‌توان این روش را تحت تنش شوری توصیه کرد.

واژه‌های کلیدی: رنگدانه‌های فتوسنتزی، سدیم، عملکرد دانه، نیتروژن

به تنش شوری در گیاهان هستند (Hayat et al., 2020). در نتیجه، پیشرفت‌ها و چشم‌اندازهای جدیدی برای بازیابی بهره‌وری گیاهان تحت تنش شوری حاصل شده است (Mishra, Mishra, & Arora, 2021). براساس گزارش‌های اخیر پژوهشگران، تغییر در سازوکارهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و هورمونی می‌تواند در برخی موارد سبب افزایش تحمل گیاهان به تنش شوری شود (Muchate, Nikalje, Rajurkar, Suprasanna, & Nikam, 2016).

کشت مخلوط به عنوان نمونه‌ای از نظام کشاورزی پایدار، اهدافی هم‌چون ایجاد تعادل اکولوژیک، بهره‌وری بیشتر از منابع و افزایش کمی و کیفی محصول را دنبال می‌کند (Glaze-Corcoran *et al.*, 2020). بنابراین، توجه زیادی به افزایش تنوع سیستم‌های تولیدی با افزودن تعداد گونه‌های گیاهی برای به حداکثر رساندن کارایی استفاده از منابع در مقایسه با نظام‌های تک‌کشتی شده است (Ghaffarian *et al.*, 2020). کشت مخلوط یک سیستم کشاورزی سازگار برای بهینه‌سازی کارایی استفاده از منابع و عملکرد محصول، به‌ویژه در

شوری خاک از جمله تنش‌های محیطی در سطح جهان است که تهدید مهمی برای تولیدات کشاورزی است. شور شدن خاک در بیش از یک میلیارد هکتار از اراضی و در بیش از ۱۰۰ کشور جهان گسترش یافته است (Singh, 2022). کاهش رشد و عملکرد گیاه به دلیل تنش شوری در نتیجه اختلال در تغذیه، کاهش فتوسنتز و افزایش تخریب غشاء سلولی و تنش اکسیداتیو حاصل می‌شود (Desoky, Saad, El-, Saadony, Merwad, & Rady, 2020). به‌طور واضح مشخص نیست که در شرایط تنش شوری کدام عوامل نقش مهم‌تری در کاهش رشد و عملکرد گیاه را دارند. جامعه علمی جهانی بیش از سه دهه است که در حال آزمایش فناوری‌های ممکن برای افزایش تحمل

۱- گروه کشاورزی، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران

(Email: mr.owji@iau.ac.ir) (*- نویسنده مسئول):

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88429.1331>

پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی تأثیر بگذارند و نقش مثبت در رشد گیاه داشته باشند (Hafeez et al., 2021). براسینواسترئوئیدها با تنظیم بیان ژن‌های دفاعی، فرآیندهای مختلف رشد و نمو گیاهان را تنظیم می‌کند. همچنین براسینواسترئوئیدها با هورمون‌های مختلف برای تنظیم فیزیولوژی و رشد گیاه تداخل دارند (Bhandari & Nailwal, 2020). گزارش شده است که براسینواسترئوئیدها بازده فتوسنتزی را در شرایط تنش شوری بهبود می‌بخشد، که تا حد زیادی به افزایش رشد و عملکرد محصول کمک می‌کند (Siddiqui, Hayat, & Bajguz, 2018).

با توجه به اینکه شوری خاک از چالش‌های عمده حال حاضر کشاورزی است و در آینده نزدیک امنیت غذایی، بهره‌وری کشاورزی و پایداری محیط زیست را به خطر می‌اندازد، یافتن فن‌آوری‌های جدید برای بهبود تولید در خاک‌های متأثر از تنش شوری، یک نیاز اساسی است. در سال‌های اخیر، کاربرد تنظیم‌کننده رشد گیاهی در توسعه و بهبود رشد گیاهان در شرایط تنش و غیرتنش گسترش یافته است. موارد زیادی در مورد نحوه اثرات دقیق تنظیم‌کننده رشد گیاهی در کشت مخلوط تحت شرایط تنش شوری در دست نمی‌باشد، لذا هدف از این پژوهش، بررسی اثر تنظیم‌کننده رشد گیاهی در کشت مخلوط نخود و جو، تحت شرایط خاک نسبتاً شور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش و تیمارها

این آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و در طی دو سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ اجرا گردید. این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی در مرکز تحقیقات کشاورزی فارس- فسا و در موقعیت مکانی با طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۲۴ دقیقه و ارتفاع ۱۳۷۰ متر از سطح دریا انجام شد. عامل اصلی، آرایش کاشت شامل کشت خالص از دو گیاه نخود ایرانی و جو و کشت مخلوط آن‌ها (۱۰۰ درصد نخود ایرانی و ۱۰۰ درصد جو، ۷۵ درصد نخود ایرانی + ۲۵ درصد جو، ۵۰ درصد نخود ایرانی + ۵۰ درصد جو، ۲۵ درصد نخود ایرانی + ۷۵ درصد جو) و عامل فرعی، محلول‌پاشی تنظیم‌کننده رشد گیاه شامل اسید سالیسیلیک، اسید جاسمونیک، براسینواسترئوئید و شاهد بود.

اجرای آزمایش

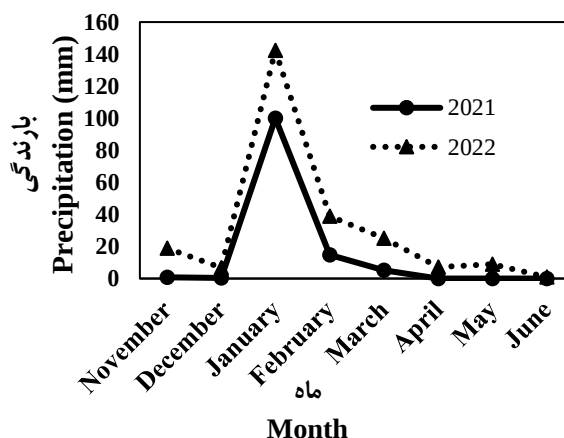
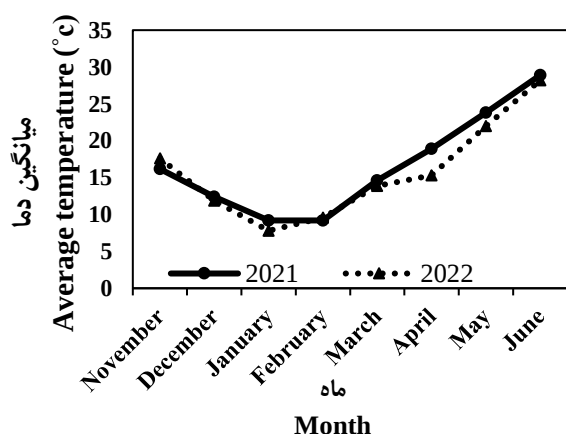
پیش از اجرای آزمایش از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک، نمونه‌برداری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد (جدول ۱). این آزمایش در شرایط خاک شور با هدایت الکتریکی حدود شش دسی زیمنس بر متر انجام گردید. میزان بارندگی و متوسط دمای ماهیانه در طول اجرای آزمایش به شرح شکل ۱ بود.

شرایط تنش‌های محیطی است (Su, Mu, Zhou, Kamran, & Yang, 2022). در شرایط تنش‌های محیطی، کشت مخلوط نسبت به کشت خالص دارای مزیت نسبی است و شاخص‌های کمی و کیفی گیاهان بهبود پیدا می‌کند (Chamkhi et al., 2022). اثرات مفید انجام کشت مخلوط غلات با حبوبات می‌تواند جذب عناصر غذایی را بهبود بخشد و در نهایت عملکرد رشد هر دو محصول مخلوط را برای سیستم‌های کشاورزی کم‌نهاد بهبود بخشد (Bi et al., 2019). از راهکارهای دیگر جهت افزایش تحمل به تنش شوری در گیاهان، استفاده از تنظیم‌کننده رشد گیاهی می‌باشد (Farhangi- Abriz, Alae, & Tavasolee, 2019). اسید سالیسیلیک یکی از هورمون‌های دفاعی ضروری گیاهی است که نقش مهمی در تنظیم رونویسی ژن‌های دفاعی ایفا می‌کند (Zhang & Li, 2019). اسید سالیسیلیک یک ترکیب فنل طبیعی و از تنظیم‌کننده‌های درون‌زای رشد می‌باشد. ترکیبات فنلی، به عنوان موادی شناخته شده‌اند که دارای یک حلقه آروماتیک همراه با یک گروه هیدروکسیل یا مشتقات فعال آن می‌باشند (Hassoon & Abduljabbar, 2019). اسید سالیسیلیک یک مولکول زیستی پیام‌رسانی فنولی قوی و یک تنظیم‌کننده رشد گیاهی چندوجهی است که در طیف گسترده‌ای از رشد، متابولیسم و سیستم‌های دفاعی شرکت می‌کند (Arif, Sami, Siddiqui, Bajguz, & Hayat, 2020). بسیاری از بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که کاربرد اسید سالیسیلیک به صورت خارجی در گیاهان تحت تنش شوری می‌تواند اثرات تخریبی ناشی از تنش‌ها را کاهش دهد و فرآیندهای رشد را سریع‌تر به حالت اول برگرداند. در واقع، اسید سالیسیلیک در تنش‌های محیطی نقش محافظتی داشته و موجب بهبود روند رشد در گیاه در شرایط تنش شوری می‌شود (Nigam, Dubey, & Rathore, 2022). اسید جاسمونیک و مشتقات آن به صورت مولکول‌های پیام‌رسان، سیستم‌های دفاعی گیاهان را در مقابل عوامل تنش‌زای محیطی فعال می‌کند (Ruan et al., 2019). جاسمونات‌ها در رشد و نمو و واکنش به تنش‌های محیطی نقش تنظیم‌کننده‌ای را ایفا می‌کنند (Hewedy et al., 2023). اسید جاسمونیک به عنوان یک تنظیم‌کننده کلیدی شناخته شده است، که به عنوان کدکننده ژن‌های پروتئین‌های بازدارنده، نظیر پروتئین‌های تئوئین، اسموتین، پرولین و همچنین بیوسنتز متابولیت‌های مختلف (به عنوان مثال، فیتوالکسین‌ها و تربنئوئیدها) نقش دارد (Ghorbel, Brini, Sharma, & Landi, 2021; Ali & Baek, 2020). همچنین براسینواسترئوئیدها گروهی از هورمون‌های استروئیدی گیاهی هستند که نقش‌های متعددی در رشد، نمو و پاسخ به تنش‌ها دارند (Ahammed, Li, Liu, & Chen, 2020). تعداد زیادی از مطالعات نشان می‌دهد که براسینواسترئوئیدها می‌توانند با تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، متابولیسم عناصر مغذی، وضعیت آب و تعادل هورمونی در سطح مولکولی بر

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1- The results of the chemical and physical analysis of the soil at the experiment location

سال Year	بافت Texture	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	کربن آلی O.C (%)	نیتروژن N (%)	سدیم Na^+ (meq l^{-1})	کلر Cl^- (meq l^{-1})	منگنز Mg^{+2} (meq l^{-1})	کلسیم Ca^{+2} (meq l^{-1})	فسفر P (mg kg^{-1})	پتاسیم K (mg kg^{-1})	روی Zn (mg kg^{-1})	منگنز Mn (mg kg^{-1})	آهن Fe (mg kg^{-1})	مس Cu (mg kg^{-1})
۱۴۰۰ 2021	لوم-رس-شن Sandy clay loam	6.02	0.42	0.07	104.1	124.6	27.40	20.50	12.60	141	1.44	0.93	4.57	0.05
۱۴۰۱ 2022	لوم-رس-شن Sandy clay loam	6.01	0.97	0.24	106.7	125.3	27.22	19.89	11.12	136	1.34	1.07	4.49	0.05



شکل ۱- شرایط آب‌وهوایی برای الگوهای فصلی از مارس تا جولای ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲

Figure 1- The climate conditions for the seasonal patterns from March to July 2021 and 2022

تراکم کاشت برای گیاه جو ۴۰۰ بوته در مترمربع و برای نخود ۴۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. جو رقم زهک جزء ارقام شش ردیفه می‌باشد که نیمه‌زودرس بوده و دارای ارتفاع بوته ۹۰ سانتی‌متر، با میانگین وزن ۱۰۰۰ دانه ۳۵ گرم و مقاوم به ریزش دانه است. همچنین نخود ایرانی متوسط‌رس، با ارتفاع بوته ۲۸ سانتی‌متر، حالت نیمه‌ایستاده داشته که وزن ۱۰۰ دانه آن ۳۵۰ گرم می‌باشد و مساعد برای نواحی گرم و خشک است. با در نظر گرفتن نیاز غذایی برای دو گونه، میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و به‌صورت پیش‌کاشت از منبع سوپرفسفات تریپل و پتاسیم سولفات مصرف شد. نیتروژن از منبع اوره و به‌میزان ۶۰ کیلوگرم در هکتار در سه تقسیط مساوی مصرف شد. آبیاری‌ها به‌صورت ردیفی و در زمان ۲۵ درصد تخلیه رطوبت ظرفیت زراعی مزرعه انجام شد (Attarzadeh, Balouchi, Rajaie, Movahhedi Dehnavi, & Salehi, 2019). وچین علف‌های هرز در طول فصل رشد به‌صورت دستی و در چند نوبت انجام گرفت. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار، اسید جاسمونیک با غلظت ۱۰۰ میکرومولار و براسینوستروئید با غلظت یک میکرومولار (Ramakrishna & Rao, 2015) در سه مرحله

قبل از کاشت، عملیات خاک‌ورزی اولیه شامل شخم، دیسک و آماده‌سازی بستر کشت انجام شد. سپس کرت‌هایی با طول ۴/۵ متر و عرض سه متر با هشت خط کشت با فاصله ۳۰ سانتی‌متر برای کشت آماده گردید. کاشت برای هر دو گیاه نخود (*Cicer arietinum*) و جو (*Hordeum vulgare*) به‌صورت دستی و در اواخر ماه آبان در هر دو سال (۱۴۰۰ و ۱۴۰۱) انجام شد. برداشت گیاه جو در سال اول در اواسط اردیبهشت سال ۱۴۰۲ انجام شد. همچنین برداشت گیاه نخود در سال اول در اوایل خرداد سال ۱۴۰۱ و در سال دوم در اوایل خرداد سال ۱۴۰۲ صورت گرفت. عمق کاشت برای بذرهایی که حدود یک تا دو سانتی‌متر و برای نخود حدود دو تا سه سانتی‌متر بود، به‌منظور اطمینان از تراکم مطلوب مزرعه برای هر دو گیاه نخود و جو، سه عدد بذر در هر کپه به‌صورت دستی کشت شد و پس از مرحله دو برگ، یک بوته باقی گذاشته شد. نحوه کاشت دو گیاه در سامانه‌های مخلوط ۵۰ + ۵۰ درصد به‌صورت یک در میان و در سامانه‌های مخلوط ۲۵ + ۷۵ درصد به‌صورت دو در میان بود. بذرهایی که جو رقم زهک و نخود ایرانی رقم داراب از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس تهیه شد.

رشد برای هر دو گونه گیاهی شامل دوره‌های در حدود تقریباً مشابه از لحاظ زمانی شامل سه تا چهار برگی، شروع ساقه‌دهی و اوایل گل‌دهی انجام شد.

اندازه‌گیری صفات

غلظت عناصر برگ

اوایل گل‌دهی در هر گونه، پنج برگ جوان و بالغ انتخاب و نمونه‌گیری شد. برگ‌ها با آب مقطر شسته شدند و در آن به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس آسیاب شدند. یک گرم از نمونه آسیاب‌شده در کوره با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا تبدیل به خاکستر شود. خاکستر به دست آمده با اسید کلریدریک دو نرمال عصاره‌گیری گردید و غلظت عناصر سدیم و پتاسیم توسط دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل Jenway 7, German) قرائت شد. در نهایت، اعداد قرائت‌شده با استفاده از نمودار حاصل از نمونه‌های استاندارد تعدیل شدند (Patterson, Macrae, & Ferguson, 1984). اندازه‌گیری نیتروژن برگ پس از هضم نمونه گیاهی براساس تیتراسیون بعد از تقطیر توسط دستگاه کج‌لدال مدل V40 انجام گردید (Lang, 1958).

صفات فیزیولوژیکی

برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک در مرحله گل‌دهی از بوته‌های داخل مزرعه نمونه‌برداری شد.

جهت اندازه‌گیری شاخص سبزیگی (Spad) از دستگاه SPAD-502 ساخت کشور ژاپن استفاده شد. در هر تیمار، ۱۰ برگ انتخاب و میانگین آن‌ها گزارش شد.

برای اندازه‌گیری کلروفیل فلورسانس از دستگاه Chlorophyll Fluorimeter مدل Hansatech LTD Pocket PEA ساخت کشور انگلستان استفاده شد. به این منظور، برگ‌های گیاهان جوان و بالغ به مدت ۱۵ دقیقه جهت سازگاری به تاریکی به وسیله گیره‌های مخصوص از تابش نور خورشید محافظت شدند. بعد از گذشت ۱۵ دقیقه، سنسور دستگاه داخل گیره‌ها قرار داده شد و نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر (Fv/Fm) ثبت شد.

با نمونه‌گیری تصادفی از برگ‌های بالغ و عصاره‌گیری با استون، میزان کلروفیل a و b به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد (Arnon, 1949). جذب نور با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد و میزان کلروفیل با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شد.

$$\text{Chlorophyll a (mgg}^{-1}\text{)} = (12.7 \times \text{OD}.663) - (2.69 \times \text{OD}.645) \times V/1000 \times W \quad (1)$$

$$\text{Chlorophyll b (mgg}^{-1}\text{)} = (22.9 \times \text{OD}.645) - (4.68 \text{OD}.663) \times V/1000 \times W \quad (2)$$

که در آن‌ها، V: حجم نمونه، OD: میزان جذب و W: وزن تر

نمونه است.

عملکرد دانه و زیست‌توده

در هر دو سال، برداشت در هر کرت از ردیف‌های وسط با مساحتی معادل یک مترمربع و با در نظر گرفتن نسبت مخلوط صورت گرفت. برای تعیین عملکرد زیست‌توده، نمونه‌ها توسط آن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۷۲ ساعت خشک و سپس به وسیله ترازوی دقیق توزین شدند. عملکرد دانه پس از جداسازی و توزین دانه‌ها گزارش شد.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه واریانس داده‌ها برای صفات مختلف با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ انجام گرفت. آزمون بارتلت روی کلیه صفات مورد بررسی انجام شد. هنگامی که واریانس خطای صفات در دو سال متوالی با یکدیگر همگون بودند، مقایسه میانگین این صفات به صورت تجزیه مرکب صورت گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. در صورت معنی‌دار بودن اثر متقابل، برش‌دهی انجام و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از رویه L.S.Means انجام گردید.

نتایج و بحث

غلظت سدیم، پتاسیم و نیتروژن

اثر آرایش کاشت، تنظیم‌کننده رشد گیاه و سال بر غلظت سدیم برگ نخود و جو معنی‌دار بود، ولی این صفت تحت تأثیر برهم‌کنش عوامل آزمایشی قرار نگرفت (جدول ۲). همچنین برهم‌کنش آرایش کاشت و تنظیم‌کننده رشد گیاه و برهم‌کنش سال و تنظیم‌کننده رشد گیاه بر غلظت پتاسیم و نیتروژن برگ نخود و جو معنی‌دار بود (جدول ۲).

در تیمار کشت مخلوط ۲۵ درصد نخود + ۷۵ درصد جو، غلظت سدیم برگ نخود و جو در مقایسه با کشت خالص این دو گیاه به ترتیب کاهش پنج و سه درصدی نشان داد (جدول ۳). همچنین کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو سبب کاهش معنی‌دار سدیم نسبت به کشت خالص این دو گیاه شد. از سوی دیگر، غلظت سدیم در گیاه نخود و جو در محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۴). غلظت سدیم برگ نخود و جو در سال دوم نسبت به سال اول کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵).

کشت مخلوط دو گونه نخود و جو سبب افزایش غلظت پتاسیم برگ نسبت به سیستم تک‌کشتی شد (جدول ۶). در کشت خالص نخود و جو، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک سبب

نسبت به شاهد شد (جدول ۷). در سال‌های اول و دوم، محلول‌پاشی اسید جاسمونیک به ترتیب سبب افزایش سه و پنج درصدی پتاسیم برگ جو نسبت به شاهد شد. محلول‌پاشی براسینواسترئوئید در سطح پایین‌تر توانست سبب بهبود جذب پتاسیم برگ نخود و جو شود (جدول ۷).

بهبود محتوای پتاسیم برگ نخود و جو گردید. همچنین در شرایط کشت مخلوط، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک تا حدودی توانست سبب جذب پتاسیم برگ نخود نسبت به شاهد گردد (جدول ۶). از سوی دیگر، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک سبب افزایش پتاسیم برگ نخود در سال‌های اول و دوم

جدول ۲- نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای اثرات آرایش کاشت و تنظیم‌کننده رشد گیاه روی غلظت سدیم، پتاسیم، نیتروژن، شاخص سبزیگی و نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر در نخود و جو

Table 2- Analysis of variance for the effects of cropping system and plant growth regulators on the Na⁺, K⁺, N, spad and fv/fm of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and Barley (*Hordeum vulgare* L.)

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	نخود Chickpeas					جو Barley				
		سدیم +Na	پتاسیم +K	نیتروژن N	اسید Spad	فلورسانس fv/fm	سدیم +Na	پتاسیم +K	نیتروژن N	اسید Spad	فلورسانس fv/fm
سال Year	1	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
بلوک Block	2	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
سیستم کشت Cropping system (C)	3	**	**	**	**	**	**	**	NS	**	**
بلوک × سیستم کشت Block × C (E _a)	6	0.191	0.084	0.008	7.45	0.0019	0.679	0.597	0.012	10.42	0.0084
تنظیم‌کننده رشد Plant growth regulators (PGR)	3	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
سیستم کشت × تنظیم‌کننده رشد C × PGR	9	NS	*	*	NS	NS	NS	**	*	NS	NS
بلوک × تنظیم‌کننده رشد Block × PGR (E _b)	24	0.520	0.095	0.001	1.147	0.0002	0.230	0.072	0.008	1.30	0.0013
سیستم کشت × سال C × year	3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
بلوک × سیستم کشت × سال Block × C × year (E _c)	8	0.662	0.090	0.032	9.67	0.0057	0.358	0.229	0.008	5.28	0.0010
تنظیم‌کننده رشد × سال PGR × year	3	NS	*	*	NS	NS	NS	*	*	NS	NS
سیستم کشت × تنظیم‌کننده رشد × سال C × PGR × year	9	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
خطا Error	24	0.398	0.140	0.002	2.88	0.0004	0.343	0.111	0.005	1.45	0.0011
ضریب خطا CV (%)	-	11.2	9.3	10.1	14.1	10.5	10.3	8.2	12.1	12.7	9.4

*, **, و NS: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم تفاوت معنی‌داری.

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

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر آرایش کاشت بر صفات اندازه‌گیری‌شده نخود و جو

Table 3- Mean comparison for the effect of intercropping on the measured traits of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.)

سیستم کشت Cropping system	نخود Chickpeas				جو Barley			
	سدیم Na ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	اسپد Spad	فلورسانس کلروفیل fv/fm	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g ⁻¹ fresh weight)	سدیم Na ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	اسپد Spad	فلورسانس کلروفیل fv/fm	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g ⁻¹ fresh weight)
تک کشتی Sole cropping	29.25 a*	37.83 b	0.728 b	1.88 c	25.29 a	41.77 b	0.702 c	1.91 b
۷۵ درصد نخود ایرانی + ۲۵ درصد جو 75% chickpeas + 25% Barley	28.80 b	41.20 a	0.767 a	1.97 b	25.33 a	42.80 ab	0.792 ab	2.00 a
۵۰ درصد نخود ایرانی + ۵۰ درصد جو 50% chickpeas + 50% Barley	28.13 c	43.00 a	0.764 a	2.00 a	24.70 b	44.30 a	0.824 a	2.03 a
۲۵ درصد نخود ایرانی + ۷۵ درصد جو 25% chickpeas + 75% Barley	27.86 c	42.37 a	0.759 ab	1.99 ab	24.55 b	43.95 ab	0.756 bc	2.03 a

* براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، حروف مختلف هر ستون نمایانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.

* Different letters indicate significant differences (5%) based on Duncan's multiple range tests in each column.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر تنظیم‌کننده رشد گیاه بر صفات اندازه‌گیری شده نخود و جو

Table 4- Mean comparison for the effect of plant growth regulators on the measured traits of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.)

تنظیم‌کننده رشد Plant growth regulators	نخود Chickpeas				جو Barley			
	سدیم Na ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	اسپد Spad	فلورسانس کلروفیل fv/fm	کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ fresh weight)	سدیم Na ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	اسپد Spad	فلورسانس کلروفیل fv/fm	کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ fresh weight)
شاهد Control	28.96 a	39.64 c	0.738 c	0.886 c	25.43 a	42.34 b	0.741 b	0.867 c
اسید سالیسیلیک Salicylic acid	28.10 b	42.12 a	0.765 a	0.942 a	24.55 b	43.78 a	0.787 a	0.942 ab
اسید جاسمونیک Jasmonic acid	28.29 b	42.08 a	0.764 a	0.936 a	24.67 b	43.79 a	0.785 a	0.958 a
براسینواستروئید Brassinosteroid	28.69 a	40.56 b	0.750 b	0.910 b	25.21 a	42.92 b	0.768 a	0.910 b

* براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، حروف مختلف هر ستون نمایانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.

* Different letters indicate significant differences (5%) based on Duncan's multiple range tests in each column.

محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک سبب افزایش نیتروژن برگ جو در شرایط کشت مخلوط ۷۵ درصد نخود + ۲۵ درصد جو شد (جدول ۴). از سوی دیگر، در سال‌های اول و دوم، بیشترین غلظت نیتروژن برگ نخود و جو در محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک مشاهده شد (جدول ۷).

افزایش غلظت نیتروژن برگ در کشت مخلوط نخود و جو نسبت به سیستم تک‌کشتی مشاهده شد (جدول ۴). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک سبب افزایش هفت درصدی غلظت نیتروژن برگ نخود نسبت به شاهد در کشت خالص گردید. بیشترین غلظت نیتروژن برگ نخود در شرایط کشت مخلوط ۲۵ درصد نخود + ۷۵ درصد جو در محلول‌پاشی جاسمونیک مشاهده شد (جدول ۴). همچنین

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر سال بر سدیم، شاخص سبزیگی و نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر در نخود و جو
Table 5- Mean comparison for the effect of year on the Na⁺, spad and fv/fm of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.)

سال Year	نخود Chickpeas			جو Barley		
	سدیم Na ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	اسپد Spad	فلورسانس کلروفیل fv/fm	سدیم Na ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	اسپد Spad	فلورسانس کلروفیل fv/fm
۱۴۰۰ 2021	28.91 a	40.12 b	0.706 b	25.68 a	42.26 b	0.757 b
۱۴۰۱ 2022	28.11 b	42.09 a	0.803 a	24.26 b	44.15 a	0.780 a

* براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، حروف مختلف هر ستون نمایانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.

* Different letters indicate significant differences (5%) based on Duncan's multiple range tests in each column.

شاخص سبزیگی و نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر

اثر آرایش کاشت، تنظیم‌کننده رشد گیاه و سال بر شاخص سبزیگی و نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر نخود و جو معنی‌دار بود، ولی این صفات تحت تأثیر برهم‌کنش عوامل آزمایشی قرار نگرفت (جدول ۲).

افزایش شاخص سبزیگی گیاه نخود در کشت مخلوط نخود و جو با درصدهای مختلف نسبت به سیستم تک‌کشتی مشاهده شد (جدول ۳). همچنین استفاده از سامانه کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو سبب افزایش شاخص سبزیگی گیاه جو به‌میزان شش درصد نسبت به سامانه تک‌کشتی این گیاه گردید (جدول ۳). همچنین محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک به‌ترتیب سبب افزایش شش و شش درصدی شاخص سبزیگی گیاه نخود نسبت به شاهد گردید (جدول ۴). شاخص سبزیگی گیاه جو در محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک و در سطح پایین‌تر براسینواسترئوئید نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۴). شاخص سبزیگی برگ نخود و جو در سال دوم نسبت به سال اول افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵).

استفاده از سامانه‌های مختلف کشت مخلوط ۷۵ درصد نخود + ۲۵ درصد جو و کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو سبب افزایش نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر برگ نخود و جو نسبت به سامانه تک‌کشتی این گیاه گردید (جدول ۳). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار چهار و سه درصدی نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر گیاه نخود نسبت به شاهد گردید (جدول ۴). همچنین محلول‌پاشی تنظیم‌کننده رشد گیاه شامل اسید سالیسیلیک، اسید جاسمونیک و براسینواسترئوئید توانست سبب افزایش نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر در گیاه جو شود (جدول ۴). همچنین بیشترین

نتایج این آزمایش نشان داد که کمترین تجمع یون سدیم با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک اتفاق افتاد. وجود تنظیم‌کننده‌های رشد مثل اسید سالیسیلیک از طریق کاهش انتقال سدیم از ریشه به اندام‌های هوایی، تجمع سدیم را محدود کند (Ghassemi-Golezani & Farhadi, 2021). همچنین کاربرد اسید جاسمونیک می‌تواند سبب تغییر در نسبت پتاسیم به سدیم، تنظیم اسمزی و هموستازی یونی تحت تنش شوری شود (Lotfi et al., 2024). مطابق با نتایج این پژوهش، محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه در تلفیق با سامانه کشت مخلوط سبب افزایش جذب عناصر غذایی نیتروژن شد. ممکن است اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک با تنظیم فعالیت پمپ H⁺ATPase و ژن‌های دخیل در جذب پتاسیم مانعی برای انتقال سدیم ایجاد کند (Ghassemi-Golezani & Abdoli, 2021). در نتیجه ممکن است که استفاده از اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک، تأثیر قابل توجهی بر جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن داشته باشد. از سوی دیگر، در سیستم‌های کشت مخلوط، گیاهان نقش مستقیم یا غیرمستقیم در تنظیم نسبت سدیم به پتاسیم و یا اصلاح خاک در شرایط تنش شوری دارند (Guerchi et al., 2024). گزارش شده است که در شرایط خاک‌های شور، استفاده از سیستم‌های کشت مخلوط به‌دلیل تغییر در تجمع سدیم، تا حدودی سبب تغییر در وضعیت شوری در خاک‌های زراعی و جذب عناصر غذایی می‌گردند (Ghaffarian et al., 2020). کشت مخلوط نخود و جو نسبت به سیستم تک‌کشتی سبب افزایش غلظت نیتروژن برگ شد. کشت مخلوط به‌طور قابل توجهی در کاهش جنبه‌های منفی تنش شوری در جذب عناصر غذایی کمک می‌کند. حبوبات که به‌دلیل قابلیت‌های بیولوژیکی تثبیت نیتروژن استثنایی آن‌ها شناخته می‌شوند، دسترسی و جذب نیتروژن را در شرایط تنش شوری تغییر می‌دهند (Kirova & Kocheva, 2021). بنابراین تعامل بین دو گونه در سیستم‌های کشت مخلوط ممکن است سبب دسترسی بیشتر به عناصر غذایی شود (Li et al., 2023).

نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر برگ نخود و جو در سال دوم مشاهده شد (جدول ۵).

بالا تر بودن شاخص سبزیبگی و نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر در گیاه نخود و جو در سال دوم نسبت به سال اول، احتمالاً به دلیل بارندگی بیشتر در سال دوم و اختلاف در شرایط

آبوهوایی در دو سال می باشد. از سوی دیگر، تنش شوری از طریق ایجاد تنش اکسیداتیو منجر به افزایش تولید و تجمع رادیکال های فعال می شود که به نوبه خود تخریب ساختار غشاء و ساختمان کلروفیل را به دنبال دارد (García-Caparrós, Hasanuzzaman, & Lao, 2019).

جدول ۶- مقایسه میانگین برهم کنش اثر آرایش کاشت و تنظیم کننده رشد بر صفات اندازه گیری شده نخود و جو

Table 6- Mean comparison for the effect of intercropping and plant growth regulators on the measured traits of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.)

سیستم کشت Cropping system	تنظیم کننده رشد Plant growth regulators	نخود Chickpeas				جو Barley			
		پتاسیم K ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	نیتروژن N (%)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	پتاسیم K ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	نیتروژن N (%)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)
تک کشتی Sole cropping	شاهد Control	10.29 b	1.61 b	2979 b	814 c	11.54 b	1.51 a	8386 b	2643 b
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	10.94 a	1.73 a	3208 a	863 a	12.10 a	1.56 a	8954 a	2841 a
	اسید جاسمونیک Jasmonic acid	10.86 a	1.69 ab	3174 a	856 ab	11.98 ab	1.57 a	8854 a	2820 a
	براسینواستروئید Brassinosteroid	10.39 b	1.64 ab	3034 b	825 bc	11.62 ab	1.56 a	8759 a	2760 ab
۷۵ درصد نخود ایرانی + ۲۵ درصد جو 75% chickpeas + 25% barley	شاهد Control	10.79 b	1.67 a	3092 c	840 c	11.95 a	1.77 b	9427 c	2822 b
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	11.53 a	1.77 a	3370 a	924 a	12.27 a	1.97 a	10135 ab	2988 a
	اسید جاسمونیک Jasmonic acid	11.49 a	1.76 a	3285 ab	908 ab	12.18 a	1.97 a	10326 a	2932 ab
	براسینواستروئید Brassinosteroid	11.21 a	1.73 a	3209 b	890 b	12.18 a	1.87 ab	9861 b	2869 ab
۵۰ درصد نخود ایرانی + ۵۰ درصد جو 50% chickpeas + 50% barley	شاهد Control	11.11 b	1.73 a	3251 b	890 b	12.18 b	1.68 a	9663 b	2927 b
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	11.57 a	1.76 a	3455 a	916 ab	12.41 ab	1.76 a	10861 a	3019 ab
	اسید جاسمونیک Jasmonic acid	11.79 a	1.78 a	3403 a	933 a	12.54 a	1.78 a	10731 a	3125 a
	براسینواستروئید Brassinosteroid	11.41 ab	1.74 a	3284 b	910 ab	12.26 ab	1.74 a	10381 ab	2993 ab
۲۵ درصد نخود ایرانی + ۷۵ درصد جو 25% chickpeas + 75% barley	شاهد Control	11.02 b	1.73 b	3111 c	879 b	12.19 a	1.64 a	9000 b	2799 b
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	11.55 a	1.78 ab	3283 ab	897 ab	12.39 a	1.68 a	9475 a	3083 a
	اسید جاسمونیک Jasmonic acid	11.65 a	1.81 a	3312 a	917 a	12.59 a	1.70 a	9576 a	2983 a
	براسینواستروئید Brassinosteroid	11.45 ab	1.78 ab	3205 b	877 b	12.44 a	1.64 a	9497 a	2938 ab

* براساس آزمون چند دامنه ای دانکن، حروف مختلف در هر ستون و هر آرایش کاشت اختلاف معنی داری با رویه L.S. Means در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

* Different letters indicate on Duncan's multiple range tests in each column and every cropping system has a not significant difference with the procedure of L.S. Means at the 5% probability level.

جدول ۷- مقایسه میانگین برهم کنش اثر سال و تنظیم کننده رشد بر صفات اندازه گیری شده نخود و جو

Table 7- Mean comparison for the effect of year and plant growth regulators on the measured traits of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.)

سال Year	تنظیم کننده رشد Plant growth regulators	نخود Chickpeas			جو Barle		
		پتاسیم K ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	نیترژن N (%)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g ⁻¹ fresh weight)	پتاسیم K ⁺ (mg g ⁻¹ leaf dry weight)	نیترژن N (%)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g ⁻¹ fresh weight)
۱۴۰۰ 2021	شاهد Control	10.62 c	1.56 c	1.90 b	11.90 b	1.67 b	1.87 c
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	11.32 a	1.65 ab	2.00 a	12.21 a	1.75 a	2.01 a
	اسید جاسمونیک Jasmonic acid	11.38 a	1.66 a	2.00 a	12.25 a	1.74 a	2.00 ab
	براسینواستروئید Brassinosteroid	11.01 b	1.61 bc	1.94 ab	12.08 a	1.68 b	1.94 b
۱۴۰۱ 2022	شاهد Control	10.68 b	1.77 b	1.87 b	11.87 b	1.56 c	1.92 b
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	11.38 a	1.85 a	1.97 a	12.22 a	1.86 a	2.05 a
	اسید جاسمونیک Jasmonic acid	11.61 a	1.87 a	2.00 a	12.45 a	1.73 b	2.08 a
	براسینواستروئید Brassinosteroid	11.52 a	1.88 a	1.99 a	12.42 a	1.69 b	2.07 a

* براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، حروف مختلف در هر ستون و هر سال اختلاف معنی‌داری با رویه L.S. Means در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

* Different letters indicate on Duncan's multiple range tests in each column and every year has a not significant difference with the procedure of L.S. Means at the 5% probability level.

کلروفیل b برگ گیاه نخود و جو را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد.

بیشترین محتوای کلروفیل a برگ نخود در شرایط کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود+ ۵۰ درصد جو و کشت مخلوط ۲۵ درصد نخود+ ۷۵ درصد جو مشاهده شد (جدول ۳). از سوی دیگر، محتوای کلروفیل a برگ جو در سامانه‌های کشت مخلوط نسبت به سیستم تک‌کشتی افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). از سوی دیگر، در سال‌های اول و دوم محتوای کلروفیل a برگ نخود و جو در محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک، اسید جاسمونیک و براسینواستروئید نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۷).

بیشترین محتوای کلروفیل b برگ نخود در محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک مشاهده شد که نسبت به شاهد به‌ترتیب افزایش شش و پنج درصدی نشان داد، همچنین براسینواستروئید توانست در سطح پایین‌تر نسبت به دیگر تنظیم‌کننده‌های رشد سبب بهبود میزان کلروفیل b در برگ نخود شود (جدول ۴). همچنین محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک، اسید جاسمونیک و براسینواستروئید توانست سبب بهبود کلروفیل b برگ جو شود (جدول ۴).

کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مثل اسید سالیسیلیک در شرایط تنش شوری با کاهش تخریب غشاء سلولی سبب کاهش خسارت وارد به گیاه در اثر تنش شوری می‌شود (Pai & Sharma, 2024). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک با القاء بیان ژن‌های خاص و تأثیر مثبت آن بر یکپارچگی غشاء سلولی سبب کاهش خسارت تنش شوری می‌گردند (Farhangi-Abri & Ghassemi-Golezani, 2018). در این پژوهش، سامانه کشت مخلوط، شرایط را برای جذب بیشتر عناصر غذایی و به‌خصوص پتاسیم فراهم آورد. بنابراین، دور از انتظار نیست که در سامانه کشت مخلوط، میزان خسارت به شاخص سبزی‌نگی کمتری مشاهده شود. از سوی دیگر، محققان گزارش کردند که استفاده از گیاهان متحمل به تنش شوری در کشت مخلوط، شرایط بهتری برای رشد سایر گیاهان در شرایط تنش شوری فراهم می‌نماید (Ghaffarian et al., 2020).

محتوای کلروفیل a و b

اثر آرایش کاشت و برهم کنش سال و تنظیم‌کننده رشد گیاه روی محتوای کلروفیل a برگ نخود و جو معنی‌دار بود (جدول ۸). همچنین اثر تنظیم‌کننده رشد گیاه و برهم کنش سال و آرایش کاشت، محتوای

جدول ۸- نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای اثرات آرایش کاشت و تنظیم‌کننده رشد گیاه روی محتوای کلروفیل a و b، عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه در نخود و جو
Table 8- Analysis of variance for the effects of cropping system and plant growth regulators on the chlorophyll a, chlorophyll b, biological yield and grain yield of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.)

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Df	نخود Chickpeas				جو Barley			
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield
سال Year	1	*	**	**	**	*	**	NS	**
سیستم کشت Cropping system (C)	3	**	**	**	**	**	NS	**	NS
بلوک × سیستم کشت Block × C (E _a)	6	0.761	0.007	19388	345	0.011	0.014	12440242	7462
تنظیم‌کننده رشد Plant growth regulators (PGR)	3	**	**	**	**	**	**	**	**
سیستم کشت × تنظیم‌کننده رشد C × PGR	9	NS	NS	*	*	NS	NS	*	*
بلوک × تنظیم‌کننده رشد Block × PGR (E _b)	24	0.003	0.0008	4403	442	0.004	0.004	128475	12952
سیستم کشت × سال C × year	3	NS	*	*	*	NS	*	**	*
بلوک × سیستم کشت × سال Block × C × year (E _c)	8	0.0041	0.016	12901	323	0.011	0.003	1107657	22799
تنظیم‌کننده رشد × سال PGR × year	3	*	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS
سیستم کشت × تنظیم‌کننده رشد × سال C × PGR × year	9	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
خطا Error	24	0.003	0.001	6422	656	0.006	0.002	117382	14053
ضریب خطا CV (%)	-	9.5	7.4	13.6	12.4	10.0	8.8	15.8	14.0

ns و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم تفاوت معنی‌داری.
** and ns are significant at the 5 and 1 percent of probability levels and non-significant, respectively.

جدول ۹- مقایسه میانگین برهم‌کنش اثر سال و آرایش کاشت بر صفات اندازه‌گیری شده نخود و جو

Table 9- Mean comparison for the effect of year and intercropping on the measured traits of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.)

سال Year	سیستم کشت Cropping system	نخود Chickpeas			جو Barle		
		کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ fresh weight)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ fresh weight)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)
۱۴۰۰ 2021	تک‌کشتی Sole cropping	0.827 b	2994 c	834 b	0.814 c	8657 b	2719 c
	۷۵ درصد نخود ایرانی + ۲۵ درصد جو 75% chickpeas + 25% barley	0.865 a	3095 b	883 a	1.05 a	10275 a	2815 bc
	۵۰ درصد نخود ایرانی + ۵۰ درصد جو 50% chickpeas + 50% barley	0.885 a	3199 a	896 a	0.945 b	10351 a	2966 a
	۲۵ درصد نخود ایرانی + ۷۵ درصد جو 25% chickpeas + 75% barley	0.880 a	3081 b	883 a	0.888 bc	9132 b	2892 ab
	تک‌کشتی Sole cropping	0.922 a	3203 c	845 c	0.795 c	8819 c	2812 b
۱۴۰۰ 2022	۷۵ درصد نخود ایرانی + ۲۵ درصد جو 75% chickpeas + 25% barley	0.963 a	3383 b	898 b	1.03 a	9600 b	2990 a
	۵۰ درصد نخود ایرانی + ۵۰ درصد جو 50% chickpeas + 50% barley	1.03 a	3498 a	929 a	0.930 b	10466 a	3066 a
	۲۵ درصد نخود ایرانی + ۷۵ درصد جو 25% chickpeas + 75% barley	0.979 a	3375 b	903 b	0.898 b	9642 b	3010 a
	تک‌کشتی Sole cropping	0.922 a	3203 c	845 c	0.795 c	8819 c	2812 b
	۷۵ درصد نخود ایرانی + ۲۵ درصد جو 75% chickpeas + 25% barley	0.963 a	3383 b	898 b	1.03 a	9600 b	2990 a

* براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، حروف مختلف در هر ستون و هر سال اختلاف معنی‌داری با رویه L.S. Means در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

* Different letters indicate on Duncan's multiple range tests in each column and every year has a not significant difference with the procedure of L.S. Means at the 5% probability level.

سنتز بیشتر کلروفیل برگ می‌گردد (Yang, Ravnskov, Pullens, Andersen, 2022). همچنین جذب بهتر عناصر غذایی سبب حفظ تثبیت دی‌اکسیدکربن، فتوسنتز بیشتر و محافظت از کلروپلاست در شرایط تنش‌های محیطی می‌گردد (Attarzadeh et al., 2019). از سوی دیگر، استفاده از محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه تحت تنش شوری به دلیل حفظ ظرفیت‌های سوخت‌وساز و فعالیت‌های فیزیولوژیکی برای گیاه نقش حفاظتی دارد (Farhangi-Abriz & Ghassemi-Golezani, 2018). نتایج این آزمایش، فرضیه اثرات هم‌افزایی کشت مخلوط را نسبت به کشت خالص گیاه

در سال اول، محتوای کلروفیل b برگ نخود در سامانه کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۹). از سوی دیگر، در سال‌های اول و دوم بیشترین محتوای کلروفیل b برگ جو در کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو و کشت مخلوط ۷۵ درصد نخود + ۲۵ درصد جو مشاهده شد (جدول ۹). توانایی گیاه برای حذف سدیم از سیتوزول سبب افزایش جذب آب و حفظ رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود (Wungrampha, Joshi, Singla-Pareek, & Pareek, 2018). محققان اظهار داشتند که افزایش غلظت نیتروژن برگ و فعالیت کربوکسیلازی روبیسکو سبب

مورد تأیید قرار داد. تغییرات مثبت در سامانه کشت مخلوط را می‌توان به جذب متنوع یون‌ها توسط گیاهان، تغییرات در حلالیت یون و برهم‌کنش بین یون‌ها مرتبط دانست (Guerchi et al., 2024). بنابراین سامانه کشت مخلوط به‌دلیل بهره‌وری بالا و استفاده بهینه از منابع سبب افزایش جذب آب و بهبود ظرفیت فتوسنتزی می‌گردد (Yin et al., 2020).

عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه

عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه گیاه نخود و جو تحت تأثیر برهم‌کنش آرایش کاشت و تنظیم‌کننده رشد گیاه و برهم‌کنش سال و آرایش کاشت قرار گرفت (جدول ۸).

کشت مخلوط دو گونه نخود و جو سبب افزایش عملکرد زیست‌توده نسبت به سیستم تک‌کشتی شد (جدول ۶). در کشت خالص نخود و جو، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک سبب بهبود عملکرد زیست‌توده نخود و جو شد. همچنین در شرایط کشت مخلوط ۷۵ درصد نخود + ۲۵ درصد جو، استفاده از محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک سبب افزایش به‌ترتیب نه و هشت درصدی عملکرد زیست‌توده نخود و جو نسبت به شاهد شد (جدول ۶). در هر حال، افزایش عملکرد زیست‌توده گیاه نخود و جو در شرایط کشت مخلوط با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک مشاهده شد. از سوی دیگر در سال اول، بیشترین عملکرد زیست‌توده نخود و جو به‌ترتیب با میزان ۳۱۹۹ و ۱۰۳۵۱ کیلوگرم در هکتار در کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو مشاهده شد (جدول ۹). همچنین در سال دوم، کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو به‌ترتیب سبب افزایش ۹ و ۱۸ درصدی عملکرد زیست‌توده نخود و جو نسبت به کشت خالص شد.

محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک سبب بهبود عملکرد دانه نخود و جو در کشت خالص گردید (جدول ۶). همچنین بیشترین عملکرد دانه نخود و جو در شرایط کشت مخلوط ۷۵ درصد نخود + ۲۵ درصد جو، با استفاده از محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک مشاهده شد (جدول ۶). در هر حال، افزایش عملکرد دانه گیاه نخود و جو در سایر شرایط کشت مخلوط با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک مشاهده شد. از سوی دیگر در سال اول، استفاده از سامانه کشت مخلوط سبب افزایش عملکرد دانه در نخود شد (جدول ۹). همچنین در سال دوم، کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو سبب افزایش معنی‌داری ۱۰ درصدی عملکرد دانه نخود نسبت به کشت خالص شد. همچنین بیشترین عملکرد دانه جو در سال‌های اول و دوم به‌ترتیب با میزان ۲۹۶۶ و ۳۰۶۶ کیلوگرم در هکتار در کشت مخلوط ۵۰ درصد نخود + ۵۰ درصد جو مشاهده شد (جدول ۹).

عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه در سال دوم نسبت به سال اول افزایش نشان داد. دلیل این تفاوت را می‌توان احتمالاً میزان بارندگی بیشتر و پایین‌تر بودن دما در طول مدت زمان تشکیل دانه در سال دوم نسبت به سال اول دانست. در نتیجه، اختلاف در شرایط آب‌وهوایی منجر به افزایش قابل توجه عملکرد در سال دوم نسبت به سال اول شد. در شرایط نامساعد محیطی مثل تنش شوری، تفاوت‌های ژنتیکی گونه‌های مختلف و شرایط مختلف محیطی باعث تغییر در جذب عناصر غذایی و صفات فیزیولوژیک می‌شود که بر رشد گیاه و عملکرد دانه تأثیرگذار است (Ghaffarian et al., 2020). از سوی دیگر، افزایش در میزان عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه در سامانه‌های کشت مخلوط به‌دلیل ساختار متفاوت گونه‌های مختلف بوده است. بررسی کشت مخلوط در شرایط تنش شوری نشان داد که استفاده از گیاهان مختلف در سامانه‌های کشت مخلوط می‌تواند یک راهکار کاربردی جهت افزایش عملکرد زیست‌توده در شرایط شور باشد (Kurdali, Janat, & Khalifa, 2003). در شرایط تنش‌های محیطی، استفاده از سیستم‌های کشت مخلوط جو با نخود راهکاری مناسب برای تولید پایدارتر این گیاهان نسبت به تک‌کشتی می‌باشد (Mohavieh Asadi, Bijanzadeh, Behpouri, & Barati, 2020). بنابراین استفاده از کشت مخلوط نخود و جو باعث کاهش رقابت درون گونه‌ای به‌ویژه رقابت بر سر نور و عناصر غذایی شده و در نتیجه باعث افزایش عملکرد می‌شود. هر چند در برخی گزارش‌ها در شرایط نرمال محیطی، عملکرد بیشتر در کشت خالص نسبت به سامانه کشت مخلوط غلات و حبوبات مثل جو و ماشک (Roth Vicia villosa) گزارش شده است (Kahrarian & Fatemi, 2023). بهبود عملکرد دانه در سامانه‌های کشت مخلوط می‌تواند به کمتر بودن رقابت و همچنین اثرات مکملی بیشتر گونه‌ها در این سامانه‌ها باشد (Yang et al., 2017). از سوی دیگر، تنظیم‌کننده اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک نقش اساسی در پاسخ‌های سیگنالینگ گیاه دارند. آن‌ها با تنظیم طیف وسیعی از فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله فتوسنتز، متابولیسم نیتروژن و پروتئین و با فعال کردن سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی، از گیاهان در برابر تنش‌های غیرزنده محافظت کرده و باعث افزایش عملکرد دانه می‌شود (Mohi-Ud-Din, Talukder, & Rohman, 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که به‌دلیل وجود تنش شوری و جذب سدیم، اختلال در جذب عناصر غذایی و شاخص‌های فتوسنتزی حاصل شد. از سوی دیگر، عوامل نامساعد محیطی مانند تنش شوری ممکن است با تغییر در سطوح درون‌زای هورمون‌های گیاهی و یا مسیرهای پیام‌سانی باعث کاهش رشد و بهره‌وری گیاه شوند. بنابراین،

که گونه‌ای حساس به شوری است. در نتیجه تأثیر کشت مخلوط دو گونه و محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی بر افزایش عملکرد در شرایط تنش شوری یک نتیجه موفقیت‌آمیز بود. بنابراین، کشت مخلوط همراه با استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی می‌تواند برای اطمینان از پایداری تولید در شرایط تنش شوری استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس و دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا که صمیمانه در انجام این تحقیق یاری نمودند، تشکر می‌گردد.

محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی نقش مهمی در پاسخ گیاه به تنش‌های غیرزنده دارند. این تأثیرات پیچیده هستند و از طریق جذب آب، عناصر غذایی و بیان ژن‌های مؤثر در پاسخ به تنش شوری اعمال می‌گردند. محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی با کاهش جذب سدیم و افزایش جذب عناصر غذایی سبب بهبود رشد شد. همچنین استفاده از سامانه کشت مخلوط بر ویژگی‌های مهم مثل جذب نیتروژن و رنگدانه‌های فتوسنتزی تأثیر مثبت داشت. چنین به نظر می‌رسد که استفاده از سامانه کشت مخلوط به‌صورت ردیفی باعث کاهش رقابت درون گونه‌ای به‌ویژه رقابت بر سر نور و عناصر غذایی شده و در نتیجه باعث افزایش عملکرد در سامانه کشت مخلوط نسبت به کشت خالص شود. همچنین به نظر می‌رسد که کشت مخلوط نخود و جو موجب کاهش اثرات تنش شوری روی نخود شده

References

- Ahammed, G. J., Li, X., Liu, A., & Chen, S. (2020). Brassinosteroids in plant tolerance to abiotic stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(4), 1451-1464. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10098-0>
- Ali, M. S., & Baek, K. H. (2020). Jasmonic acid signaling pathway in response to abiotic stresses in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(2), 621. <https://doi.org/10.3390/ijms21020621>
- Arif, Y., Sami, F., Siddiqui, H., Bajguz, A., & Hayat, S. (2020). Salicylic acid in relation to other phytohormones in plant: A study towards physiology and signal transduction under challenging environment. *Environmental and Experimental Botany*, 175, 104040. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104040>
- Arnon, D. E. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase (*Beta vulgaris*). *Plant Physiology*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Attarzadeh, M., Balouchi, H., Rajaie, M., Movahhedi Dehnavi, M., & Salehi, A. (2019). Growth and nutrient content of *Echinacea purpurea* as affected by the combination of phosphorus with arbuscular mycorrhizal fungus and *Pseudomonas fluorescens* bacterium under different irrigation regimes. *Journal of Environmental Management*, 231, 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.040>
- Bhandari, S., & Nailwal, T. K. (2020). Role of brassinosteroids in mitigating abiotic stresses in plants. *Biologia*, 75(12), 2203-2230. <https://doi.org/10.2478/s11756-020-00587-8>
- Bi, Y., Zhou, P., Li, S., Wei, Y., Xiong, X., Shi, Y., Liu, N., & Zhang, Y. (2019). Interspecific interactions contribute to higher forage yield and are affected by phosphorus application in a fully-mixed perennial legume and grass intercropping system. *Field Crops Research*, 244, 107636. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107636>
- Chamkhi, I., Cheto, S., Geistlinger, J., Zeroual, Y., Kouisni, L., Bargaz, A., & Ghoulam, C. (2022). Legume-based intercropping systems promote beneficial rhizobacterial community and crop yield under stressing conditions. *Industrial Crops and Products*, 183, 114958. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114958>
- Desoky, E. S. M., Saad, A. M., El-Saadony, M. T., Merwad, A. R. M., & Rady, M. M. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria: Potential improvement in antioxidant defense system and suppression of oxidative stress for alleviating salinity stress in *Triticum aestivum* (L.) plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, 101878. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101878>
- Farhangi-Abriz, S., & Ghassemi-Golezani, K. (2018). How can salicylic acid and jasmonic acid mitigate salt toxicity in soybean plants? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 1010-1016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.070>
- Farhangi-Abriz, S., Alaei, T., & Tavasolee, A. (2019). Salicylic acid but not jasmonic acid improved canola root response to salinity stress. *Rhizosphere*, 9, 69-71. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.11.009>
- García-Caparrós, P., Hasanuzzaman, M., & Lao, M. T. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense in plants under salinity. pp. 291-309 in M. Hasanuzzaman, K. R. Hakeem, K. Nahar, and A. Alharby (eds.) *Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants: Production, Metabolism, Signaling and Defense Mechanisms*. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ. <https://doi.org/10.1002/9781119468677.ch12>
- Ghaffarian, M. R., Yadavi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Dabbagh Mohammadi Nassab, A., & Salehi, M. (2020). Improvement of physiological indices and biological yield by intercropping of *Kochia* (*Kochia scoparia*), *Sesbania* (*Sesbania aculeata*) and *Guar* (*Cyamopsis tetragonoloba*) under the salinity stress of irrigation water. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(6), 1319-1330. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00833-y>
- Ghassemi-Golezani, K., & Abdoli, S. (2021). Improving ATPase and PPase activities, nutrient uptake and growth

- of salt stressed ajowan plants by salicylic acid and iron-oxide nanoparticles. *Plant Cell Reports*, 40(3), 559-573. <https://doi.org/10.1007/s00299-020-02652-7>
15. Ghassemi-Golezani, K., & Farhadi, N. (2021). The efficacy of salicylic acid levels on photosynthetic activity, growth, and essential oil content and composition of pennyroyal plants under salt stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(8), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10515-y>
 16. Ghassemi-Golezani, K., & Farhangi-Abriz, S. (2018). Foliar sprays of salicylic acid and jasmonic acid stimulate H⁺-ATPase activity of tonoplast, nutrient uptake and salt tolerance of soybean. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 166, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.059>
 17. Ghorbel, M., Brini, F., Sharma, A., & Landi, M. (2021). Role of jasmonic acid in plants: The molecular point of view. *Plant Cell Reports*, 40(8), 1471-1494. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02687-4>
 18. Glaze-Corcoran, S., Hashemi, M., Sadeghpour, A., Jahanzad, E., Afshar, R. K., Liu, X., & Herbert, S. J. (2020). Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability. *Advances in Agronomy*, 162, 199-256. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.004>
 19. Guerchi, A., Mnafigui, W., Jabri, C., Merghni, M., Sifaoui, K., Mahjoub, A., Ludidi, N., & Badri, M. (2024). Improving productivity and soil fertility in *Medicago sativa* and *Hordeum marinum* through intercropping under saline conditions. *BMC Plant Biology*, 24(1), 158. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04820-3>
 20. 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>
 21. Hassoon, A. S., & Abduljabbar, I. A. (2019). Review on the role of salicylic acid in plants. Pp. 61-64 in T. A. Alalwan (ed.) *Sustainable Crop Production*. IntechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89107>
 22. Hayat, K., Bundschuh, J., Jan, F., Menhas, S., Hayat, S., Haq, F., Shah, M. A., Chaudhary, H. J., Ullah, A., & Zhang, D. (2020). Combating soil salinity with combining saline agriculture and phytomanagement with salt-accumulating plants. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(11), 1085-1115. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1646087>
 23. Hewedy, O. A., Elsheery, N. I., Karkour, A. M., Elhamouly, N., Arafa, R. A., Mahmoud, G. A. E., Dawood, M. F. A., Hussein, W. E., Mansour, A., & Amin, D. H. (2023). Jasmonic acid regulates plant development and orchestrates stress response during tough times. *Environmental and Experimental Botany*, 208, 105260. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105260>
 24. Kahrarian, B., & Fatemi, R. (2023). The effect of intercropping additive on yield and yield components of spring barley and vetch. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(1), 35-46. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.349393.654945>
 25. Kirova, E., & Kocheva, K. (2021). Physiological effects of salinity on nitrogen fixation in legumes—A review. *Journal of Plant Nutrition*, 44(18), 2653-2662. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1921204>
 26. Kurdali, F., Janat, M., & Khalifa, K. (2003). Growth and nitrogen fixation and uptake in dhaincha/sorghum intercropping system under saline and non-saline conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(17-18), 2471-2494. <https://doi.org/10.1081/CSS-120024780>
 27. Lang, C. A. (1958). Simple micro determination of Kjeldahl nitrogen in biological materials. *Analytical Chemistry*, 30(10), 1692-1694. <https://doi.org/10.1021/ac60142a038>
 28. Li, B., Liu, J., Shi, X., Han, X., Chen, X., Wei, Y., & Xiong, F. (2023). Effects of belowground interactions on crop yields and nutrient uptake in maize-faba bean relay intercropping systems. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(3), 314-325. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1989416>
 29. Lotfi, R., Abbasi, A., Pessarakli, M., Rastogi, A., Kalaji, H. M., & Alizadeh, K. (2024). A comparison of jasmonic acid and salicylic acid-induced salinity stress tolerance in safflower plants, particularly on sodium (Na) and potassium (K) nutrient contents. *Journal of Plant Nutrition*, 47(4), 515-528. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280125>
 30. Mishra, P., Mishra, J., & Arora, N. K. (2021). Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants—Recent developments and prospects: A review. *Microbiological Research*, 252, 126861. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126861>
 31. Mohavieh Asadi, N., Bijanzadeh, E., Behpour, A., & Barati, V. (2020). Effect of relay intercropping of chickpea (*Cicer arietinum* L.) with barley (*Hordeum vulgare* L.) on biochemical traits and yield under late season drought stress. *Iranian Journal of Pulses Research*, 11(2), 164-182. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v11i2.78361>
 32. Mohi-Ud-Din, M., Talukder, D., & Rohman, M. (2021). Exogenous application of methyl jasmonate and salicylic acid mitigates drought-induced oxidative damages in French bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plants*, 10(10), 2066. <https://doi.org/10.3390/plants10102066>
 33. Muchate, N. S., Nikalje, G. C., Rajurkar, N. S., Suprasanna, P., & Nikam, T. D. (2016). Plant salt stress: Adaptive responses, tolerance mechanism and bioengineering for salt tolerance. *The Botanical Review*, 82(4), 371-406. <https://doi.org/10.1007/s12229-016-9173-y>

34. Nigam, B., Dubey, R. S., & Rathore, D. (2022). Protective role of exogenously supplied salicylic acid and PGPB (*Stenotrophomonas* sp.) on spinach and soybean cultivars grown under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 293, 110654. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110654>
35. Pai, R., & Sharma, P. K. (2024). Exogenous supplementation of salicylic acid ameliorates salt-induced membrane leakage, ion homeostasis and oxidative damage in sorghum seedlings. *Biologia*, 79(1), 23-43. <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01554-9>
36. Patterson, B., Macrae, E., & Ferguson, I. (1984). Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV). *Analytical Biochemistry*, 139(2), 487-492. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(84\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(84)90039-3)
37. Ramakrishna, B., & Rao, S. S. R. (2015). Foliar application of brassinosteroids alleviates adverse effects of zinc toxicity in radish (*Raphanus sativus* L.) plants. *Protoplasma*, 252(2), 665-677. <https://doi.org/10.1007/s00709-014-0714-0>
38. Ruan, J., Zhou, Y., Zhou, M., Yan, J., Khurshid, M., Weng, W., Cheng, J., & Zhang, K. (2019). Jasmonic acid signaling pathway in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(10), 2479. <https://doi.org/10.3390/ijms20102479>
39. Saleem, M., Fariduddin, Q., & Castroverde, C. D. M. (2021). Salicylic acid: A key regulator of redox signalling and plant immunity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 168, 381-397. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.10.011>
40. Siddiqui, H., Hayat, S., & Bajguz, A. (2018). Regulation of photosynthesis by brassinosteroids in plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(3), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2639-2>
41. Singh, A. (2022). Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management*, 38(1), 39-67. <https://doi.org/10.1111/sum.12772>
42. Su, K., Mu, L., Zhou, T., Kamran, M., & Yang, H. (2022). Intercropped alfalfa and spring wheat reduces soil alkali-salinity in the arid area of northwestern China. *Plant and Soil*, 481, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05846-y>
43. Wungrampha, S., Joshi, R., Singla-Pareek, S., & Pareek, A. (2018). Photosynthesis and salinity: Are these mutually exclusive? *Photosynthetica*, 56(1), 366-381. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0763-7>
44. Yang, F., Liao, D., Wu, X., Gao, R., Fan, Y., Raza, M. A., Wang, X., Yong, T., Liu, W., & Liu, J. (2017). Effect of aboveground and belowground interactions on the intercrop yields in maize-soybean relay intercropping systems. *Field Crops Research*, 203, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.007>
45. Yang, Q., Ravnskov, S., Pullens, J. W. M., & Andersen, M. N. (2022). Interactions between biochar, arbuscular mycorrhizal fungi and photosynthetic processes in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Science of the Total Environment*, 816, 151649. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151649>
46. Yin, W., Chai, Q., Zhao, C., Yu, A., Fan, Z., Hu, F., Fan, H., Guo, Y., & Coulter, J. A. (2020). Water utilization in intercropping: A review. *Agricultural Water Management*, 241, 106335. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335>
47. Zhang, Y., & Li, X. (2019). Salicylic acid: Biosynthesis, perception, and contributions to plant immunity. *Current Opinion in Plant Biology*, 50, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.02.004>



Drought Risk Assessment by Applying Drought Hazard and Vulnerability Indices for Rainfed Wheat (*Triticum aestivum* L.) (Case study: North Khorasan and Razavi Khorasan)

H. Latifi¹, S. Khorramdel^{1*}, A. Koocheki¹, M. Bannayan Aval¹, M. R. Farzaneh Belgredi²

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

2- Khorasan Razavi Agricultural Bank, Mashhad, Iran

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

How to cite this article:

Received: 26 June 2024
Revised: 26 August 2024
Accepted: 31 August 2024
Available Online: 11 March 2025

Latifi, H., Khorramdel, S., Koocheki, A., Bannayan Aval, M., & Farzaneh Belgredi, M. R. (2025). Drought Risk Assessment by Applying Drought Hazard and Vulnerability Indices for Rainfed Wheat (*Triticum aestivum* L.) (Case study: North Khorasan and Razavi Khorasan). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 149-170. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88691.1334>

Introduction

The assessment of risks in the agricultural sector serves as the foundation for developing risk management strategies. This is achieved through the analysis, identification, and prioritization of risks. It also acts as a tool to assist decision-makers in the agricultural sector to comprehend, confront, and manage risks, while identifying potential mitigation, transfer, and response mechanisms. Furthermore, it can be utilized to establish effective risk management strategies. There are several approaches to assess drought vulnerability and risk, with these two critical components being calculated using various indicators in different studies. The vulnerability index comprises exposure, sensitivity, and adaptive capacity as its major components. These elements significantly influence studies that utilize vulnerability indices to investigate the impacts of climate change and natural disasters. Therefore, the primary objective of this study was to evaluate the risks associated with wheat production, with a specific focus on vulnerability indices.

Materials and Methods

This study investigated drought risk, drought vulnerability, and drought hazard in Northeast Iran (North Khorasan and Razavi Khorasan provinces) on rainfed wheat production during 2009-2018. Exposure, sensitivity, and adaptive capacity determine the agricultural drought vulnerability. Two parameters of soil water holding capacity and level of mechanization were considered effective adaptive capacity factors in reducing the negative effects of drought on rainfed wheat production. The Combined Compromise Solution (CoCoSo) method was used to solve the multi-criteria agricultural drought vulnerability index problem.

Results and Discussion

Results showed that among the 12 counties in Khorasan provinces, three are exposed to low drought vulnerability, 3 to moderate drought vulnerability, and 6 are highly or very high vulnerable. Counties with less drought vulnerability have a high score in terms of the adaptive capacity index, attributed to the high water-holding capacity of the soil in these areas. Drought hazard is primarily influenced by the weight and severity of



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88691.1334>

SPI, with regions in the very high drought hazard classes mostly located in North Khorasan. In general, rainfed wheat is produced with low and medium risk in 11 counties of North Khorasan and Razavi Khorasan provinces. The lowest risk of dry wheat production was in Farouj (located in North Khorasan), and the highest risk is related to Sarakhs (in Razavi Khorasan).

Conclusion

Risk, as a fundamental factor of food insecurity, traps millions of households in poverty each year. The rising frequency and intensity of climate-related risks, driven by climate change, exacerbate cycles of damage and recovery while amplifying uncertainty. Arid regions face many of the same risks as other areas; however, challenges such as water scarcity, drought, desertification, and extreme temperatures are more acute in these regions, with far-reaching adverse effects. In arid and semi-arid regions, many production systems may disappear in the future. Therefore, risk assessment within the agricultural sector becomes crucial to quantify both the quantity and quality of risk while examining the potential consequences of a potential incident. This approach is critical for understanding, confronting, and identifying appropriate strategies to mitigate, transfer, and manage these risks. It provides valuable insights to decision-makers in the agricultural sector and serves as a basis for developing appropriate risk management solutions. Considering the undeniable impact of climate change on agriculture in arid and semi-arid regions, the dependence on available soil water and level of mechanization, components of the adaptive capacity index in this study, may no longer be sufficient. Hence, it is essential to explore alternative methods, including crop improvement, to reduce vulnerability to drought. In this respect, technologies such as soil cover applications and nutrient management can significantly contribute to reducing vulnerability to drought.

Acknowledgment

This project related to the Ph.D. thesis was financially supported by the Vice President for Research of the Faculty of Agriculture at Ferdowsi University of Mashhad.

Keywords: Adaptive capacity, Agricultural risk, CoCoSo method, Exposure index

مقاله پژوهشی

جلد ۲۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۷۰-۱۴۹

ارزیابی ریسک خشکسالی گندم دیم (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری و مخاطره خشکسالی (مطالعه موردی: استان‌های خراسان رضوی و خراسان شمالی)

هدا لطیفی^۱، سرور خرم‌دل^{۱*}، علیرضا کوچکی^۱، محمد بنایان اول^۱، محمودرضا فرزانه بلگردی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

چکیده

مناطق خشک و نیمه‌خشک همانند سایر مناطق در معرض انواع ریسک‌ها قرار دارند، اما ریسک‌هایی نظیر خشکسالی با شدت بیشتری این مناطق را تهدید می‌نماید. در این مطالعه به بررسی شاخص‌های آسیب‌پذیری و مخاطره به‌عنوان مؤلفه‌های ریسک خشکسالی در مناطق مستعد تولید گندم دیم در شمال شرق ایران (هفت شهرستان استان خراسان رضوی و پنج شهرستان استان خراسان شمالی) طی سال‌های زراعی ۸۹-۱۳۸۸ لغایت ۹۷-۱۳۹۶ پرداخته شده است. شاخص آسیب‌پذیری نوعی شاخص ترکیبی است که حساسیت، در معرض قرار گرفتن و ظرفیت تطابق‌پذیری سه جزء تعیین‌کننده آن می‌باشند. در این مطالعه، ظرفیت تطابق‌پذیری تحت تأثیر دو عامل ظرفیت نگهداری آب خاک و سطح مکانیزاسیون می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که در ۱۱ شهرستان و یا به عبارتی در ۹۲ درصد از شهرستان‌های مورد مطالعه، گندم دیم با ریسک کم تا متوسط تولید می‌شود. میزان ریسک خشکسالی تولید گندم دیم در شهرستان سرخس زیاد و در شش شهرستان (فاروج، کلات، درگز، قوچان، نیشابور و تربت‌حیدریه) کم می‌باشد. شهرستان‌های مذکور از نظر شاخص آسیب‌پذیری در رده کمتر آسیب‌پذیر تا آسیب‌پذیر قرار دارند، همچنین میزان ظرفیت تطابق‌پذیری در این شش شهرستان زیاد است که دلیل عمده آن ظرفیت بالای نگهداری آب خاک می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که بیشتر شهرستان‌هایی که شاخص مخاطره خشکسالی در آن‌ها خیلی زیاد است، در استان خراسان شمالی واقع شده‌اند، ولی این شاخص در شهرستان‌های فاروج، درگز و قوچان کم می‌باشد. ارزیابی ریسک در فرآیند مدیریت ریسک و اتخاذ راهکارهای هوشمندانه در این حوزه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده که پرداختن به آن می‌تواند کمک مؤثری به امنیت غذایی و توسعه پایدار نماید.

واژه‌های کلیدی: روش کوکوسو، ریسک کشاورزی، شاخص در معرض قرارگیری، ظرفیت تطابق‌پذیری

مقدمه

مثبت یا منفی بر هدف فعالیت کشاورزی خواهد گذاشت. تجزیه و تحلیل متون در زمینه ریسک در بخش کشاورزی نشان می‌دهد که ارزیابی و مدیریت آن در این بخش دشوار است (Hardaker, Lien, 2003; Ladányi, 2003; Anderson, & Huirne, 2004) و هرگونه ناهنجاری در این شرایط می‌تواند علاوه بر کاهش تولید، زمینه را برای سایر مشکلات از جمله محدودیت در تأمین مواد غذایی و مسائل اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی فراهم آورد (Gravandi & Alibeygi, 2011). کاهش ریسک تولید مواد غذایی متأثر از تغییرات اقلیمی از چالش‌های بزرگ قرن بیست و یکم است (Lobell, Schlenker, & Costa-Roberts, 2011). امکان بروز انواع جدیدی از پدیده‌های حدی، چالش آینده بخش کشاورزی خواهد بود و بسیاری از نظام‌های تولید در مناطق خشک و نیمه‌خشک در آینده‌ای نزدیک

ریسک واژه‌ای فرانسوی است که در فرهنگ‌نامه وبستر، احتمال ضرر و زیان جانی و مالی تعریف شده است. ریسک فرآیندی وابسته به زمان بوده و از آنجاکه آثار آن در آینده ظاهر می‌شود، گذشت زمان بر میزان شناخت انسان درباره آن تأثیر می‌گذارد (Habibi, Azizi, 2017; Shal, & Ghorbani, 2017). ریسک کشاورزی را رویدادها یا شرایط غیرقطعی تعریف نموده که در صورت رخداد، اثر

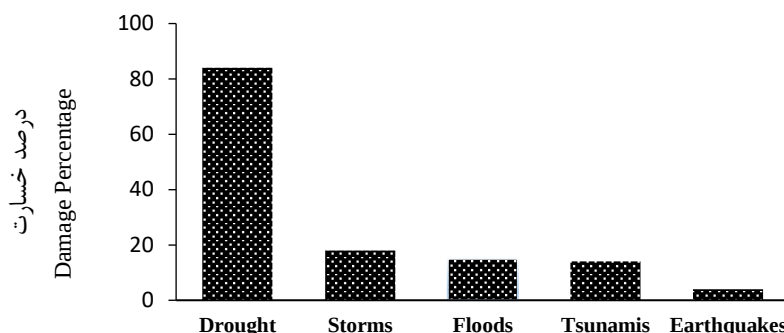
۱- گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- بانک کشاورزی خراسان رضوی، مشهد، ایران

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

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88691.1334>

بیشترین خسارت وارده به این بخش مربوط به خشکسالی با سهم ۸۴ درصدی است. در این کشورها، خسارت ناشی از بلایای طبیعی معادل ۲۱ درصد از تولید ناخالص داخلی است (WorldBank, 2015).



شکل ۱- آسیب و خسارت وارده به بخش کشاورزی به تفکیک عامل خطر در کشورهای در حال توسعه (WorldBank, 2015)
Figure 1- Damage and losses to the agriculture sector by type of hazard (percentage share of all sectors combined) (WorldBank, 2015)

را با استفاده از احتمالات بارندگی که از داده‌ها و اطلاعات بارش بلندمدت ایستگاه‌های هواشناسی به‌دست آمده، ارائه کرده است. مورفی و همکاران (Murthy et al., 2015) شاخص‌های مشتق شده از شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی ($NDVI^3$) را به‌منظور پهنه‌بندی آسیب‌پذیری خشکسالی در هند استفاده نموده‌اند. ویلهلمی و ویلهایت (Wilhelmi & Wilhite, 2002) مطالعه‌ای در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی کشاورزی را با استفاده از متغیرهای مختلف انجام دادند. آن‌ها از چهار متغیر مربوط به اقلیم، خاک، کاربری زمین و آبیاری استفاده کرده و نوعی طرح توزین عددی را برای ایجاد شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی کشاورزی معرفی نموده‌اند. ژائو و همکاران (Zhao, Zhang, Zhu, Shen, & Yu, 2020) برای محاسبه ریسک خشکسالی از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده ($SPEI^4$) استفاده نمودند و برای محاسبه شاخص احتمال وقوع خشکسالی از متغیرهایی همچون تراکم جمعیت، میزان زمین‌های زراعی و مراتع استفاده نموده و آسیب‌پذیری خشکسالی را از طریق متغیرهای تولید ناخالص داخلی، نسبت زمین‌های آبی به کل زمین‌های زراعی، تعداد ذخایر آبی، نسبت صنایع اولیه به تولید ناخالص داخلی محاسبه نمودند. قاسمی نژاد و همکاران (Ghaseminejad, Soltani, & Soffianian, 2014) برای محاسبه شاخص ریسک خشکسالی در اصفهان، از شاخص بارش استاندارد شده (SPI^5)، شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی (تراکم جمعیت و درصد افراد شاغل در بخش کشاورزی) و شاخص‌های فیزیکی (ظرفیت آب قابل استفاده خاک و کاربری زمین) استفاده نمودند.

محکوم به حذف خواهند بود. در شکل ۱، زیان و خسارت وارده به بخش کشاورزی ناشی از عوامل آب‌وهوایی طی سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۳ میلادی در کشورهای در حال توسعه نشان داده شده است که

خشکسالی یکی از شایع‌ترین بلایای طبیعی است که در اقلیم‌های مختلف به‌طور مکرر رخ می‌دهد و اثرات آن محدود به مناطق خشک و نیمه‌خشک نیست، بلکه می‌تواند در مناطقی با بارندگی شدید و در هر زمانی از فصل رشد نیز رخ دهد (Mathbout, Lopez-Bustins, Martin-Vide, Bech, & Rodrigo, 2018; Mishra & Singh, 2010; Shahabfar, Ghulam, & Eitzinger, 2012; Subash, Mohan, & Banukumar, 2011). عوامل اصلی که منجر به کمبود رطوبت در خاک می‌گردند، شامل نفوذ کم آب و افزایش رواناب و تبخیر و تعرق می‌باشند. این عوامل تا حد زیادی تحت تأثیر اقلیم، ویژگی‌های خاک، پستی و بلندی زمین و فیزیک خاک است. این عوامل بر نوع، شدت و دوره خشکسالی کشاورزی تأثیر می‌گذارند. ماهیت خسارت وارده به محصولات زراعی وابسته به شدت خشکسالی می‌باشد که البته زمان وقوع، مرحله رشد و همچنین نوع خاک بر آن تأثیرگذار است (Kirkham, 2011; Unger, Kirkham, & Nielsen, 2010).

ارزیابی ریسک روشی برای تعیین اندازه کمی و کیفی انواع ریسک‌ها و بررسی پیامدهای بالقوه ناشی از حوادث احتمالی است و ابزاری برای کمک به تصمیم‌گیرندگان بخش کشاورزی در درک و هنگام مواجهه با ریسک و شناسایی راه‌حل‌های بالقوه برای کاهش، انتقال و مقابله با آن و فراهم آوردن زمینه‌ای برای توسعه راه‌حل‌های مناسب مدیریت ریسک می‌باشد (WorldBank, 2016). آسیب‌پذیری، چارچوبی را برای شناسایی علل ریشه‌ای عوارض خشکسالی در سطوح اجتماعی، اقتصادی و محیطی فراهم می‌کند. ریجویس (Rejoice, 2003) شاخص‌های آسیب‌پذیری^۱ و ریسک خشکسالی^۲

3- Normalized difference vegetation index

4- Standardized precipitation evapotranspiration index

5- Standardized precipitation index

1- Drought vulnerability Index

2- Drought risk Index

تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان‌های خراسان رضوی و خراسان شمالی انتخاب شدند. مدت زمان مورد بررسی، سال‌های زراعی ۲۰۱۰-۲۰۰۹ (۸۹-۱۳۸۸) لغایت ۲۰۱۸-۲۰۱۷ (۹۷-۱۳۹۶) می‌باشد. داده‌های عملکرد گندم دیم شهرستان‌های مستعد دیم مطابق **جدول ۲** می‌باشد.

داده‌های بارش: با توجه به اینکه داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک مناطق مورد مطالعه کامل نمی‌باشد، از داده‌های باز تحلیل^۲ استفاده شد. داده‌های باز تحلیل‌شده از ترکیب نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا با انواع داده‌های محاسباتی و مشاهداتی از سنجنده‌های مختلف به دست می‌آید. داده‌های باز تحلیل‌شده Era5 پنجمین نسل از داده‌های پایگاه مرکز پیش‌بینی وضع آب‌وهوای اروپا (ECMWF)^۳ است که از اول ژانویه ۱۹۷۹، کل کره زمین را پوشش می‌دهند و دارای توان تفکیک مکانی و زمانی به ترتیب $25^{\circ} \times 25^{\circ}$ و یک ساعت می‌باشند (Parvaze, Khan, Kumar, & Allaie, 2021). بارش روزانه (میلی‌متر) از پایگاه داده Era5 در بازه زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ با فرمت NetCDF از آدرس الکترونیکی پایگاه داده ECMWF^۴ بارگیری و با استفاده از بسته ncd44 نرم‌افزار R استخراج گردید. داده‌های بارش روزانه (میلی‌متر) ایستگاه‌های سینوپتیک استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. از داده‌های مشاهداتی ۱۰ ایستگاه سینوپتیک واقع در شهرستان‌های بجنورد (استان خراسان شمالی)، گلکان، قوچان، کاشمر، مشهد، نیشابور، سبزوار، سرخس، تربت حیدریه و تربت جام (استان خراسان رضوی) در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ به‌منظور ارزیابی داده‌های Era5 امکان استفاده آن در منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

کارایی مجموعه داده‌های Era5 با استفاده از شاخص‌های برازش از جمله جذر میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) (معادله ۱)، ضریب همبستگی پیرسون^۶ (R) (معادله ۲)، میانگین خطای اریبی^۷ (MBE) (معادله ۳)، شاخص توافق^۸ (d) (معادله ۴) مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). هر چه مقدار d به‌دست‌آمده توسط مدل به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است که میزان پیش‌بینی را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده‌شده انجام دهد (Willmott et al., 1985).

بنابراین هدف از این تحقیق، محاسبه شاخص‌های آسیب‌پذیری، مخاطره^۱ و در نهایت ریسک خشکسالی برای تولید گندم دیم در مناطق مستعد دیم در شمال شرق ایران (استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی) است. همچنین در اکثر پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور برای محاسبه شاخص ریسک خشکسالی به آسیب‌پذیری و پارامترهای آن توجه ویژه‌ای نشده است. از این‌رو در این مطالعه، ارزیابی ریسک خشکسالی تولید گندم دیم با تمرکز ویژه بر شاخص‌های آسیب‌پذیری انجام شده است. این شاخص یک معیار ترکیبی با ورودی‌های متعدد بوده و تجزیه و تحلیل دقیق رویداد و تأثیر آن بر عملکرد محصول مد نظر نبوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی واقع در شمال شرقی ایران است. استان خراسان شمالی در محدوده جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی واقع شده که مساحت آن ۲۸۴۳۴ کیلومتر مربع است. استان خراسان رضوی نیز بین ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی قرار گرفته که مساحت آن ۱۱۸۸۵۱ کیلومتر مربع است. استان‌های خراسان در خشکسالی قدمت طولانی دارند و به‌طور کلی جزء مناطق نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شوند. براساس شاخص SPEI در یک دوره ده‌ساله منتهی به بهمن‌ماه سال ۱۴۰۰، ۸۹/۱ درصد از مساحت استان خراسان رضوی، ۸۹/۳ درصد از مساحت استان خراسان جنوبی و ۷۴/۲ درصد از مساحت استان خراسان شمالی با خشکسالی مواجه بوده‌اند (IranMeteorologicaOrganization, 2022).

گندم (*Triticum aestivum* L.) به‌عنوان مهم‌ترین گیاه زراعی استراتژیک ایران به‌علت اینکه جایگاه ویژه‌ای در بین محصولات زراعی دارد به‌عنوان گیاه مورد مطالعه انتخاب شد. بیشترین میزان تولید دیم در ایران مربوط به محصول گندم با تولید تقریبی ۳/۴ میلیون تن و سهم ۷۲/۴ درصد از کل تولیدات دیم در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ بوده است (MinistryofAgricultureofIran, 2023). اطلاعات سطح زیر کشت، تولید و عملکرد گندم دیم طی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در **جدول ۱** ارائه شده است.

داده‌ها و اطلاعات موردنیاز

داده‌های عملکرد: مناطق مستعد دیم با نظر محققان مرکز

1- Drought hazard index

2- Reanalysis data

3- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

4- European Center for Climate Prediction

5- Pearson Correlation Coefficient

6- Coefficient of Determination

7- Mean Bias Error

8- Index of Agreement

جدول ۱- ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

Table 1- Characteristics of the study area

موقعیت Location	سطح زیر کشت گندم دیم Cultivated area rainfed wheat (ha)	تولید گندم دیم Production of rainfed wheat (ton)	عملکرد گندم دیم Yield rainfed wheat (kg ha ⁻¹)
ایران Iran	4126513	3422716	829
خراسان رضوی Razavi Khorasan	59623	28700	481
خراسان شمالی North Khorasan	131568	102542	779

جدول ۲- عملکرد گندم دیم شهرستان‌های خراسان رضوی و خراسان شمالی طی سال‌های ۸۹-۱۳۸۸ لغایت ۹۷-۱۳۹۶

Table 2- Rainfed wheat yield in Razavi Khorasan and North Khorasan Counties during the years 2009-2010 to 2017-2018

شماره No.	شهرستان County	استان Province	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	2016- 2017	2017- 2018	میانگین Mean
1	بجنورد Bojnord	خراسان شمالی North Khorasan	987	501	754	602	831	949	1400	594	653	808
2	تربت حیدریه Torbat-Heydarieh	خراسان رضوی Razavi Khorasan	480	200	450	191	260	473	750	480	300	398
3	درگز Dargaz	خراسان رضوی Razavi Khorasan	800	280	900	463	480	709	1490	713	480	702
4	راز و جرگلان Raz-Jargalan	خراسان شمالی North Khorasan	886	450	677	623	667	655	1400	505	555	713
5	سرخس Sarakhs	خراسان رضوی Razavi Khorasan	300	160	350	245	250	142	1340	336	410	393
6	شیروان Shirvan	خراسان شمالی North Khorasan	723	410	449	641	715	751	1600	570	626	721
7	فاروج Faruj	خراسان شمالی North Khorasan	761	691	519	735	372	887	1600	687	755	779
8	فریمان Fariman	خراسان رضوی Razavi Khorasan	550	350	500	245	350	378	950	223	350	433
9	قوچان Ghuchan	خراسان رضوی Razavi Khorasan	874	650	750	490	492	803	1650	259	580	728
10	کلات Kalat	خراسان رضوی Razavi Khorasan	870	502	1050	436	290	945	1490	450	596	737
11	مانه و سملقان Mane-Samalghan	خراسان شمالی North Khorasan	1010	412	781	689	838	654	1300	618	678	776
12	نیشابور Neyshabur	خراسان رضوی Razavi Khorasan	400	250	550	256	300	520	850	356	300	420

جدول ۳- شاخص‌های بررسی کارایی مجموعه داده‌های Era5
Table 3- Indicators to check the efficiency of the data set of Era5

توضیحات	فرمول	بهترین مقدار	علامت اختصاری	شاخص
Description	Formula	Best amount	Abbreviation sign	Index
(۱)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$	0	RMSE	خطای جذر میانگین مربعات Root mean square error
(۲)	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2][\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2]}}$	1	R	ضریب همبستگی پیرسون Pearson correlation coefficient
(۳)	$\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n}$	0	MBE	میانگین خطای اریبی Mean bias error
(۴)	$1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i + O_i - \bar{O}_i)} \right)$	1	d	شاخص توافق Index of agreement

جدول ۴- ویژگی‌های نمونه خاک‌های استخراج‌شده از استان‌های خراسان رضوی و خراسان شمالی
Table 4- Soil properties for samples extracted from the Razavi Khorasan and North Khorasan provinces

No.	شهرستان	استان	شن	سیلت	رس	ماده آلی	ظرفیت نگهداری آب خاک
	County	Province	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	OC (%)	AWA (%)
1	بجنورد	خراسان شمالی	7	47	46	0.77	11.63
2	Torbat-Heydarieh	خراسان رضوی	44	34	22	0.58	10.67
3	Dargaz	خراسان رضوی	35	45	20	0.67	12.15
4	Raz- Jargalan	خراسان شمالی	27	47	26	0.76	9.33
5	Sarakhs	خراسان رضوی	44	34	22	0.46	11.08
6	Shirvan	خراسان شمالی	40	16	44	0.84	11.37
7	Faruj	خراسان شمالی	40	30	30	0.40	11.71
8	Fariman	خراسان رضوی	48	40	12	0.31	8.71
9	Ghuchan	خراسان رضوی	28	45	27	0.46	13.16
10	Kalat	خراسان رضوی	39	38	23	0.50	12.42
11	Mane- Samalghan	خراسان شمالی	21	48	31	0.78	10.91
12	Neyshabur	خراسان رضوی	37	38	25	0.96	13.21
	میانگین		34	39	27	0.62	11.36
	Mean						

داده‌های خاک

به منظور جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، ۶۰ نمونه خاک از مزارع ۱۲ شهرستان استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی از قطعاتی با ابعاد ۲۰ × ۲۰ سانتی‌متر در قالب طرح تصادفی برداشت شد.

در این مطالعات، n : تعداد روز مشاهداتی، O_i : مقدار متغیر مشاهده‌شده برای روز i ام و P_i مقدار متغیر شبیه‌سازی‌شده برای روز i ام، $O_{\max}$ و $O_{\min}$: به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار متغیر مشاهده‌شده و $\bar{O}$: نیز نشان‌دهنده میانگین مقادیر مشاهده‌شده می‌باشد (Van Wart, Grassini, & Cassman, 2013).

جدول ۵- سطح مکانیزاسیون استان‌های خراسان رضوی و خراسان شمالی (HP ha^{-1})Table 5- Level of mechanization of the Razavi Khorasan and North Khorasan provinces (HP ha^{-1})

شماره No.	شهرستان County	استان Province	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	2016- 2017	2017- 2018	میانگین Mean
1	بجنورد Bojnord	خراسان شمالی North Khorasan	1.80	1.80	1.83	1.88	1.90	1.95	2.00	2.15	2.25	1.95
2	تربت حیدریه Torbat- Heydarieh	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.92	0.95	0.97	1.13	1.13	1.10	1.23	1.30	1.82	1.17
3	درگز Dargaz	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.97	1.02	1.02	0.77	0.77	1.01	1.16	1.30	1.44	1.05
4	راز و جرگلان Raz- Jargalan	خراسان شمالی North Khorasan	0.80	1.00	1.00	1.05	1.15	1.20	1.24	1.26	1.25	1.11
5	سرخس Sarakhsh	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1.12	1.14	1.15	1.03	1.03	0.90	1.20	1.30	1.34	1.13
6	شیروان Shirvan	خراسان شمالی North Khorasan	1.20	1.35	1.37	1.40	1.40	1.45	1.50	1.60	1.70	1.44
7	فاروج Faruj	خراسان شمالی North Khorasan	0.90	0.97	1.00	1.10	1.15	1.20	1.60	1.65	1.73	1.26
8	فریمان Fariman	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1.41	1.44	1.44	1.63	1.63	1.60	1.45	1.47	1.65	1.52
9	قوچان Ghuchan	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.72	0.74	0.75	1.02	1.02	0.87	1.15	1.60	1.70	1.06
10	کلات Kalat	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.92	0.95	0.95	0.83	0.83	1.04	1.12	1.23	1.40	1.03
11	مانه و سملقان Mane- Samalghan	خراسان شمالی North Khorasan	0.95	1.10	1.15	1.20	1.30	1.40	1.45	1.60	1.65	1.31
12	نیشابور Neyshabur	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1.16	1.17	1.18	1.74	1.74	1.34	1.70	1.9	1.82	1.53

برای تبدیل آن به درصد ماده آلی از ضریب $1/724$ استفاده شد. میزان شن، سیلت و رس نمونه‌های خاک با استفاده از روش هیدرومتر برآورد شد (Gee & Bauder, 1979). اطلاعات بافت خاک (شن، رس و سیلت)، ماده آلی و ظرفیت نگهداری آب خاک هر شهرستان در جدول ۴ قابل مشاهده است.

داده‌های مکانیزاسیون: به منظور بررسی وضعیت مکانیزاسیون کشاورزی، آمار شاخص سطح مکانیزاسیون از سازمان جهاد کشاورزی استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی در بازه زمانی سال‌های ۸۹-۱۳۸۸ لغایت ۹۷-۱۳۹۶ به تفکیک شهرستان اخذ گردید. شاخص سطح مکانیزاسیون با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. شاخص سطح مکانیزاسیون شهرستان‌های مورد مطالعه در جدول ۵ قابل مشاهده است.

سطح مکانیزاسیون

مجموع توان کششی ماشین آلات کشاورزی (۱)

میانگین پنج ساله سطح زیر کشت

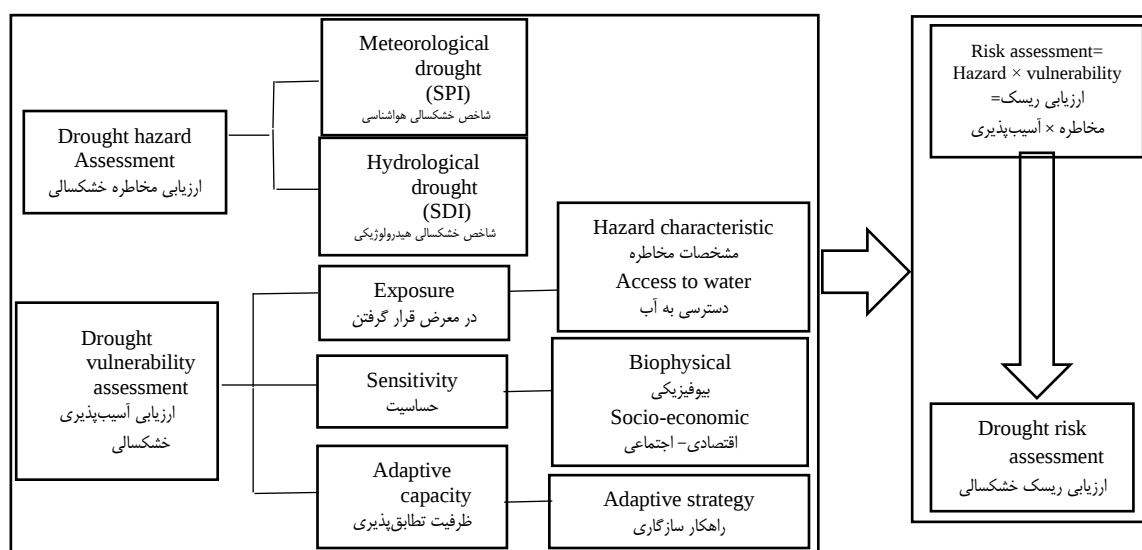
نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر خاک صورت گرفت و برای نیل به این هدف، پنج نمونه خاک از پنج نقطه در داخل هر قطعه نمونه (چهارگوشه و وسط) برداشت شد. در گام نخست، نمونه‌ها در هوای آزاد و دور از تابش مستقیم نور آفتاب خشک شده و کلیه ریشه‌های قابل جداسازی از نمونه‌ها خارج شدند و سپس نمونه‌ها کوبیده شدند و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری^۱ و حد رطوبت زراعی و حد رطوبت نقطه پژمردگی با استفاده از دستگاه صفحه فشاری تعیین شد و در نهایت از اختلاف حد رطوبت زراعی (FC^2) و حد رطوبت نقطه پژمردگی (PWP^3)، ظرفیت نگهداری آب خاک (SWHC^4) به دست آمد (Lakzian, AVAL, & Gorbantzadeh, 2010). درصد کربن آلی نیز با روش والکی و بلک (Walkley & Black, 1934) تعیین و

- 1- Hydrometer method
- 2- Field capacity
- 3- Permanent wilting point
- 4- Soil water holding capacity

می‌باشند (Ahsan & Warner, 2014; Birkmann, 2008; Liu, Wang, Peng, Braimoh, & Yin, 2013; Murthy *et al.*, 2015). شکل ۲، نمونه‌ای از چارچوب مفهومی محاسبه ریسک خشکسالی می‌باشد.

محاسبه شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی (DVI)
لیست پارامترهای ورودی برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی در جدول ۶ ذکر شده است.

چارچوب مفهومی شاخص آسیب‌پذیری و ریسک خشکسالی برای ارزیابی ریسک خشکسالی روش‌های متعددی وجود دارد. دو مؤلفه مهم در ارزیابی ریسک، مخاطره و آسیب‌پذیری می‌باشند که در مطالعات و تحقیقات مختلف با استفاده از شاخص‌های متفاوتی محاسبه می‌گردند (Sharafi, Zarafshani, Keshavarz, Azadi, & Van Passel, 2020). چون در معرض قرار گرفتن، حساسیت و ظرفیت تطابق‌پذیری سه جزء شاخص آسیب‌پذیری هستند، مطالعات مبتنی بر اندازه‌گیری شاخص آسیب‌پذیری که به بررسی نقش اقلیم و بلایای طبیعی می‌پردازند به‌طور مؤثری تحت تأثیر این سه جزء



شکل ۲- چارچوب مفهومی ریسک خشکسالی (Sharafi *et al.*, 2020)
Figure 2- Conceptual framework for risk assessment (Sharafi *et al.*, 2020)

سازشی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها ارائه می‌شود. این روش یک مدل یکپارچه از روش جمع وزنی ساده (SAW^2) و مدل ضرب وزنی (WPM^3) می‌باشد. مراحل این روش مطابق روابط (۳) تا (۱۱) می‌باشد (Yazdani *et al.*, 2018).

۱- ماتریس تصمیم‌گیری اولیه مطابق رابطه (۳) است:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

۲- نرمال‌سازی تقریباً در تمام روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره صورت می‌گیرد. در این گام براساس معادلات ماتریس تصمیم نرمال می‌شود، از رابطه (۸) برای معیارهای مثبت و از رابطه (۹) برای معیارهای منفی استفاده می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}; \text{for positive Indicator} \quad (4)$$

شاخص‌های ورودی مدل آسیب‌پذیری شامل نه شاخص در معرض قرار گرفتن، یک شاخص حساسیت و دو شاخص ظرفیت تطابق‌پذیری است. ماتریس داده‌ها با ۱۲ شاخص و ۱۲ شهرستان برای گندم دیم برای تحلیل بیشتر که شامل نرمال‌سازی داده‌ها و ساخت شاخص‌های ترکیبی است، تشکیل می‌شود. در نهایت، سه شاخص به دست آمد که از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه است (Murthy *et al.*, 2015).

$$ADVI = EI + SI - AI \quad (2)$$

برای حل مشکل چند معیاره بودن شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی از روش کوکوسو ($CoCoSo^1$) استفاده شد. این روش از تکنیک‌های جدید تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد که توسط یزدانی و همکاران (Yazdani, Zarate, Kazimieras Zavadskas, & Turskis, 2018) ارائه شده است. در این روش، یک راه حل ترکیبی

$$r_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \text{ For negative Indicator ; } \quad (5)$$

۳- در این گام براساس روابط (۶) و (۷) مقادیر جمع وزنی (S) و ضرب وزنی (P) برای هر گزینه محاسبه می‌شود.

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j r_{ij}) \quad (6)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (7)$$

که در آن‌ها: W_j وزن معیارها می‌باشد که به‌عنوان ورودی وارد روش COCOSO شده است. وزن معیارها از طریق روش AHP محاسبه شد. مقادیر S_i در واقع از روش SAW و مقادیر P_i از روش واسپاس گرفته شده است.

۴- در این مرحله، امتیاز گزینه‌ها براساس سه راهبرد از روابط (۸)، (۹) و (۱۰) حاصل می‌شود.

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^m (P_i + S_i)} \quad (8)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min S_i} + \frac{P_i}{\min P_i} \quad (9)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda(S_i) + (1-\lambda)(P_i)}{(\lambda \max S_i + (1-\lambda) \max P_i)}; 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (10)$$

۵- در این مرحله، براساس رابطه (۱۱) امتیاز نهایی محاسبه می‌شود، در واقع این رابطه بیانگر جمع میانگین هندسی و میانگین حسابی سه استراتژی مرحله قبل می‌باشد. امتیاز (k) هر گزینه‌ای بزرگتر باشد، نشان از برتری آن گزینه دارد.

$$(11)$$

$$k_i = (k_{ia} \times k_{ib} \times k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3}(k_{ia} + k_{ib} + k_{ic})$$

خروجی شاخص ADVI به‌جای اینکه معرف شرایط خاص در مناطق مورد مطالعه باشد، تفاوت‌های نسبی بین مناطق را منعکس می‌کند. شاخص آسیب‌پذیری می‌تواند بین ۰ و ۱ متغیر باشد که به‌ترتیب حداقل و حداکثر آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. براساس فواصل تعریف‌شده در جدول ۷، شهرستان‌ها به سطوح مختلف شاخص آسیب‌پذیری و اجزاء آن طبقه‌بندی می‌شوند (Murthy et al., 2015).

جدول ۶- پارامترها و شاخص‌های اجزای مختلف آسیب‌پذیری

Table 6- Parameters and indexes of different vulnerability components

پارامتر Parameter	شاخص Indicator	منبع Study
الف- اجزاء در معرض قرار گرفتن A- Exposure component	۱- میانگین 1- Mean	(Murthy et al., 2015)
مجموع بارندگی فصل رشد Total season rainfall	۲- ضریب تغییرات 2- Coefficient of variation (CV)	
	۳- تواتر خشکسالی 3- Drought frequency	
ب- اجزاء حساسیت B- Sensitivity component	عملکرد مورد انتظار/عملکرد واقعی $\frac{\text{expected yield}}{\text{actual yield}}$	(Antwi-Agyei, Fraser, Dougill,) (Stringer, & Simelton, 2012)
ج- اجزاء ظرفیت تطابق‌پذیری C- Adaptive capacity component	ظرفیت نگهداری آب خاک Soil water holding capacity	Authors
۱- خاک 1- Soil	مجموع توان کششی ماشین‌آلات کشاورزی/ میانگین پنج‌ساله سطح زیر کشت دائمی	Authors
۲- دسترسی به تکنولوژی (سطح مکانیزاسیون) 2- Access to technology (Level of mechanization)	Total tractive power of agricultural machines/five-year average of permanent cultivated area	

جدول ۷- دسته‌بندی آسیب‌پذیری، در معرض قرار گرفتن، ظرفیت تطابق‌پذیری و حساسیت (Murthy et al., 2015)
Table 7- Vulnerability, exposure, adaptive capacity and sensitivity categorization (Murthy et al., 2015)

امتیاز Score	دسته‌بندی حساسیت Class of sensitivity	ظرفیت تطابق‌پذیری Adaptive capacity	در معرض قرار گرفتن Exposure index	آسیب‌پذیری Vulnerability	امتیاز Score
< 1	کمتر حساس Less sensitive	کمتر تطابق‌پذیر Less adaptable capacity	کمتر در معرض واقع شده Less exposed	کمتر آسیب‌پذیر Less vulnerable	< 0.2
1-1.05	متوسط حساس Moderately sensitive	متوسط تطابق‌پذیر Moderately adaptable capacity	متوسط در معرض واقع شده Moderately exposed	متوسط آسیب‌پذیر Moderately vulnerable	0.2-0.4
1.05-1.1	حساس Sensitive	تطابق‌پذیر Adaptable capacity	در معرض واقع شده Exposed	آسیب‌پذیر Vulnerable	0.4-0.6
1.1-1.15	زیاد حساس Highly sensitive	زیاد تطابق‌پذیر Highly adaptable capacity	زیاد در معرض واقع شده Highly exposed	زیاد آسیب‌پذیر Highly vulnerable	0.6-0.8
> 1.15	بسیار زیاد حساس Very highly sensitive	بسیار زیاد تطابق‌پذیر Very highly adaptable capacity	بسیار زیاد در معرض واقع شده Very highly exposed	بسیار زیاد آسیب‌پذیر Very highly vulnerable	> 0.8

محاسبه شاخص مخاطره خشکسالی (DHI)

برای اندازه‌گیری شاخص مخاطره خشکسالی از SPI به‌عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری کمیت خشکسالی استفاده شد (Guttman, 1999; McKee, Doesken & Kleist, 1993). در واقع، SPI عبارت است از متغیری از تابع توزیع نرمال استاندارد که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مورد نظر از توزیع گامای به‌دست‌آمده، مساوی باشد. رویه محاسباتی برای تعیین SPI شامل مراحل زیر است: (الف) ابتدا یک تابع چگالی احتمال مناسب (PDF¹) برای بارش جمع‌آوری شده در مقیاس زمانی مورد نظر برازش داده می‌شود (ب) سپس هر PDF به یک توزیع احتمال نرمال استاندارد تبدیل می‌شود. روش ریاضی دقیق برای محاسبه SPI در مطالعات مک‌کی و همکاران (McKee et al., 1993)، گاتمن (Guttman, 1999)، میشر و سینگ (Mishra & Singh, 2010) و شِن (Şen, 2015) اشاره شده است. در این مطالعه از SPI-3 برای تعیین کمیت مخاطره استفاده شد. مقاطع مورد بررسی به‌صورت فصلی (پاییز، زمستان و بهار) در نظر گرفته شد و دلیل استفاده از مقاطع فصلی به‌جای دوره فصل رشد گندم دیم (نه ماهه) این است که به‌طور مثال، در سالی که SPI پاییز در منطقه‌ای منفی باشد و SPI زمستان و بهار مثبت باشد، احتمالاً SPI نه‌ماهه مثبت خواهد بود، اما SPI منفی پاییز باعث تأثیر منفی بر رشد و استقرار مناسب گندم دیم خواهد بود که در نهایت بر عملکرد تأثیر منفی خواهد داشت، در صورتی که مبنای محاسبات، SPI نه‌ماهه در نظر گرفته شود، این تأثیر قابل بررسی نخواهد بود.

به‌طور کلی، مخاطره، احتمال وقوع یک پدیده بالقوه مخرب را به‌صورت کمی بیان می‌کند. از آنجاکه مخاطره بیانگر نوعی احتمال

است، از این‌رو بین صفر تا یک متغیر است. در این بخش، مخاطره به‌صورت حاصل‌ضرب اندازه و فراوانی وقوع یک رویداد خشکسالی اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از یک سیستم وزن‌دهی مبتنی بر تابع توزیع تجمعی (شکل ۳)، مقادیر وزن (W) و درجه‌بندی (R) براساس تابع احتمال تجمعی نرمال و با استفاده از شدت و احتمال وقوع پدیده، به ارزیابی خطر خشکسالی اختصاص داده می‌شوند (جدول ۸).

$$DHI = LD_r \times LD_w + MD_r \times MD_w + SD_r \times SD_w + ED_r \times ED_w \quad (12)$$

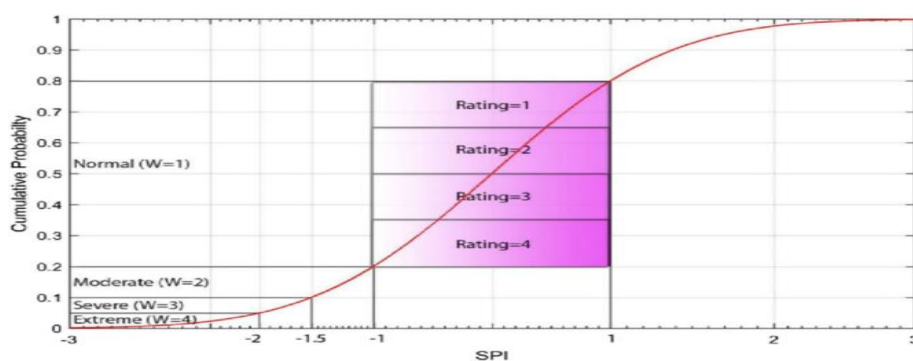
شاخص ریسک خشکسالی (DRI) از حاصل‌ضرب شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی و شاخص مخاطره خشکسالی مطابق رابطه (۱۳) به دست می‌آید (Kim, Park, Yoo, & Kim, 2015; Wilhite, 2000).

$$DRI = DHI \times DVI \quad (13)$$

نتایج و بحث

نتایج اعتبارسنجی داده‌های روزانه شبیه‌سازی شده پایگاه داده ERA5 را مقایسه با داده‌های مشاهداتی در خصوص متغیر بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ارائه شده است. بیشترین مقدار ضریب همبستگی پیرسون در ایستگاه مشهد (۰/۷۷) و کمترین مقدار ضریب همبستگی پیرسون در ایستگاه کاشمر (۰/۶۴) مشاهده شد. بیشترین مقدار RMSE برای ایستگاه نیشابور (۳/۰۷ میلی‌متر در ماه) و کمترین برای ایستگاه تربت‌جام (۲/۲۵ میلی‌متر در ماه) می‌باشد. شاخص توافق کلیه ایستگاه‌ها بین ۰/۷۱ تا ۰/۸۳ می‌باشد.

1- Probability density function



شکل ۳- مقادیر وزنی و درجه‌بندی براساس توزیع احتمال تجمعی نرمال SPI (Dabanli, 2018)

Figure 3- Weight and rating scores based on normal cumulative probability distribution of SPI (Dabanli, 2018)

جدول ۸- وزن و درجه‌بندی برای شدت خشکسالی برای DHI

Table 8- Weight and rate for drought severity for DHI (Dabanli, 2018; Khoshnazar *et al.*, 2021)

مقدار شاخص خشکسالی Drought index value	دسته‌بندی Category	وزن Weight (D _w)	احتمال وقوع Occurrence probability	رتبه‌بندی Rating (D _r)
≤ -2	خیلی شدید Extreme (E)	4	خیلی زیاد Very high	
			زیاد High	4
			کم Low	3
			خیلی کم Very low	2
-1.5 to -1.99	شدید Severe (S)	3	خیلی زیاد Very high	
			زیاد High	4
			کم Low	3
			خیلی کم Very low	2
-1 to -1.49	متوسط Moderate (M)	2	خیلی زیاد Very high	
			زیاد High	4
			کم Low	3
			خیلی کم Very low	2
0 to -0.99	کم Low (L)	1	خیلی زیاد Very high	
			زیاد High	4
			کم Low	3
			خیلی کم Very low	2

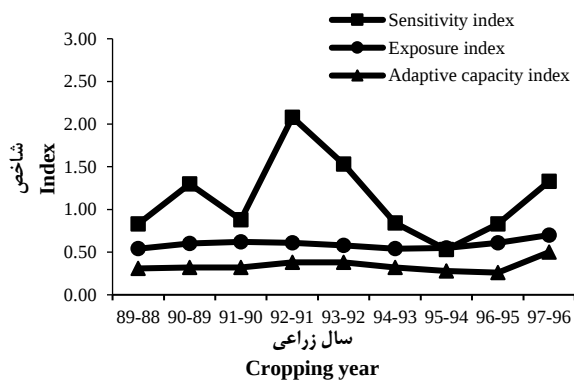
جدول ۹- اعتبارسنجی مقادیر بارش ماهانه مشاهده شده ایستگاه‌های سینوپتیک در استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی با ERA5
Table 9- Validation of observed monthly precipitation values of synoptic stations in North and Razavi provinces with ERA5 data

شماره No.	شهرستان County	استان Province	ارتفاع از سطح دریا distance above sea level (m)	طول جغرافیایی Longitude (°)	عرض جغرافیایی Latitude (°)	زمان مطالعه Study period	R	شاخص توافق d	خطای جزئی میانگین مربعات RMSE	میانگین خطای ارزیابی MBE
1	بجنورد Bojnord	خراسان شمالی North Khorasan	1065	57.3	37.48	1989-2018	0.68	0.76	2.69	-0.35
2	گلمکان Golmakan	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1176	59.28	36.48	1989-2018	0.68	0.74	2.89	-0.60
3	قوچان Ghuchan	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1270	58.45	37.11	1989-2018	0.70	0.77	2.76	0.04
4	کاشمر Kashmar	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1109	58.47	35.27	1989-2018	0.64	0.71	2.35	-0.10
5	مشهد Mashhad	خراسان رضوی Razavi Khorasan	999	59.63	36.23	1989-2018	0.77	0.83	2.35	-0.17
6	نیشابور Neyshabur	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1213	58.8	36.26	1992-2018	0.66	0.71	3.07	-0.53
7	سبزوار Sabzevar	خراسان رضوی Razavi Khorasan	962	57.64	36.20	1989-2018	0.69	0.75	2.90	-0.58
8	سرخس Sarakhs	خراسان رضوی Razavi Khorasan	278	61.14	36.53	1992-2018	0.71	0.75	2.41	0.16
9	تربت حیدریه Torbat-Heydarieh	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1451	59.2	35.33	1989-2018	0.70	0.77	2.93	-0.34
10	تربت جام Torbat-Jam	خراسان رضوی Razavi Khorasan	950	60.56	35.29	1992-2018	0.66	0.74	2.25	-0.19

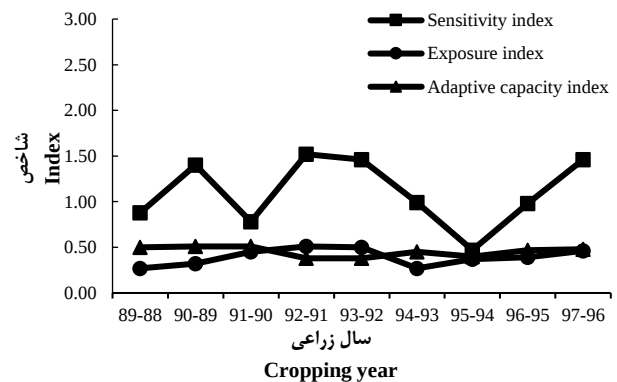
شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی

شاخص‌های حساسیت، در معرض قرار گرفتن و ظرفیت تطابق‌پذیری در منطقه مورد مطالعه طی سال‌های ۸۹-۱۳۸۸ لغایت ۹۷-۱۳۹۶ در شکل ۴ (A-L) و جدول ۱۰ نمایش داده شده است. نتایج نشان دادند که شاخص حساسیت خشکسالی در سال‌های ۹۰-۱۳۸۹ و ۹۲-۱۳۹۱ در تمامی شهرستان‌ها بیش از یک می‌باشد و این موضوع نشان‌دهنده آن است که در تمامی این شهرستان‌ها، عملکرد گندم دیم در سال‌های مورد نظر کمتر از میانگین درازمدت می‌باشد.

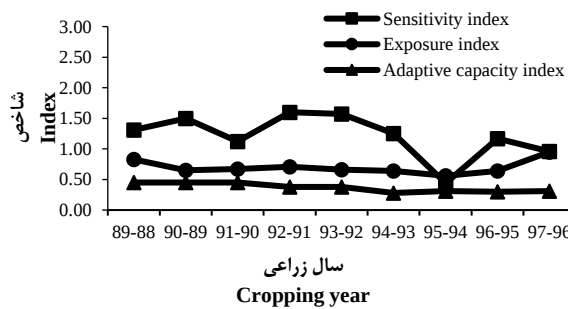
همچنین با توجه به معیار MBE کمترین مقدار میانگین انحراف خطا مربوط به ایستگاه قوچان (۰/۰۴) و بیشترین مقدار این شاخص مربوط به ایستگاه سبزوار (۰/۵۸-) می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی شاخص‌های مورد مطالعه، بیانگر اعتبار و قابلیت مناسب ERA5 در شبیه‌سازی متغیر بارش است (جدول ۹). مطالعات دیگری نیز که در ایران انجام شده است دقت این پایگاه داده را تأیید می‌کند (Azizi Mobaser, Rasoulzadeh, Rahmati, Shayeghi, & Bakhtar, 2020; Mohammadi Ghalehi & Sharafi, 2022).



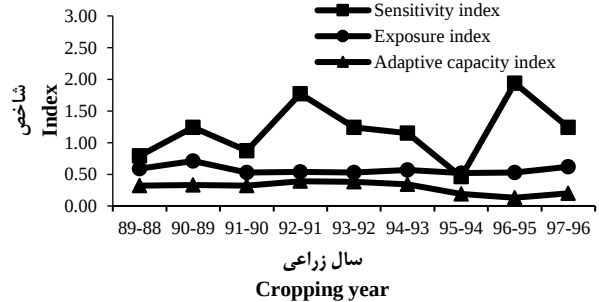
A) Torbat-Heydarieh



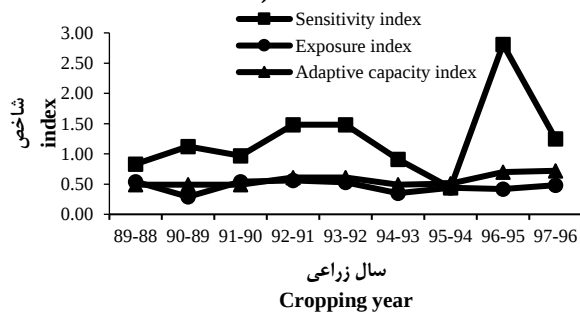
B) Dargaz



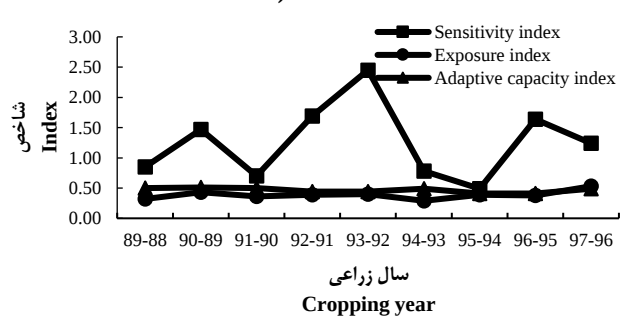
C) Sarakhs



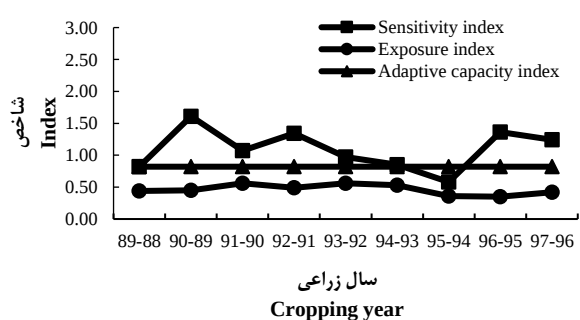
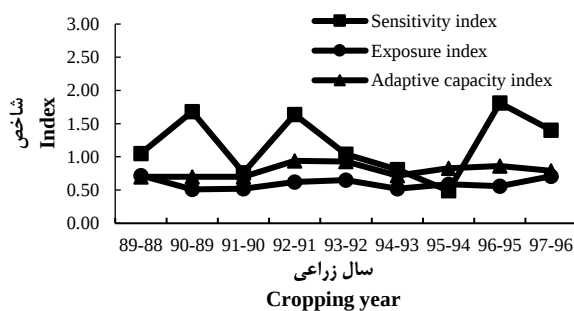
D) Fariman

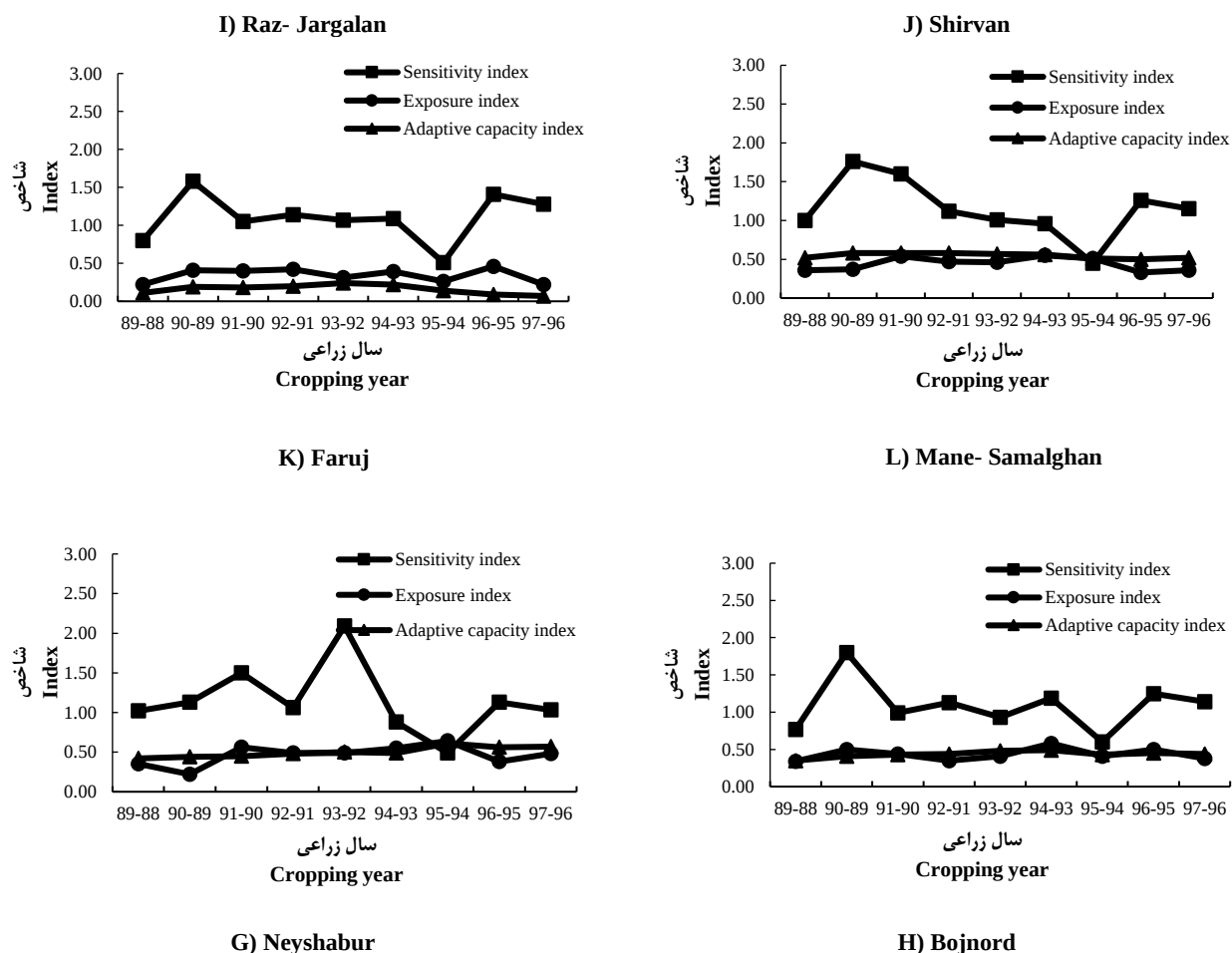


E) Ghuchan



F) Kalat





شکل ۴- شاخص حساسیت، در معرض قرار گرفتن و ظرفیت تطابق پذیری گندم دیم در استان های خراسان شمالی و خراسان رضوی طی سال های ۸۹-۱۳۸۸ لغایت ۹۷-۱۳۹۶

Figure 4- Sensitivity index, exposure index and adaptive capacity index of the Razavi Khorasan and North Khorasan Provinces during the years 2009-2010 to 2017-2018

جدول ۱۰- شاخص حساسیت، در معرض قرار گرفتن، ظرفیت تطابق پذیری و آسیب پذیری خشکسالی گندم دیم شهرستان های استان خراسان شمالی و خراسان رضوی در دوره ۹ ساله

Table 10- Sensitivity index, exposure index and adaptive capacity index of the Razavi Khorasan and North Khorasan provinces in a period of 9 years

شماره No.	شهرستان County	شاخص حساسیت Sensitivity index			شاخص در معرض قرار گیری Exposure index			شاخص ظرفیت تطابق پذیری Adaptive capacity index			شاخص آسیب پذیری خشکسالی Drought vulnerability index		
		امتیاز Score	کلاس Class	رتبه Rank	امتیاز Score	کلاس Class	رتبه Rank	امتیاز Score	کلاس Class	رتبه Rank	امتیاز Score	کلاس Class	رتبه Rank
1	بجنورد Bojnord	1.09	متوسط حساس Moderately sensitive	11	0.46	در معرض واقع شده Exposed	6	0.82	بسیار زیاد تطابق پذیر Very highly adaptable capacity	1	0.34	متوسط آسیب پذیر Moderately vulnerable	7

شماره No.	شهرستان County	شاخص آسیب پذیری خشکسالی Drought vulnerability index			شاخص ظرفیت تطابق پذیری Adaptive capacity index			شاخص در معرض قرار گیری Exposure index			شاخص حساسیت Sensitivity index		
		امتیاز Score	کلاس Class	رتبه Rank	امتیاز Score	کلاس Class	رتبه Rank	امتیاز Score	کلاس Class	رتبه Rank	امتیاز Score	کلاس Class	رتبه Rank
2	تربت حیدریه Torbat-Heydarieh	1.13	حساس Sensitive	8	0.59	در معرض واقع شده Exposed	3	0.34	متوسط تطابق پذیر Moderately adaptable capacity	10	0.51	آسیب پذیر Vulnerable	5
3	درگز Dargaz	1.10	حساس Sensitive	9	0.39	متوسط در معرض واقع شده Moderately Exposed	10	0.45	تطابق پذیر Adaptable capacity	7	0.01	کمتر آسیب پذیر Less vulnerable	11
4	راز و جرگلان Raz-Jargalan	1.10	حساس Sensitive	10	0.34	متوسط در معرض واقع شده Moderately Exposed	12	0.16	کمتر تطابق پذیر Less adaptable capacity	12	0.51	آسیب پذیر Vulnerable	4
5	سرخس Sarakhs	1.21	زیاد حساس Highly sensitive	3	0.70	زیاد در معرض واقع شده Highly Exposed	1	0.37	متوسط تطابق پذیر Moderately adaptable capacity	9	1.00	بسیار زیاد آسیب پذیر Very highly vulnerable	1
6	شیروان Shirvan	1.15	حساس sensitive	6	0.44	در معرض واقع شده Exposed	8	0.55	تطابق پذیر Adaptable capacity	4	0.48	آسیب پذیر Vulnerable	6
7	فاروج Faruj	1.15	حساس sensitive	7	0.46	در معرض واقع شده Exposed	7	0.50	متوسط تطابق پذیر Adaptable capacity	5	0.30	آسیب پذیر Moderately vulnerable	8
8	فریمان Fariman	1.19	حساس sensitive	4	0.57	در معرض واقع شده Exposed	4	0.29	متوسط تطابق پذیر Moderately adaptable capacity	11	0.79	زیاد آسیب پذیر Highly vulnerable	2
9	قوچان Ghuchan	1.25	زیاد حساس Highly sensitive	2	0.46	در معرض واقع شده Exposed	5	0.57	تطابق پذیر Adaptable capacity	3	0.13	کمتر آسیب پذیر Less vulnerable	10
10	کلات Kalat	1.26	زیاد حساس Highly sensitive	1	0.39	متوسط در معرض واقع شده Moderately Exposed	11	0.47	تطابق پذیر Adaptable Capacity	6	0.00	کمتر آسیب پذیر Less vulnerable	12
11	مانه و سملقان Mane-Samalghan	1.09	متوسط حساس Moderately Sensitive	12	0.43	در معرض واقع شده Exposed	9	0.44	تطابق پذیر Adaptable capacity	8	0.55	آسیب پذیر Vulnerable	3
12	نیشابور Neyshabur	1.19	حساس Sensitive	5	0.60	در معرض واقع شده Exposed	2	0.80	زیاد تطابق پذیر Highly adaptable capacity	2	0.26	متوسط آسیب پذیر Moderately vulnerable	9

بارندگی می‌باشد که در این مطالعه، عواملی همچون میانگین بارندگی، ضریب تغییرات بارندگی و SPI مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه‌ای، دیمز (Deems, 2010) از میانگین بارندگی سالانه و SPI برای محاسبه این شاخص استفاده کرد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، پریرا و همکاران (Pereira et al., 2014) برای محاسبه این جزء از شاخص آسیب‌پذیری از شاخص خشکی استفاده نمودند.

در بین شهرستان‌های مورد بررسی، بجنورد بیشترین و راز و جرگلان، کمترین ظرفیت تطابق‌پذیری خشکسالی را نشان دادند (جدول ۱۰). ظرفیت نگهداری آب خاک در مزارع دیم شهرستان بجنورد، ۱۱/۶۳ درصد می‌باشد که از میانگین ظرفیت نگهداری آب خاک مناطق مورد مطالعه بیشتر است. همچنین سطح مکانیزاسیون این شهرستان از کلیه مناطق مورد مطالعه بیشتر است (جدول ۴). کشت مکانیزه می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای در مصرف آب در بخش کشاورزی صرفه‌جویی کند. همچنین با به‌کارگیری این روش، محصولات کشاورزی در زمان مناسب برداشت می‌شوند و از گرمای پایان فصل و خسارات ناشی از آن جلوگیری می‌شود.

نتایج نشان داد که در بین شهرستان‌های مورد بررسی، در شهرستان سرخس، تولید گندم دیم با آسیب‌پذیری خشکسالی خیلی زیاد مواجه است و این شاخص در شهرستان‌های کلات، درگز و قوچان از سایر شهرستان‌ها کمتر می‌باشد. مناطق مستعد دیم در استان خراسان شمالی در رده متوسط آسیب‌پذیر و آسیب‌پذیر قرار دارند، اما مناطق مستعد دیم در استان خراسان رضوی تحت تأثیر آسیب‌پذیری کمتر تا خیلی زیاد قرار دارند.

شاخص مخاطره خشکسالی

نتایج بررسی شاخص مخاطره خشکسالی طی سال‌های ۸۹-۱۳۸۸ لغایت ۹۷-۱۳۹۶ در جدول ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار شاخص مخاطره خشکسالی مربوط به سال‌های زراعی ۹۰-۱۳۸۹ و ۹۳-۱۳۹۲ می‌باشد. در بین شهرستان‌های مورد بررسی، شهرستان‌های بجنورد، شیروان، مانه و سملقان بیشترین مقدار را در شاخص مخاطره خشکسالی دارند و در رده خیلی زیاد قرار گرفته‌اند و شهرستان‌های فاروج، درگز و قوچان کمترین مقدار را در این شاخص بین شهرستان‌های مورد بررسی دارند.

همچنین در کلیه شهرستان‌های مورد بررسی، کاهش قابل توجهی در شاخص حساسیت خشکسالی در سال ۹۵-۱۳۹۴ مشاهده می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده این است که عملکرد گندم دیم در سال مورد نظر بیش از میانگین درازمدت می‌باشد و وضعیت اقلیمی به‌گونه‌ای بوده است که میزان عملکرد در این سال زراعی افزایش داشته است (شکل ۴. A-L).

نتایج نشان داد که در شهرستان سرخس، میزان تغییرات شاخص حساسیت خشکسالی در سال‌های مورد مطالعه نسبت به سایر شهرستان‌ها کمتر می‌باشد و در شهرستان‌های درگز، راز و جرگلان و نیشابور میزان تغییرات این شاخص نسبت به سایر شهرستان‌ها بیشتر است (شکل ۴. A-L). شهرستان‌های کلات، قوچان و سرخس در طبقه زیاد حساس قرار دارند و شهرستان‌های مانه و سملقان و بجنورد در طبقه متوسط حساس و سایر شهرستان‌ها در طبقه حساس هستند (جدول ۱۰). در این مطالعه از نسبت میانگین درازمدت عملکرد گندم دیم به عملکرد سال مورد نظر برای محاسبه شاخص حساسیت خشکسالی استفاده شد. بررسی سایر مطالعات نشان می‌دهد که از عوامل مختلف مختلف برای محاسبه شاخص حساسیت خشکسالی استفاده شده است که علت این امر به اهداف متفاوت (اجتماعی، اقتصادی، نهادی، کشاورزی و ...) و ابعاد منطقه مورد مطالعه (جهانی، قاره‌ای، ملی، منطقه‌ای و محلی) مربوط می‌شود. آسیماکوپولوس و همکاران (Assimacopoulos et al., 2014) در مطالعه‌ای برای محاسبه شاخص حساسیت خشکسالی از عناصری همچون سطح آب‌های زیرزمینی، کیفیت آب، تراکم جمعیت، درصد کشت‌های آبی و سهم بخش کشاورزی در تولید ناخالص ملی استفاده نمودند. در مطالعه‌ای دیگر در کشور چین از عناصر آب‌وهوایی همچون تغییرات بارندگی، واریانس دما و فقدان پوشش گیاهی برای محاسبه شاخص حساسیت خشکسالی استفاده شده است (Liu et al., 2013). یوان و همکاران (Yuan et al., 2013) در مطالعه آسیب‌پذیری خشکسالی منطقه‌ای چین و راهبردهای کاهش آن، برای محاسبه شاخص حساسیت خشکسالی از عناصری همچون سهم زمین‌های زراعی، سهم شالیزارها و تراکم جمعیت استفاده نمودند.

بررسی نتایج نشان داد که شهرستان سرخس بیشتر از سایر شهرستان‌ها در معرض خشکسالی واقع شده است همچنین شهرستان‌های راز و جرگلان، کلات و درگز به‌صورت متوسط در معرض خشکسالی قرار گرفتند (جدول ۱۰). شاخص در معرض خشکسالی واقع شدن نشان‌دهنده اقلیم منطقه از لحاظ ویژگی‌های

جدول ۱۱- شاخص مخاطره خشکسالی شهرستان‌های استان خراسان شمالی و خراسان رضوی
Table 11- Drought hazard index of the Razavi Khorasan and North Khorasan provinces

No.	شهرستان County	استان Province	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	2016- 2017	2017- 2018	جمع Sum	امتیاز Score	کلاس Class
1	بجنورد Bojnord	خراسان شمالی North Khorasan	1	19	2	6	12	6	3	9	7	65	1.00	Very high
2	تربت حیدریه Torbati-Heydarieh	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1	7	1	8	9	3	2	9	7	47	0.38	Medium
3	درگز Dargaz	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0	6	5	3	8	3	2	8	6	41	0.17	Low
4	راز و جرگلان Raz-Jargalan	خراسان شمالی North Khorasan	0	19	2	5	11	5	2	11	1	56	0.69	High
5	سرخس Sarakhs	خراسان رضوی Razavi Khorasan	4	11	8	8	4	4	3	2	10	54	0.62	High
6	شیروان Shirvan	خراسان شمالی North Khorasan	1	18	1	9	16	3	0	6	8	62	0.90	Very high
7	فاروج Faruj	خراسان شمالی North Khorasan	0	2	3	6	12	2	1	4	6	36	0.00	Low
8	فریمان Fariman	خراسان رضوی Razavi Khorasan	3	9	2	3	10	4	3	6	9	49	0.45	Medium
9	قوچان Ghuchan	خراسان رضوی Razavi Khorasan	2	4	3	5	8	3	1	7	10	43	0.24	Low
10	کلات Kalat	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0	5	4	4	8	3	4	8	8	44	0.28	Medium
11	مانه و مسلمقان Mane-Samalghan	خراسان شمالی North Khorasan	1	20	2	5	10	5	3	13	3	62	0.90	Very high
12	نیشابور Neyshabur	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1	4	0	6	13	2	4	9	14	53	0.59	High
	مجموع Sum		14	120	33	68	121	43	28	92	89	14		

شاخص ریسک خشکسالی

نتایج شاخص ریسک خشکسالی در جدول ۱۲ ارائه شده است. تولید گندم در شهرستان‌های فاروج، کلات، درگز، قوچان، نیشابور، تربت حیدریه با ریسک کم صورت می‌پذیرد و این ریسک در شهرستان‌های بجنورد، راز و جرگلان، فریمان، شیروان و مانه و مسلمقان متوسط است. از علل اصلی که گندم در اکثر شهرستان‌های واقع شده در استان خراسان شمالی با ریسک متوسط

تولید می‌شود، بالا بودن شاخص مخاطره خشکسالی در این شهرستان‌ها به‌ویژه در سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹ می‌باشد (جدول ۱۱). همچنین ریسک تولید گندم در شهرستان سرخس زیاد می‌باشد. شاخص ریسک خشکسالی تولید گندم در کلیه شهرستان‌های استان خراسان شمالی به‌جز فاروج در رده متوسط قرار گرفته‌اند (جدول ۱۲). اسلامی و همکاران (Eslami, Mirisoliman, & Rashidi, 2021) نیز در مطالعه‌ای در بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۹۹۰ دریافتند که حدود ۸۵ درصد سطح استان خراسان شمالی در سال‌های

مورد مطالعه تحت تأثیر آسیب‌پذیری متوسط تا شدید دارد. همچنین تقریباً ۷۵ درصد از کل سطح استان دارای ریسک خشکسالی متوسط تا شدید بوده است. در بین شهرستان‌های استان خراسان شمالی، شهرستان‌های شیروان و مانه و سملقان بیشترین ریسک تولید گندم دیم را دارند که نتایج مطالعه میری سلیمانی و همکاران

(Mirisoliman, Ownegh, & Barani, 2020) نیز این نتیجه را تأیید می‌کند، همچنین این محققان عنوان نمودند که عامل ظرفیت نگهداری آب خاک، بیشترین وزن تأثیر را در بین شاخص‌های مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی دارد.

جدول ۱۲- شاخص ریسک خشکسالی استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی

Table 12- Drought risk index of the Razavi Khorasan and North Khorasan provinces

No.	شهرستان County	استان Province	امتیاز Score	رتبه Rank	کلاس Class
1	بجنورد Bojnord	خراسان شمالی North Khorasan	0.34	6	Medium
2	تربت حیدریه Torbat-Heydarieh	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.19	7	Low
3	درگز Dargaz	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.00	10	Low
4	راز و جرگلان Raz-Jargalan	خراسان شمالی North Khorasan	0.35	5	Medium
5	سرخس Sarakhsh	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.62	1	High
6	شیروان Shirvan	خراسان شمالی North Khorasan	0.43	3	Medium
7	فاروج Faruj	خراسان شمالی North Khorasan	0.00	12	Low
8	فریمان Fariman	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.36	4	Medium
9	قوچان Ghuchan	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.03	9	Low
10	کلات Kalat	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.00	11	Low
11	مانه و سملقان Mane- Samalghan	خراسان شمالی North Khorasan	0.50	2	Medium
12	نیشابور Neyshabur	خراسان رضوی Razavi Khorasan	0.15	8	Low

رس خاک مهم‌ترین متغیرهای تعیین‌کننده عملکرد گندم دیم می‌باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که ریسک تولید گندم دیم در نیمی از شهرستان‌های مورد مطالعه، کم می‌باشد، یکی از شهرستان‌های استان خراسان شمالی و پنج شهرستان از استان خراسان رضوی در این رده قرار دارند و امتیاز شاخص در این شهرستان‌ها صفر تا ۰/۱۹ است. در سایر شهرستان‌های استان خراسان شمالی، گندم دیم با ریسک متوسط تولید می‌شود که امتیاز شاخص در آن‌ها ۰/۳۴ تا ۰/۵۰ می‌باشد و مقدار این شاخص در شهرستان سرخس زیاد است. نتایج

علت ریسک کم تولید گندم دیم در شهرستان‌های کلات، درگز و قوچان، شاخص آسیب‌پذیری کم در این شهرستان‌ها است که یکی از علل تأثیرگذار، ظرفیت نگهداری بالای آب خاک در مزارع این شهرستان‌ها است (جدول ۵). همچنین شاخص مخاطره خشکسالی در این شهرستان‌ها کم و متوسط است که نشان‌دهنده وضعیت مطلوب میزان و پراکنش بارندگی نسبت به سایر شهرستان‌ها است (جدول ۸). تاتاری و همکاران نیز (Tatari, Koocheki, & Nassiri, 2009) در مطالعه‌ای به بررسی پیش‌بینی عملکرد گندم دیم در استان خراسان رضوی با استفاده از داده‌های بارندگی و خاک پرداختند و دریافتند که بارندگی در ماه‌های اسفند، فروردین، خرداد و آبان و همچنین مقدار رطوبت خاک در مراحل FC و PWP و درصد

مدیریت ریسک می‌باشد. این نکته حائز اهمیت است که مدیریت ریسک و اتخاذ راهکارهای خردمندانه در این حوزه بسته به ماهیت ریسک، ظرفیت کنشگران و نقش آن در زنجیره تأمین غذا تعریف و تعیین می‌گردد و لزوماً هم‌راستا شدن برنامه‌های دولت و اتخاذ سیاست‌های واحد در این حوزه می‌تواند افزایش تاب‌آوری و انعطاف در تولید را محقق نماید. با توجه به افزایش قابل توجه تأثیرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی در سال‌های اخیر پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی بر شاخص ظرفیت تطابق‌پذیری تأکید بیشتری شود و براساس اهداف و همچنین ابعاد منطقه مورد مطالعه از عوامل مرتبط و مناسب استفاده گردد.

سپاسگزاری

از همکاری معاونت محترم پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به‌جهت تأمین اعتبار این پروژه مرتبط با رساله دکتری صمیمانه قدردانی می‌شود.

این مطالعه حاکی از این است که شاخص ظرفیت تطابق‌پذیری عامل مهمی در کاهش اثرات خشکسالی می‌باشد و شهرستان‌های درگز، فاروج و کلات که ریسک تولید گندم در آن‌ها کم می‌باشد، ظرفیت نگهداری آب خاک مزارع آن‌ها به‌ترتیب ۱۲/۱۵، ۱۱/۷۱ و ۱۲/۴۲ می‌باشد. خاک، پیوند مهمی بین آب‌وهوا و گیاه برقرار می‌کند و در تعیین وقوع یا عدم وقوع خشکسالی کشاورزی نقش بسیار مهمی دارد. ظرفیت نگهداری آب در خاک به‌صورت مستقیم با ظرفیت سازگاری در شرایط خشکسالی مرتبط است (Murthy et al., 2015). همچنین آسیب‌پذیری خشکسالی تحت تأثیر سه جزء می‌باشد و هر کدام از این اجزاء می‌تواند اثر دیگری را تشدید کند یا تخفیف دهد. نتایج این مطالعه نیز نشان می‌دهد که شهرستان‌های راز و جرگلان و درگز، هر دو به‌طور متوسط در معرض خشکسالی واقع شده‌اند، اما این دو شهرستان به‌ترتیب در کلاس کمتر تطابق‌پذیر و تطابق‌پذیر هستند و در نهایت میزان شاخص آسیب‌پذیری آن‌ها بسیار متفاوت است و میزان آن به‌ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۰۱ می‌باشد. ارزیابی ریسک روشی برای تعیین اندازه کمی و کیفی ریسک‌ها و بررسی پیامدهای بالقوه ناشی از حوادث احتمالی است و اولین گام برای انتخاب راهکار مناسب جهت

References

- Ahsan, M. N., & Warner, J. (2014). The socioeconomic vulnerability index: A pragmatic approach for assessing climate change led risks—A case study in the south-western coastal Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 8, 32-49. (in Persian with English abstract). <http://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2013.12.009>
- Antwi-Agyei, P., Fraser, E. D., Dougill, A. J., Stringer, L. C., & Simelton, E. (2012). Mapping the vulnerability of crop production to drought in Ghana using rainfall, yield and socioeconomic data. *Applied Geography*, 32(2), 324-334. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.010>
- Assimacopoulos, D., Kampragkou, E., Andreu, J., Bifulco, C., De Carli, A., De Stefano, L., & Musolino, D. (2014). Future drought impact and vulnerability. Case study scale. 20.
- Azizi Mobaser, J., Rasoulzadeh, A., Rahmati, A., Shayeghi, A., & Bakhtar, A. (2020). Evaluating the performance of Era-5 Re-analysis data in estimating daily and monthly precipitation, Case Study; Ardabil Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(11), 2937-2951 (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.302176.668600>
- Birkmann, J. (2008). *Assessing vulnerability before, during and after a natural disaster in fragile regions: Case study of the 2004 Indian Ocean tsunami in Sri Lanka and Indonesia*: WIDER Research Paper. Helsinki: UNU-WIDER.
- Deems, H. (2010). Vulnerability of rural communities in the Mediterranean region to climate change and water scarcity: The case of Cyprus. *Spain: Universitat Autònoma de Barcelona*.
- Dabanli, I. (2018). Drought Risk Assessment by Using Drought Hazard and Vulnerability Indexes. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2018, 1-15. <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-129>.
- Eslami, A., Mirisoliman, S. J., & Rashidi, M. (2021). Vulnerability analysis and identification of meteorological drought risk zones (Case research: North Khorasan province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 28(3), 191-205. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.18841.3434>.
- Gee, G., & Bauder, J. (1979). Particle size analysis by hydrometer: A simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 43(5), 1004-1007. <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300050038x>.
- Ghaseminejad, S., Soltani, S., & Soffianian, A. (2014). Drought risk assessment in Isfahan province. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 68(18), 213-226. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1393.18.68.19.4>
- Ghorbani, M. (2017). *Agricultural Insurance Principles*. Mashhad: Publications of Ferdowsi university of Mashhad. (in Persian with English abstract)
- Gravandi, S., & Alibeygi, A. (2011). Determinants of Farmers' Risk Management in Kermanshah Township.

- Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 42(2), 255-264. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20084838.1390.42.2.10.3>.
13. Guttman, N. B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
14. Habibi, Y., Azizi, J., & Shal, F. K. (2017). Role of Insurance in broiler farms risk management (A case of Rudbar County). *International Journal of Agricultural Management and Development (IJAMAD)*, 8(3), 321-328.
15. Hardaker, J. B., Lien, G., Anderson, J. R., & Huirne, R. B. (2004). *Coping with risk in agriculture: Applied decision analysis*. London, UK: Wallingford: CABI Publishing.
16. IranMeteorologicaOrganization. (2022). Retrieved from <https://www.irimo.ir/far/index.php>.
17. Kim, H., Park, J., Yoo, J., & Kim, T. W. (2015). Assessment of drought hazard ,vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea. *Journal of Hydro-Environment Research*, 9(1), 28-35. <http://doi.org/10.1016/j.jher.2013.07.003>
18. Kirkham, M. (2011). Water dynamics in soils. In L. Jerry Hatfield and J. Thomas Sauer (Ed.), *Building a Stable Base for Agriculture* (pp. 53-65): American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
19. Ladányi, M. (2003). Risk methods and their applications in agriculture. *Applied Ecology and Environmental Research*, 6(1), 147-164.
20. Lakzian, A., AVAL, M. B., & Gorbanzadeh, N. (2010). Comparison of pattern recognition, artificial neural network and pedotransfer functions for estimation of soil water parameters. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(3), 114-120. <https://doi.org/10.15835/nsb234737>.
21. Liu, X., Wang, Y., Peng, J., Braimoh, A. K., & Yin, H. (2013). Assessing vulnerability to drought based on exposure, sensitivity and adaptive capacity: A case study in middle Inner Mongolia of China. *Chinese Geographical Science*, 23, 13-25. <https://doi.org/10.1007/s11769-012-0583-4>.
22. Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
23. Mathbout, S., Lopez-Bustins, J. A., Martin-Vide, J., Bech, J., & Rodrigo, F. S. (2018). Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012. *Atmospheric Research*, 200, 153-168. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.016>.
24. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Paper presented at the Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology.
25. MinistryofAgricultureofIran. (2023). Retrieved from <https://www.maj.ir/>.
26. Mirisoliman, J., Ownegh, M., & Barani, H. (2020). Zoning of meteorological drought risk in customary Kormanj nomadic territories of North Khorasan. *Journal of Arid Biome*, 10(1), 109-125. (in Persian with English abstract).
27. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216 . <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>.
28. Mohammadi Ghaleni, M., & Sharafi, S. (2022). Evaluation of CRU TS4. 05 and ERA5 Datasets accuracy to precipitation, temperature and potential evapotranspiration in different climates across Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(5), 879-890. (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.5.15.0>.
29. Murthy, C., Yadav, M., Mohammed Ahamed, J., Laxman, B., Prawasi, R., Sesha Sai, M., & Hooda, R. (2015). A study on agricultural drought vulnerability at disaggregated level in a highly irrigated and intensely cropped state of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 140. <http://10.1007/s10661-10015-14296-x>.
30. Parvaze, S., Khan, J. N., Kumar, R., & Allaie, S. P. (2021). Flood forecasting in the sparsely gauged jhelum river basin of greater himalayas using integrated hydrological and hydraulic modelling approach. Available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-461873/v1>
31. Pereira, L. D., Rocha, J. D., Debortoli, N., Parente, I. I., Eiró, F., Bursztyn, M., & Rodrigues-Filho, S. (2014). Integrated assessment of smallholder farming's vulnerability to drought in the Brazilian Semi-arid: A case study in Ceará. *Climatic Change*, 127, 93-105. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1116-1>
32. Rejoice, T. (2003). Rainfall reliability, drought and flood vulnerability in Botswana. *Water Sa*, 29(4), 389-392 . <https://doi.org/10.4314/wsa.v29i4.5043>
33. Şen, Z. (2015). *Applied drought modeling, prediction, and mitigatio*: Elsevier.
34. Shahabfar, A., Ghulam, A., & Eitzinger, J. (2012). Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.01.011>.
35. Sharafi, L., Zarafshani, K., Keshavarz, M., Azadi, H., & Van Passel, S. (2020). Drought risk assessment: Towards drought early warning system and sustainable environment in western Iran. *Ecological Indicators*, 114, 106276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106276>
36. Subash, N., Mohan, H. R., & Banukumar, K. (2011). Comparing water-vegetative indices for rice (*Oryza sativa* L.)–wheat (*Triticum aestivum* L.) drought assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 77(2), 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.05.001>.
37. Tatari, M., Koochekian, A., & Nassiri Mahalati, M. (2009). Dryland wheat yield prediction using precipitation and

- edaphic data by applying of regression models. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 7(2), 357-365. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20081472.1388.7.2.3.3>.
38. Unger, P. W., Kirkham, M. B., & Nielsen, D. C. (2010). Water conservation for agriculture. In T. M. a. S. Zobeck, W.F. (Ed.), *Soil and water conservation advances in the United States* (pp. 1-45): Soil Science Society of America.
 39. Van Wart, J., Grassini, P., & Cassman, K. G. (2013). Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Global Change Biology*, 19(12), 3822-3834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12302>.
 40. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <http://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
 41. Wilhelmi, O. V., & Wilhite, D. A. (2002). Assessing Vulnerability to Agricultural Drought: A Nebraska Case Study. *Natural Hazards*, 25(1), 37-58. <https://doi.org/10.1023/A:1013388814894>
 42. Wilhite, D. A. (2000). *Drought as a Natural Hazard: Concepts And Definitions* New York: Routledge Publishers.
 43. Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'donnell, J., Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), 8995-9005. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>
 44. WorldBank. (2015). *World development indicators*. Retrieved from <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>.
 45. WorldBank. (2016). *Agricultural sector risk assessment: methodological guidance for practitioners. Agriculture global practice discussion paper*. World Bank, Washington, DC, 10.
 46. Yazdani, M., Zarate, P., Kazimieras Zavadskas, E., & Turskis, Z. (2018). A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision*, 57(9), 2501-2519.
 47. Yuan, X.-C., Wang, Q., Wang, K., Wang, B., Jin, J.-L., & Wei, Y.-M. (2013). China's regional vulnerability to drought and its mitigation strategies under climate change: data envelopment analysis and analytic hierarchy process integrated approach. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20, 341-359. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9494-7>
 48. Zhao, J., Zhang, Q., Zhu, X., Shen, Z., & Yu, H. (2020). Drought risk assessment in China: evaluation framework and influencing factors. *Geography and Sustainability*, 1(3), 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.06.005>

Effect of Waterlogging Duration at Different Growth Stages on Some Photosynthetic Characteristics, Antioxidant Activity, and Yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.)

F. Askari Foroshani¹, A. Rahnama^{1*}, M. Meskarbashee¹, I. Kamranfar¹

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

(*- Corresponding author's Email: a.rahnama@scu.ac.ir)

Received: 27 June 2024
Revised: 14 August 2024
Accepted: 31 August 2024
Available Online: 11 March 2025

How to cite this article:

Askari Foroshani, F., Rahnama, A., Meskarbashee, M., & Kamranfar, I. (2025). Effect of Waterlogging Duration at Different Growth Stages on Some Photosynthetic Characteristics, Antioxidant Activity, and Yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 171-186. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.88492.1335>

Introduction

Waterlogging is a complex environmental stress limiting crop productivity and yield stability. Waterlogging in crop plants remains a serious barrier to crop production around the globe in high-rainfall areas with heavy rainfall or poor drainage. Waterlogging duration and the growth stage at which it occurs can significantly influence the physiological, biochemical, and yield-related traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). However, the impact of waterlogging stress at different developmental stages on photosynthetic processes and antioxidant defense mechanisms in safflower under field conditions remains poorly understood. This study aimed to identify the most sensitive growth stage to waterlogging stress in order to enhance our understanding of the complex mechanisms underlying waterlogging tolerance in safflower.

Materials and Methods

In order to study the influence of waterlogging duration at vegetative and reproductive stages on the yield, photosynthetic characteristics, and antioxidant activity of safflower, a field experiment was carried out during 2020-2021 growing season in a split-plot arrangement in randomized complete blocks design using three replicates per treatment. The research farm was located at Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. The plants were grown in the field to ensure the environmental conditions found in waterlogged and flooded soils. Three waterlogging treatments were applied to plants as main plots: Well-drained controls irrigated weekly, mild stress (waterlogged for 24 h) and severe stress (waterlogged for 48 h). Waterlogging treatments were implemented at stem elongation (vegetative stage), and full branching (reproductive stage) as sub plots. Seeds originated from the Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran. Before and after the end of waterlogging period, waterlogging treatments were watered with sufficient water (80% field capacity) until the end of the experiment. The data for stomatal conductance, photosynthetic rate, chlorophyll index, catalase, peroxidase and superoxide dismutase enzyme activities, biological yield, oil content, and seed and oil yield was recorded. Gas exchange characters were measured after waterlogging stress and then after 7 days of recovery.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

 <https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.88492.1335>

Results and Discussion

The mild and severe waterlogging stress treatments at both vegetative and reproductive stages led to a significant reduction in stomatal conductance (24 and 35%, respectively), photosynthetic rate (49 and 60%, respectively), chlorophyll index (14 and 44%, respectively), biological yield (21 and 27%, respectively), seed (34 and 39%, respectively) and oil yield (16 and 32%, respectively) but increased catalase (7 and 51%, respectively), peroxidase (7 and 35%, respectively) and superoxide dismutase (9 and 17%, respectively) enzyme activities compared to well-drained controls. After 7 days of recovery, gas exchange measurements were recovered in mild and severe waterlogging stress treatments. Plant growth stage and stress duration played an important role in the response to waterlogging stress. In severe stress treatment, the activity of antioxidant enzymes; catalase, peroxidase and superoxide dismutase at the reproductive stage was higher than the vegetative stage (26, 17 and 9%, respectively). However, there was no significant difference between growth stages in terms of all traits except for catalase, peroxidase and superoxide dismutase activity. The mild and severe waterlogging stress at both growth stages led to a significant reduction in seed yield by 34 and 39%, and oil yield by 16 and 32% respectively, compared to control. In contrast to the results of antioxidant enzyme activities, the maximum decrease in seed yield was found when waterlogging occurred in severe stress treatment at the reproductive stage. The reduction was 43%, when compared to the control.

Conclusion

The results highlighted that waterlogging during the reproductive stage of oilseed safflower resulted in higher yield loss than during the vegetative stage and these findings emphasized that the impacts of waterlogging stress on oilseed crops are important and the management practices of safflower fields especially in the Khuzestan region must be strengthened during the winter season.

Acknowledgement

We gratefully acknowledge funding support from Shahid Chamran University of Ahvaz grant number SCU.AA99.96

Keywords: Catalase activity, Chlorophyll index, Peroxidase activity, Stomatal conductance

مقاله پژوهشی

جلد ۲۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۸۶-۱۷۱

تأثیر مدت زمان تنش غرقاب در مراحل مختلف رشد بر برخی ویژگی‌های فتوسنتزی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گلرنگ زراعی (*Carthamus tinctorius* L.)

فاطمه عسکری فروشانی^۱، افراسیاب راهنما^{۱*}، موسی مسکرباشی^۱، ایمان کامرانفر^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

چکیده

تنش غرقاب، یک تنش محیطی پیچیده و از عوامل اصلی محدودکننده بهره‌وری و پایداری محصول است. به منظور بررسی تأثیر مدت زمان تنش غرقاب در مرحله رشد رویشی و زایشی روی برخی از ویژگی‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گلرنگ زراعی (*Carthamus tinctorius* L.)، پژوهشی مزرعه‌ای به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. سه سطح تنش غرقاب شامل: شاهد، تنش غرقاب ملایم (۲۴ ساعت) و شدید (۴۸ ساعت) در کرت‌های اصلی و تنش در مرحله رویشی و زایشی در کرت‌های فرعی قرار داده شدند. نتایج نشان داد که تیمارهای تنش غرقاب باعث کاهش معنی‌دار هدایت روزنه‌ای، سرعت فتوسنتز، شاخص کلروفیل و عملکرد دانه و روغن شد، ولی فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز افزایش یافت. در شرایط تنش غرقاب شدید، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در مرحله زایشی بیشتر از مرحله رویشی آن (به ترتیب ۲۶، ۱۷ و ۹ درصد بیشتر) بود. بیشترین عملکرد دانه و روغن (به ترتیب ۲۰۵۶ و ۴۶۹ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری مطلوب و کمترین آن در تنش غرقاب شدید (به ترتیب ۱۲۵۶ و ۳۱۷ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد. تنش غرقاب ملایم و شدید منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه به ترتیب به میزان ۳۴ و ۳۹ درصد و عملکرد روغن به میزان ۱۶ و ۳۲ درصد در مقایسه با آبیاری مطلوب شد. منطبق با نتایج فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، بیشترین تأثیر تنش بر عملکرد دانه مربوط به تنش شدید در مرحله زایشی بود، به گونه‌ای که سبب بیش‌ترین مقدار کاهش به میزان ۴۳ درصد در مقایسه با آبیاری مطلوب شد. به طور کلی، تنش غرقاب در مرحله زایشی گلرنگ نسبت به مرحله رویشی منجر به کاهش بیشتر عملکرد شد و این یافته‌ها بر اهمیت تنش غرقاب بر دانه‌های روغنی و زهکشی مزارع خوزستان در فصل زمستان جهت حذف آب اضافی پس از وقوع سیل و بارندگی‌های سنگین تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: شاخص کلروفیل، فعالیت پراکسیداز، فعالیت کاتالاز، هدایت روزنه‌ای

مقدمه

(Tian et al., 2021). پدیده روبه‌رشد گرمایش جهانی و پیش‌بینی بارندگی‌های مکرر یا سنگین، نیازمند مطالعه تحمل تنش غرقاب در گیاهان و سازوکارهای مرتبط با آن به منظور حفظ کشاورزی پایدار و ارتقاء سازگاری مؤثر با تغییرات اقلیمی است (Bailey-Serres, Lee, & Brinton, 2012).

در خاک غرقاب، دسترسی منافذ خاک به هوا و اکسیژن کاهش می‌یابد، و منجر به کاهش تنفس و فعالیت ریشه و کمبود انرژی می‌شود (Arbona, Hossain, López-Climent, Pérez, & Clemente, & Gómez-Cadenas, 2008). تداوم شرایط غرقاب و تنفس بی‌هوازی منجر به افزایش گونه‌های اکسیژن واکنشگر و در نهایت مرگ سلول و پیری گیاه می‌شود (Zhang, Lyu, Jia, He, & Qin, 2017). اکثر گیاهان در هنگام غرقاب می‌توانند از طریق

رشد گیاهان از طریق جذب هماهنگ آب توسط ریشه و تعرق از برگ انجام می‌شود و شرایط اشباع یا فوق اشباع خاک منجر به تنش غرقاب می‌شود. تنش غرقاب از عوامل اصلی محدودکننده بهره‌وری محصول است. مهار تنفس ریشه و تجمع مواد سمی در طی غرقاب، اثرات نامطلوبی بر رشد رویشی و زایشی گیاه بر جای می‌گذارد و در نهایت منجر به کاهش عملکرد محصول یا مرگ گیاه زراعی می‌شود

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*)- نویسنده مسئول:
(Email: a.rahnama@scu.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88492.1335>

تشدید شرایط غرقاب موقت و خسارات را بر محصولات کشاورزی می‌شود. اطلاعات اندکی در مورد واکنش گیاه گلرنگ به مدت زمان اعمال تنش غرقاب و تأثیر آن در مراحل مختلف رشدی گیاه وجود دارد. گزارش شده است که حساسیت این گیاه به شرایط ماندابی در مراحل زایشی بیشتر است و عملکرد دانه آن می‌تواند آسیب ببیند (Shahrokhnia & Sepaskhah, 2017).

امروزه پدیده تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در حفظ و پایداری امنیت غذایی محسوب گردیده و زمینه پژوهشی گسترده‌ای را پیش روی پژوهشگران قرار داده است. استان خوزستان دارای بافت خاک سنگین با نفوذپذیری پایین است و به دلیل موقعیت جلگه‌ای و عدم زهکشی و پوشش گیاهی مناسب، احتمال وقوع تنش غرقاب در فصول با بارندگی سنگین در این استان بسیار زیاد است. از سوی دیگر، با توجه به اهمیت کشت پاییزه گلرنگ در استان خوزستان، و احتمال وقوع شرایط غرقاب طی دوره رشد این گیاه، بررسی سازوکارهای فیزیولوژیک و دفاع آنتی‌اکسیدانی مرتبط با تحمل به شرایط غرقاب امری ضروری است. اگرچه مطالعات متعددی برای ارزیابی اثرات تنش غرقاب بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و عملکردی گیاهان زراعی مختلف انجام شده است، اما مطالعات اندکی در زمینه گیاه گلرنگ وجود دارد و بر همین اساس، در پژوهش حاضر به بررسی برخی واکنش‌های فتوسنتزی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی این گیاه به مدت زمان غرقاب و اعمال آن در مراحل رشد رویشی و زایشی پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت آزمایشی مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. سطوح تنش غرقاب شامل: آبیاری مطلوب (بدون غرقاب و آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی)، تنش غرقاب ملایم (غرقاب به مدت ۲۴ ساعت) و تنش غرقاب شدید (غرقاب به مدت ۴۸ ساعت) در کرت‌های اصلی و دو مرحله رشدی رویشی و زایشی (به ترتیب مرحله ۳۷ و ۶۱ براساس مقیاس BBCH) در کرت‌های فرعی قرار داده شدند. از رقم گلدشت به‌عنوان رقم معرفی شده توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج با تیپ رشدی بهاره، با میانگین عملکرد دانه ۲۵۰۰ کیلوگرم در هکتار در مناطق گرم، بدون خار، زودرس، متحمل به سرما در بین ارقام بهاره و مناسب کاشت در اقلیم‌های گرم در این پژوهش استفاده شد. پس از آبیاری زمین و گاوور شدن خاک، زمین توسط گاوآهن برگردان دار شخم زده شد. به‌منظور خرد کردن کلوخه‌ها و تسطیح زمین از دیسک و ماله استفاده شد. جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه،

راهبردهای مختلف با آسیب ناشی از تنش غرقاب سازگار شوند (Yin *et al.*, 2019).

در طی تنش غرقاب، روزنه‌های برگ بسته می‌شوند، و تخریب کلروفیل و پیری برگ، توانایی برگ‌ها برای جذب نور را کاهش می‌دهد و در نهایت منجر به کاهش سرعت فتوسنتز می‌شود (Arbona *et al.*, 2008; Yan, Zhao, Cui, Han, & Wen, 2018). تنش غرقاب با تأثیر بر تبادلات گازی، انتشار دی‌اکسید کربن به برگ و تعرق و به دنبال آن جذب غیرفعال آب را کاهش می‌دهد. همچنین، محتوای کلروفیل برگ را کاهش و در نتیجه تجمع ماده خشک را کاهش می‌دهد (Ashraf, 2012). در گیاهان، بسته شدن روزنه اولین واکنش به غرقاب بوده که منجر به کاهش تبادلات گازی و در نهایت فتوسنتز می‌شود (Zhang, Zhou, Yue, Chen, & Xing, 2019; Fazeli, Meskarbashee, & Rahnema, 2023a). در همین حال، اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی، سبب کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و در نهایت کاهش عملکرد دانه می‌شود (Grassini, Indaco, Pereira, Hall, & Trápani, 2007). در چنین شرایطی، گیاهان از طریق آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، میزان خسارت اکسیداتیو را کاهش می‌دهند (Hasanuzzaman *et al.*, 2020). تنش غرقاب منجر به افزایش فعالیت کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز و پلی فنل اکسیداز می‌شود (Bansal & Srivastava, 2012; Fazeli, Meskarbashee, & Rahnema, 2023b).

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط غرقاب به‌طور متفاوتی عمل می‌نمایند. اعمال تنش غرقاب بر روی گیاهچه‌های کلزا (*Brassica napus* L.) سبب کاهش فعالیت کاتالاز ولی افزایش فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز و پراکسیداز شد (Lee *et al.*, 2014). همچنین واکنش گیاهان به شرایط غرقاب بسته به گونه گیاهی، عمق و شدت و مدت زمان غرقاب و مرحله رشدی گیاه متفاوت است (Wu, Tang, Li, Wu, & Huang, 2015; Fazeli *et al.*, 2023a). مراحل حساس رشدی گیاه به تنش غرقاب از اهمیت خاصی برخوردار است. تنش غرقاب در مراحل مختلف رشدی گیاه می‌تواند صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکردی گیاهان مختلف زراعی مانند گندم (*Triticum aestivum* L.) (Wu *et al.*, 2015)، کلزا (Gutierrez Boem, Lavado, & Porcelli, 1996)، و ماش (*Vigna radiata* L.) (Fazeli, Rahnema, & Hassibi, 2022) را به‌طور متفاوتی تحت تأثیر قرار دهد.

سطح زیر کشت گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در ایران حدود ۳۸۴۲ هکتار و تولید آن ۵۲۳۳ تن است. همچنین سطح زیر کشت در استان خوزستان ۶۰ هکتار و تولید آن ۹۸ تن است (Annual Report, 2022). نفوذ پذیری پایین خاک و عدم زهکشی مناسب همراه با تغییر اقلیم و الگوی بارندگی‌ها در این استان سبب

نمونه‌گیری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه انجام شد. کاشت در سوم آذرماه انجام شد. بذره‌های گلرنگ روی سه پشته سه متری با فاصله ردیف ۶۰ سانتی‌متر و به‌صورت دو ردیف کاشت روی هر پشته به‌صورت زیگزاگ و فاصله ۱۰ سانتی‌متر روی هر ردیف کاشت در عمق سه تا پنج سانتی‌متری با تراکم حدود ۳۳۰ بوته در

مترمربع کشت شد. با توجه به نتایج آزمون خاک (جدول ۱)، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپرفسفات معمولی و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم قبل از کاشت و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص از منبع کود اوره به‌صورت کود پایه در زمان کاشت و کود سرک در اوایل گل‌دهی به خاک اضافه شد.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- The results of physical and chemical analysis of soil

موادآلی	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	اسیدیته	هدایت الکتریکی	بافت
O Materials (%)	K (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	N (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)	Texture
0.53	151	13	0.04	7.8	2.8	لومی شنی Sandy loam

به‌منظور حفظ شرایط غرقاب، ارتفاع پشته‌های حاشیه کرت‌ها احیاء و تقویت شدند. سطح آب در طول مدت زمان اعمال تنش به‌طور دائم پایش و با حفظ شرایط طبیعی غرقاب در محیط مزرعه تا سطح پشته‌ها حفظ شد. به‌منظور اطمینان از عدم نشت رطوبت بین تیمارها، فاصله بین سطوح غرقاب و همچنین بین مراحل رشدی در هر سطح دو متر در نظر گرفته شد. به‌منظور فراهم آوردن شرایط غرقاب از یک نهر اصلی برای رساندن آب به کرت‌های اصلی استفاده شد. در انتهای کرت‌های اصلی نیز یک نهر عمیق به‌عنوان زهکش تعبیه شد، به‌گونه‌ای که پس از مدت زمان اعمال تنش از تداوم شرایط غرقاب برای مدت طولانی‌تر جلوگیری گردد. سطح آب کرت‌ها به‌طور مداوم مورد بررسی قرار گرفت و در صورت مشاهده کاهش سطح آب، به آن‌ها آب اضافه شد. شرایط غرقاب به‌مدت یک و دو روز در دو مرحله رویشی (ساقه‌دهی) و زایشی (آغاز گل‌دهی) اعمال شد. شروع تیمارهای غرقاب در مرحله رویشی ۷۰ روز پس از کاشت و مرحله زایشی ۹۵ روز پس از کاشت انجام شد.

هدایت روزنه‌ای برگ با استفاده از دستگاه پرومتر (Delta-T AP4 Devices, UK) و سرعت فتوسنتز با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر مادون قرمز (IRGA, model LCA4, ADC Bioscientific Ltd. Hoddeston, UK) بین ساعت ۹/۳۰ صبح تا ۱۲ ظهر پس از پایان دوره تنش و همچنین یک هفته پس از آن (دوره بازیابی) بر روی آخرین برگ‌های توسعه‌یافته اندازه‌گیری شد. شاخص کلروفیل با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (Monilota SPAD-502 Chlorophyll meter, Japan) بین ساعت ۱۰ صبح تا ۱۲ ظهر بر روی پنج نقطه از برگ‌های انتهایی انجام شد و میانگین مقادیر قرائت‌شده ثبت شد. جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز یک هفته پس از اعمال تنش بر روی آخرین برگ‌های توسعه‌یافته نمونه برداری شد. نمونه‌ها تا زمان سنجش فعالیت آنتی‌اکسیدانی درون فریزر -۷۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از روش بیرز

و سیزر (Beers & Sizer, 1952)، فعالیت آنزیم پراکسیداز با استفاده از روش ناکانو و آسادا (Nakano & Asada, 1981) و فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز به‌روش اسمیت و همکاران (Smith, Vierheller, & Thorne, 1988)، سنجش شد. در پایان فصل رشد و رسیدگی کامل دانه‌ها (اوایل خردادماه)، عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده پس از نمونه‌برداری از مساحت یک مترمربع برای هر واحد آزمایشی با رعایت اثر حاشیه محاسبه شد. محتوای روغن دانه با کمک حلال اتر و با روش سوکسله (FOSS, Model SOCCET 2050) تعیین گردید. عملکرد روغن در واحد سطح نیز از حاصل ضرب عملکرد دانه و محتوای روغن محاسبه شد. تجزیه و تحلیل داده‌های صفات مورد مطالعه به‌وسیله نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام گردید و برای مقایسه میانگین از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

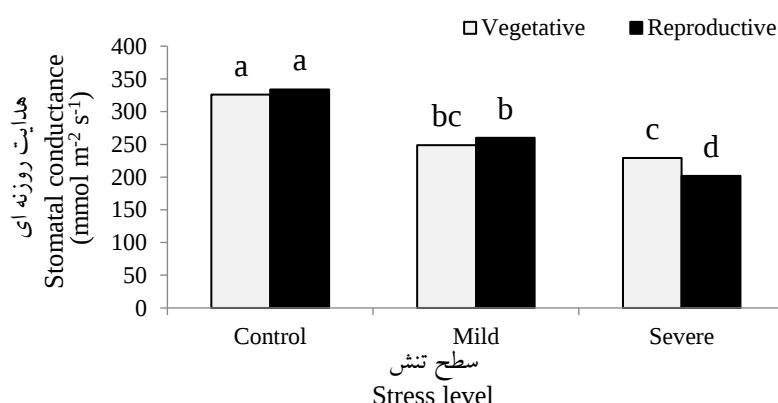
نتایج و بحث

هدایت روزنه‌ای

هدایت روزنه‌ای در زمان تنش و بازیابی پس از آن تنها تحت تأثیر سطوح تنش و برهم‌کنش مرحله رشدی و سطوح تنش قرار گرفت (جدول ۲). آبیاری مطلوب بیشترین (۳۳۰ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) و تنش غرقاب شدید کمترین (۲۱۵ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) مقدار هدایت روزنه‌ای را به خود اختصاص داد و تفاوت چندانی با تنش ملایم نداشت. بین مراحل رشدی نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. تنش غرقاب منجر به کاهش معنی‌دار هدایت روزنه‌ای در زمان اعمال تنش شد و میزان کاهش در تنش ملایم و شدید به‌ترتیب برابر با ۲۴ و ۳۵ درصد نسبت به شرایط آبیاری مطلوب بود. مقادیر این کاهش در زمان بازیابی پس از تنش به‌ترتیب برابر ۱۱ و ۱۸ درصد بود. هدایت روزنه‌ای پس از بازیابی از تنش بهبود یافت، به‌گونه‌ای که میزان بهبود آن در دوران بازیابی در شرایط تنش ملایم

رشد که از دلایل رفتار گیاه در کاهش هدایت روزنه‌ای در هنگام تنش، کاهش عملکرد ریشه در شرایط کم‌اکسیژنی و هورمون اسید آبسزیک باشد، به گونه‌ای که در زمان کمبود اکسیژن با بسته شدن روزنه‌ها مانع از اتلاف آب و تعرق در گیاه شود و نیز تغییر رفتار گیاه پس از تبدیل شرایط بی‌هوایی به هوایی در محیط اطراف ریشه حاکی از آن است که با قرارگیری مجدد اکسیژن در معرض ریشه گیاه می‌تواند هدایت روزنه‌ای خود را نسبت به دوران تنش تا حدودی بهبود بخشد و از آنجاکه هدایت روزنه‌ای با فتوسنتز رابطه‌ای مستقیم دارد، بتواند مقداری از خسارات وارده بر گیاه را جبران نماید.

و شدید به ترتیب به میزان ۱۹ و ۲۵ درصد در مقایسه با مقادیر آن در زمان تنش بود (جدول ۳). برهم‌کنش مرحله رشدی و سطوح تنش نیز نشان داد که در شرایط تنش شدید، کاهش هدایت روزنه‌ای بلافاصله پس از تنش در مرحله زایشی به مراتب بیشتر از مرحله رویشی بود (شکل ۱). تحمل به تنش در گیاهان، در مجموع رفتار گیاه طی تنش و بازیابی پس از آن می‌باشد (Striker, 2012). احتمال می‌رود که در هنگام تنش غرقاب، کاهش هدایت هیدرولیکی ریشه (Parent, Capelli, Berger, Crèvecoeur, & Dat, 2008) و نیز سنتز و انتقال هورمون اسید آبسزیک باعث بسته شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت روزنه‌ای شود. بسته شدن روزنه از اولین واکنش‌های گیاه به تنش بوده و عمده‌ترین دلیل کاهش فتوسنتز در شرایط تنش است



شکل ۱- تأثیر تنش غرقاب در مرحله رشد رویشی و زایشی بر هدایت روزنه‌ای گلرنگ

Figure 1- Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stages on stomatal conductance of safflower

میانگین‌های دارای حروف مشترک با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letters using Tukey's test at 5% probability level did not differ significantly

تأثیر سطوح تنش قرار گرفت (جدول ۲). فتوسنتز، عامل اصلی تعیین‌کننده رشد و عملکرد گیاهان محسوب می‌شود و توانایی حفظ آن در شرایط تنش‌های محیطی برای حفظ ثبات عملکرد مهم است. تنش غرقاب از طریق بستن روزنه‌ها منجر به کاهش معنی‌دار سرعت فتوسنتز در زمان اعمال تنش شد و میزان کاهش در تنش ملایم و شدید به ترتیب برابر با ۴۹ و ۶۰ درصد نسبت به شرایط آبیاری مطلوب بود. مقادیر این کاهش در زمان بازیابی پس از تنش به ترتیب برابر ۳۲ و ۴۰ درصد بود (جدول ۳). سرعت فتوسنتز پس از بازیابی از تنش بهبود یافت، به گونه‌ای که میزان بهبود آن در دوران بازیابی در شرایط تنش ملایم و شدید به ترتیب به میزان ۱۹ و ۳۳ درصد در مقایسه با مقادیر آن در زمان تنش بود (جدول ۳).

کاهش رشد گیاهان زراعی به واسطه محدود شدن فتوسنتز صورت می‌گیرد. کاهش فتوسنتز را می‌توان به کاهش هدایت روزنه‌ای نسبت داد که تحت تنش کاهش می‌یابد (Rahnama et al., 2010). در بسیاری از مطالعات، کاهش فتوسنتز همزمان با کاهش هدایت روزنه-

هدایت روزنه‌ای در دو زمان تنش و بازیابی، دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری به ترتیب با فتوسنتز ($r=0.86^{**}$) و ($r=0.85^{**}$)، و عملکرد دانه ($r=0.89^{**}$) و ($r=0.75^{**}$) بود (جدول ۴). هدایت روزنه‌ای با تأثیر مستقیم بر سرعت فتوسنتز، عملکرد نهایی دانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این همبستگی مثبت بیانگر نقش هدایت روزنه‌ای در حفظ فتوسنتز در شرایط عادی و تنش و در نتیجه دستیابی به عملکرد دانه بالاتر می‌باشد. تفاوت هدایت روزنه‌ای در تیمارهای تنش غرقاب، ناشی از واکنش سریع گیاه به تنش و بسته شدن روزنه‌های برگ به منظور جلوگیری از هدر روی آب است، به گونه‌ای که با کاهش هدایت روزنه‌ای، ورود دی اکسید کربن به برگ کاهش یافته و در نتیجه سبب کاهش سرعت فتوسنتز و به دنبال آن کاهش رشد و عملکرد زیست‌توده و دانه می‌شود.

سرعت فتوسنتز

سرعت فتوسنتز در زمان تنش و بازیابی پس از آن تنها تحت

در تولید مواد فتوسنتزی بیشتر برای تولید ماده خشک و عملکرد دانه و روغن است. با این حال، حفظ سبزیگی گیاه در شرایط تنش سبب تداوم فتوسنتز کافی و حفظ رشد گیاه و رسیدن به عملکرد مناسب گیاه می‌شود. از سوی دیگر، افزایش شدت تنش و کاهش شاخص کلروفیل، نشان‌دهنده تحمل پایین گیاه در مواجهه با شرایط غرقاب بود.

فعالیت آنزیم کاتالاز

فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح تنش، مرحله رشدی و برهم‌کنش سطوح تنش و مرحله رشدی قرار گرفت (جدول ۲). کمترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز مربوط به آبیاری مطلوب بود که با تیمار تنش غرقاب ملایم تفاوت معنی‌داری نداشت، ولی در تیمار تنش غرقاب شدید منجر به افزایش ۵۱ درصدی فعالیت این آنزیم در مقایسه با آبیاری مطلوب شد (جدول ۳). فعالیت کاتالاز در مراحل مختلف رشدی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نشان داد، به‌گونه‌ای که اثر شرایط غرقاب بر فعالیت این آنزیم در مرحله زایشی به‌مراتب بیشتر از مرحله رویشی (۲۲ درصد) بود (جدول ۳). تیمارهای تنش از نظر فعالیت کاتالاز واکنش متفاوتی نشان دادند، به‌گونه‌ای که بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز نیز مربوط به تیمار تنش شدید در مرحله رشد زایشی بود (شکل ۲).

به نظر می‌رسد که میزان آسیب ناشی از تنش اکسیداتیو در مرحله زایشی بیشتر بوده و یکی از سازوکارهای گیاه برای کاهش این خسارت، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله کاتالاز است. در شرایط تنش غرقاب، مقدار جذب و تثبیت دی‌اکسیدکربن به‌علت بسته‌شدن روزنه‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه انرژی حاصل از واکنش‌های نوری فتوسنتز تجمع می‌یابد و به‌دنبال آن افزایش گونه‌های اکسیژن واکنشگر رخ می‌دهد، این امر نیز سبب پراکسیداسیون لیپیدها و تغییر ساختار پروتئین‌ها می‌گردد و سنتز آنزیم‌هایی مانند کاتالاز در واکنش به تنش اکسیداتیو می‌شود (Mittler, Vanderauwera, 2004). به نظر می‌رسد که یکی از سازوکارهای تحمل به شرایط غرقاب شدید در هر دو مرحله رشدی، فعالیت بیشتر آنزیم کاتالاز باشد. کمبود اکسیژن در دسترس ریشه تحت شرایط غرقاب باعث مهار تنفس ریشه (Loreti, Van Veen, 2016 Perata, &), و متابولیسم فرآیند تخمیر در مقابل با تنفس هوازی منجر به تولید انرژی پایین می‌شود و طولانی‌تر شدن شرایط غرقاب منجر به تجمع متابولیت‌های سمی می‌شود (Zhang et al., 2017) و این ترکیبات سمی باعث مختل شدن متابولیسم گیاه و منجر به تولید گونه‌های اکسیژن واکنشگر و تنش اکسیداتیو می‌شود (Loreti et al., 2016).

ای در گیاهان در زمان تنش غرقاب مشاهده شده است (Malik, Colmer, Lambers, Setter, & Schortemeyer, 2002; Fazeli et al., 2023b) و از دیگر عوامل مؤثر در کاهش فتوسنتز در زمان تنش، می‌توان به کاهش میزان کلروفیل و تجمع کربوهیدرات‌ها در برگ به‌دلیل بسته بودن روزنه‌ها و عدم فتوسنتز اشاره کرد که خود بازخورد منفی روی فتوسنتز دارد و منجر به مهار آن می‌شود (Plaut, Mayor, & Reinhold, 1987). همچنین در دوران بازیابی، پیشنهاد شده است که بهبود هدایت روزنه‌ای در این دوران با الگوی بهبود سرعت فتوسنتز مشابه است و این بازیابی در بهبود فتوسنتز مؤثر است و می‌توان اثر هدایت روزنه‌ای بر فتوسنتز را با محاسبه دی‌اکسیدکربن بین سلولی ارزیابی کرد (Malik et al., 2002). سرعت فتوسنتز در زمان تنش دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه ($r=0.90^{**}$) بود (جدول ۴).

شاخص کلروفیل

شاخص کلروفیل به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح تنش و مرحله رشدی قرار گرفت (جدول ۲). بیشترین مقدار شاخص کلروفیل مربوط به آبیاری مطلوب بود که با تنش غرقاب ملایم تفاوت معنی‌داری نداشت، ولی افزایش شدت تنش منجر به کاهش ۴۴ درصدی شاخص کلروفیل در مقایسه با آبیاری مطلوب شد (جدول ۳). شاخص کلروفیل برگ در مراحل مختلف رشدی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشت، به‌گونه‌ای که اثر شرایط غرقاب بر شاخص کلروفیل در مرحله زایشی به‌دلیل زرد شدن برگ‌های گیاه در اواخر دوره رشد به‌مراتب بیشتر بود و میزان کلروفیل کمتری در مقایسه با مرحله رویشی داشت (جدول ۳). یکی از دلایل کاهش فتوسنتز در شرایط غرقاب، کاهش غلظت کلروفیل برگ است (Malik et al., 2002). به نظر می‌رسد که در تنش ملایم، تغییر شرایط بی‌هوازی به هوازی منجر به بهبود سیستم ریشه‌ای و جذب عناصر غذایی از خاک می‌شود و با جذب نیتروژن در نهایت منجر به بهبود سبزیگی برگ و کارایی گیاه می‌شود، ولی با افزایش شدت تنش این بهبود به‌میزان کمتر رخ می‌دهد و اثر آن در کاهش معنی‌دار شاخص کلروفیل به‌عنوان یکی از اجزای مهم دخیل در فتوسنتز گیاه نمایان می‌گردد. به هر حال، شاخص کلروفیل به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های بیان‌کننده اثر تنش‌های محیطی وارد بر گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و دلیل آن را تخریب یا کاهش سنتز این رنگدانه دانسته‌اند (Manvelian, Weisany, Tahir, Jabbari, & Diyanat, 2021).

همبستگی مثبت و معنی‌دار شاخص کلروفیل با هدایت روزنه‌ای در زمان تنش و بازیابی ($r=0.73^{**}$) و ($r=0.72^{**}$)، فتوسنتز در زمان تنش و بازیابی به‌ترتیب ($r=0.46^{**}$) و ($r=0.58^{*}$)، عملکرد دانه ($r=0.69^{**}$)، و عملکرد روغن ($r=0.55^{**}$)، حاکی از نقش کلروفیل

جدول ۲- میانگین مربعات عملکرد، ویژگی های فتوسنتزی و فعالیت آنتی اکسیدانی کلرنگ در شرایط تنش غرقاب در مراحل مختلف رشدی
Table 2- Mean square for yield, photosynthetic characteristics, and antioxidant activity of safflower under waterlogging stress condition at different growth stage

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance		سرعت فتوسنتز Photosynthetic rate		شاخص کلروفیل Chlorophyll index	فعالیت کاتالاز Catalase activity	فعالیت پراکسیداز Peroxidase activity	فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase activity	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد زیست توده Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	محتوای روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield
		پس از تنش After stress	دوره بازیابی Recovery	پس از تنش After stress	دوره بازیابی Recovery									
		df	df	df	df									
میانگین مربعات Means of squares														
بلوک Block	2	173 ^{ns}	96 ^{ns}	66.5 ^{ns}	73 ^{ns}	81 ^{ns}	0.253 ^{ns}	0.003 ^{ns}	9.14 ^{ns}	17502 ^{ns}	45666 ^{ns}	2.2 ^{ns}	24.1 ^{ns}	8382 [*]
تنش غرقاب Waterlogging stress (WS)	2	12736 ^{**}	6047 ^{**}	4068 ^{**}	4625 ^{**}	1591 ^{**}	0.353 [*]	0.106 ^{**}	1432 ^{**}	1143005 ^{**}	11216985 ^{**}	42.9 ^{**}	41.9 [*]	34548 ^{**}
Ea	4	126	258	39.0	200	61.9	0.160	0.016	22.1	64986	5411668	1.57	13.5	1563
مرحله رشدی Growth stage (GS)	1	55.0 ^{ns}	668 ^{ns}	8.7 ^{ns}	217 ^{ns}	1136 ^{**}	1.08 ^{**}	0.040 [*]	234.2 ^{**}	22656 ^{ns}	6192630 ^{ns}	10.88 ^{ns}	0.20 ^{ns}	499 ^{ns}
WS × GS	2	368 [*]	307 ^{ns}	70.0 ^{ns}	226 ^{ns}	41.6 ^{ns}	0.158 [*]	0.191 ^{**}	99.5 ^{ns}	38686 [*]	4775709 ^{ns}	8.82 ^{ns}	0.095 ^{ns}	1450 ^{ns}
خطای فرعی Eb	6	91.5	356	24.0	274	31.1	0.030	0.009	34.4	12109	4053034	25.63	5.99	1472
ضریب تغییرات CV (%)	-	12.7	6.1	13.6	17.1	9.5	14.0	12.2	10.5	7.4	25.0	25.8	9.4	9.7

ns: not significant; *and ** significant at 5% and 1% probability levels, respectively
*: معنی دار در سطح یک درصد، **: معنی دار در سطح پنج درصد، ns: غیر معنی دار

جدول ۳- تأثیر تنش غرقاب در مراحل رشد رویشی و زایشی بر عملکرد، ویژگی‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم اکسیداتی گل‌رنگ
Table 3- Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stage on yield, photosynthetic characteristics, and antioxidant activity of safflower

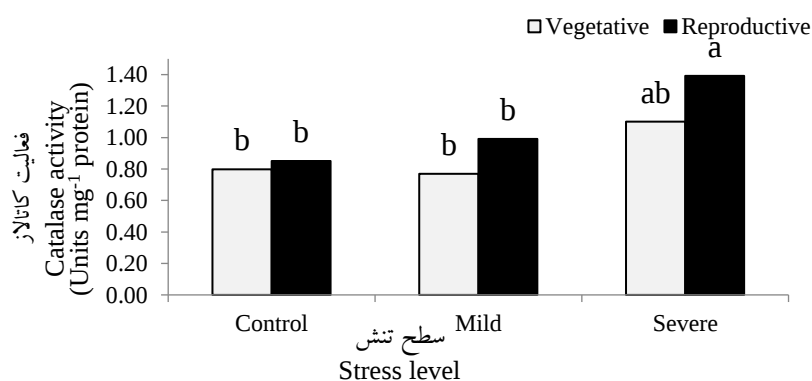
تیمارها Treatments	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	سرعت فتوسنتز Photosynthetic rate	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase activity (Units mg ⁻¹ protein)	عملکرد زیست- توده Biological yield (kg ha ⁻¹)	شاخص برداشت Harvest index (%)	محتوای روغن Oil content (%)	عملکرد روغن Oil yield (kg ha ⁻¹)
تنش غرقاب								
شاهد								
Control	330 ^{a*}	13.9 ^a	73 ^a	38.70 ^c	9590 ^a	22.2 ^a	24.0 ^b	469 ^a
تنش غرقاب (۲۴ ساعت)	254 ^b	8.1 ^b	63 ^a	42.09 ^{bc}	7586 ^b	19.7 ^b	28.9 ^a	393 ^b
تنش غرقاب (۴۸ ساعت)	215 ^b	6.1 ^b	41 ^b	46.31 ^a	6977 ^b	16.8 ^c	24.8 ^{ab}	317 ^c
مرحله رشدی								
Growth stage								
رشد رویشی	268 ^a	9.8 ^a	67 ^a	40.97 ^b	8638 ^a	18.8 ^a	25.9 ^a	412 ^a
رشد زایشی	265 ^a	8.9 ^a	51 ^b	43.76 ^a	7465 ^a	20.3 ^a	26.1 ^a	396 ^a
Reproductive stage								

* Means followed by the same letters for each trait in each column and each experimental factor using Tukey test at 5% probability level did not differ significantly.
* میانگین‌های دارای حروف مشترک برای هر صفت در هر ستون و هر فاکتور آزمایشی با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین صفات عملکردی، ویژگی‌های فتوسنتزی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گلرنگ در شرایط غرقاب

Table 4- Correlation coefficient between yield traits, photosynthetic characteristics, and antioxidant activity of safflower under waterlogging stress

ردیف Row	صفات Traits	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	1												
2	هدایت روزنه‌ای بازایی Stomatal conductance	0.850**	1											
3	سرعت فتوسنتز Photosynthetic rate	0.866**	0.769**	1										
4	سرعت فتوسنتز بازایی Photosynthetic rate	0.845**	0.605**	0.833**	1									
5	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	0.715**	0.763**	0.637**	0.583**	1								
6	فعالیت کاتالاز Catalase activity	-0.517*	-0.565*	-0.66**	-0.63**	-0.268 ^{ns}	1							
7	فعالیت پراکسیداز Peroxidase activity	-0.204 ^{ns}	-0.575*	-0.247 ^{ns}	-0.495*	-0.267 ^{ns}	-0.267 ^{ns}	1						
8	فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز Catalase activity	-0.346 ^{ns}	0.695**	-0.425 ^{ns}	-0.547*	-0.247 ^{ns}	-0.267 ^{ns}	-0.347 ^{ns}	1					
9	عملکرد دانه Seed yield	0.896**	0.747**	0.905**	0.870**	0.685**	-0.247 ^{ns}	-0.379 ^{ns}	0.447 ^{ns}	1				
10	عملکرد زیست‌توده Biological yield	0.447*	0.400*	0.442*	0.348 ^{ns}	-0.371 ^{ns}	-0.353 ^{ns}	-0.531*	-0.631*	0.621**	1			
11	محتوای روغن Oil content	-0.232 ^{ns}	-0.114 ^{ns}	-0.179	-0.214*	-0.187 ^{ns}	0.161 ^{ns}	0.145 ^{ns}	0.185 ^{ns}	-0.355 ^{ns}	-0.365 ^{ns}	1		
12	عملکرد روغن Oil yield	0.771**	0.696**	0.780**	0.753**	0.544**	-0.251 ^{ns}	0.290 ^{ns}	0.280 ^{ns}	0.790**	0.454*	0.258 ^{ns}	1	
13	شاخص برداشت Harvest index	0.552*	0.392 ^{ns}	0.552*	0.622**	0.409 ^{ns}	0.152 ^{ns}	0.084 ^{ns}	0.380 ^{ns}	0.491*	-0.365 ^{ns}	-0.049 ^{ns}	0.408 ^{ns}	1



شکل ۲- تأثیر تنش غرقاب در مرحله رشد رویشی و زایشی بر فعالیت آنزیم کاتالاز گلرنگ

Figure 2- Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stages on catalase activity of safflower

میانگین‌های دارای حروف مشترک با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letters using Tukey's test at 5% probability level did not differ significantly

(Teixeira da Silva, & Fujita, 2012). به نظر می‌رسد که مقدار اضافی پراکسید هیدروژن به آسانی در سلول غشاء نفوذ می‌کند و به عنوان یک بخش جدایی‌ناپذیر، با اکسید کردن گروه‌های تیول، آنزیم را غیرفعال می‌کند (Hasanuzzaman et al., 2012). همچنین گیاهان دارای سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی بالا در طی

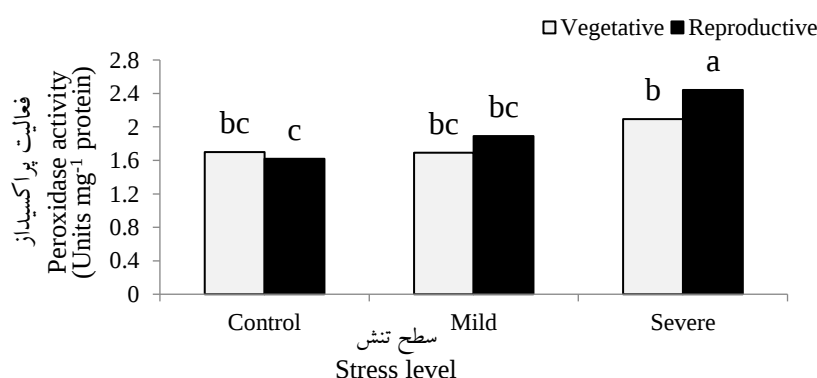
تنش غرقاب با افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی تا حدی باعث کاهش آسیب وارده به گیاهان می‌شود. کاتالاز نیز به عنوان آنزیم آنتی‌اکسیدانی به طور فعال در کاهش پراکسید هیدروژن نقش دارد و روند افزایش پراکسید هیدروژن با روند افزایش شدت و مدت زمان تنش، تا حدی باعث کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز به عنوان یک مهارکننده پراکسید هیدروژن می‌باشد (Hasanuzzaman, Hossain, 2012).

برای محافظت خود در برابر تنش رطوبتی، مجهز به سیستم‌های حذف‌کننده رادیکال آزاد هستند و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز بخشی از این سیستم محسوب می‌شود (Gill & Tuteja, 2010). افزایش فعالیت این آنزیم‌ها در مواجهه با تنش بیانگر آن است که گیاه از مزایای سازوکار دفاعی آنتی‌اکسیدانی این آنزیم برای مقابله در برابر تنش غرقاب شدید بهره برده است. به هر حال، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط غرقاب به‌طور متفاوتی عمل می‌نمایند. برای مثال، اعمال تنش غرقاب روی گیاهچه‌های کلزا نشان داد که فعالیت کاتالاز کاهش، درحالی‌که فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز و پراکسیداز افزایش یافت (Lee et al., 2014). بسیاری از محققان فعالیت این آنزیم را به‌عنوان یک عامل کلیدی در سم‌زدایی پراکسید هیدروژن، حذف مالون دی‌آلدئید و حفظ پایداری دیواره سلولی جهت حفاظت گیاهان در مقابل تنش‌های محیطی عنوان کرده‌اند (Gill & Tuteja, 2010). افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در گل‌رنگ تحت شرایط سایر تنش‌های محیطی مانند تنش خشکی نیز گزارش شده است (Manvelian et al., 2021).

دوران بازیابی پس از تنش غرقاب، به احتمال زیاد آسیب کمتری را متحمل می‌شوند (Blokshina, Fagerstedt, & Chirkova, 1999). فعالیت کاتالاز همبستگی منفی و معنی‌داری با هدایت روزنه‌ای در دوره بازیابی از تنش ($r = -0.57^{**}$) داشت (جدول ۴). این همبستگی منفی بر وقوع تنش اکسیداتیو ناشی از بسته شدن روزنه‌ها و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی کاتالاز تأکید دارد.

فعالیت آنزیم پراکسیداز

فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح تنش و برهم‌کنش سطوح تنش و مرحله رشدی قرار گرفت (جدول ۲). تیمار تنش غرقاب شدید منجر به افزایش ۳۶ درصدی فعالیت این آنزیم در مقایسه با آبیاری مطلوب شد، ولی بین آبیاری مطلوب و تنش غرقاب ملایم تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۳). فعالیت آنزیم پراکسیداز در سطوح تنش در هر دو مرحله رشدی روند متفاوتی را نشان داد، به‌گونه‌ای که در مرحله زایشی، فعالیت این آنزیم در تنش غرقاب شدید بیشتر از مرحله رویشی بود (شکل ۳). سلول‌های گیاهی



شکل ۳- تأثیر تنش غرقاب در مرحله رشد رویشی و زایشی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز گل‌رنگ

Figure 3- Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stages on peroxidase activity of safflower

میانگین‌های دارای حروف مشترک با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letters using Tukey's test at 5% probability level did not differ significantly.

(Chen, 2012). در این پژوهش، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیداز همزمان با افزایش شدت تنش در مرحله زایشی در دوران پس از تنش، تا حدودی حاکی از تحمل گیاه در برابر شرایط بی‌اکسیژنی و آسیب ناشی از تنش اکسیداتیو بود.

فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در سطوح مختلف تنش و در مراحل مختلف رشدی متفاوت بود (جدول ۲). روند تغییرات فعالیت این آنزیم در برخورد با تنش شدید غرقاب به‌صورت افزایشی بود. تنش غرقاب سبب افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم شد، به‌گونه‌ای

فعالیت آنزیم‌ها و آنتی‌اکسیدان‌های مهارکننده برای حفاظت از گیاه در مقابل تنش اکسیداتیو ناشی از شرایط غرقاب تحریک می‌شود (Blokshina et al., 1999). گزارش شده است که آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در شرایط غرقاب در مراحل اولیه رشدی افزایش یافتند و این افزایش به‌طور قابل توجهی در ارقام متحمل جو (Zhang, Tanakamaru, Abe, & Morita, 2007) و گندم (Fazeli et al., 2023a) مشاهده شد؛ درحالی‌که در ارقام حساس کاهش یافت. در مطالعات پیشین، افزایش بیان ژن پراکسیداز و کاهش بیان ژن کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز و گلو‌تاتیون ردوکتاز تحت تنش غرقاب گزارش شده است (Qi, Xu, Lin, Zhang, & ...)

است. برای مثال، مشخص شده است که اعمال تنش غرقاب روی گیاهچه‌های کلزا سبب کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز شد، درحالی‌که فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز و پراکسیداز افزایش یافت (Lee *et al.*, 2014). سوپر اکسید دیسموتاز و کاتالاز، سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی مهمی هستند که تقریباً در تمام سلول‌های زنده در معرض اکسیژن قرار دارند (Soengas *et al.*, 2018).

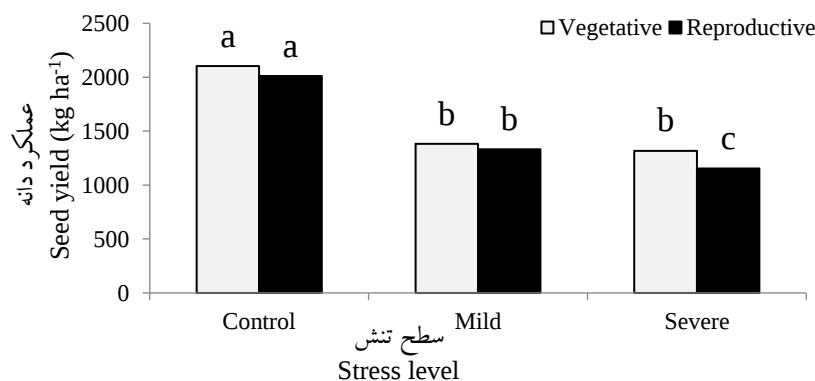
عملکرد دانه

آبیاری مطلوب بیشترین و تنش غرقاب شدید کمترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. تنش غرقاب در مرحله رشد رویشی و زایشی تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد دانه ایجاد نکرد، هرچند تأثیر نامطلوب تنش در مرحله زایشی تا حدودی بیشتر از مرحله رویشی بود (جدول ۳). تنش غرقاب منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه در هر دو مرحله رشدی شد، به‌گونه‌ای که میزان کاهش در تنش ملایم و شدید به‌ترتیب برابر با ۳۴ و ۴۰ درصد در مقایسه با آبیاری مطلوب بود (جدول ۳). میزان کاهش عملکرد دانه در سطوح مختلف تنش و مراحل رشدی متفاوت بود، به‌گونه‌ای که بیشترین کاهش در مقایسه با آبیاری مطلوب (۴۳ درصد) در شرایط تنش شدید در مرحله رشد زایشی مشاهده شد (شکل ۴). به عبارتی، تنش غرقاب شدید در مراحل رویشی و زایشی عملکرد دانه را به‌طور متفاوتی کاهش داد.

که سطح تنش شدید منجر به افزایش ۱۹ درصدی فعالیت این آنزیم در مقایسه با آبیاری مطلوب شد، درحالی‌که این افزایش برای سطح تنش ملایم تنها هشت درصد بود که با آبیاری مطلوب تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۳). افزایش فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در واکنش به تنش غرقاب قبلاً نیز گزارش شده است (Lee *et al.*, 2023a; Fazeli *et al.*, 2014). مراحل رشدی از نظر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز واکنش متفاوتی نشان دادند، به‌گونه‌ای که بیش‌ترین فعالیت این آنزیم مربوط به تیمار تنش در مرحله رشد زایشی (۴۳/۷۶ واحد بر میلی‌گرم پروتئین) در مقایسه با رشد رویشی (۴۰/۹۷ واحد بر میلی‌گرم پروتئین) بود (شکل جدول ۳).

گفته شده است که تنش غرقاب همانند سایر تنش‌های غیرزیستی از طریق اختلال در آنزیم‌ها و مسیرهای متابولیک باعث تجمع گونه‌های اکسیژن واکنشگر می‌شود، که مسئول تنش اکسیداتیو هستند (Asada, 2006). افزایش فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز به‌موازات افزایش فعالیت کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز در شرایط تنش غرقاب در سایر گیاهان از جمله کلزا (Lee *et al.*, 2014; Bansal & Cicer arietinum L.)، نخود (Zhang *et al.*, 2019) و سورگوم (Srivastava, 2012) نیز قبلاً گزارش شده است.

همچنین واکنش متفاوت آنزیم کاتالاز و سوپر اکسید دیسموتاز در واکنش به تنش غرقاب در برخی مطالعات نیز گزارش شده



شکل ۴- تأثیر تنش غرقاب در مرحله رشد رویشی و زایشی بر عملکرد دانه کلرنگ

Figure 4- Effect of waterlogging stress at vegetative and reproductive stages on seed yield of safflower

میانگین‌های دارای حروف مشترک با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letters using Tukey's test at 5% probability level did not differ significantly

تأثیرگذار دیگر مانند تاریخ کاشت و دمای بالای هوا در انتهای فصل رشد نسبت داده شده است (De San Celedonio, Abeledo, Brihet, & Miralles, 2014).

مطابق با نتایج این پژوهش، در سایر مطالعات نیز مشخص شده است که تنش غرقاب در مرحله رشد رویشی کلزا منجر به کاهش ۷۵

میزان کاهش عملکرد بسته به عوامل مختلف مانند مدت زمان تنش، مراحل رشدی و عمق تنش غرقاب می‌تواند متفاوت باشد (Wu *et al.*, 2015). مشخص شده است که عملکرد دانه در مرحله گل‌دهی در مقایسه با مراحل رویشی، به‌مقدار بیشتری کاهش می‌یابد و این کاهش به اهمیت عرضه مواد فتوسنتزی در آن مرحله و عوامل

بیشترین مقدار شاخص برداشت مربوط به تیمار آبیاری مطلوب و کمترین آن مربوط به تنش غرقاب شدید بود (جدول ۳). مدت زمان تنش غرقاب و زمان وقوع آن از جمله عوامل تأثیرگذار بر عملکرد دانه و زیست‌توده است. به نظر می‌رسد که در شرایط تنش ملایم به دلیل مواجهه گیاه با شرایط غرقاب طی مدت زمان کمتر در مقایسه با تنش شدید، عملکرد دانه در مقایسه با عملکرد زیست‌توده کمتر تحت تأثیر تنش قرار گرفته است و همین امر سبب برتری مقادیر شاخص برداشت در مقایسه با تنش شدید شد (جدول ۳). باین‌حال، نتایج سایر مطالعات در زمینه تأثیر تنش غرقاب در گندم نشان داد که تنش غرقاب قبل از مرحله گل‌دهی تأثیری بر وزن زیست‌توده و شاخص برداشت نداشت، درحالی که پس از گل‌دهی سبب کاهش وزن زیست‌توده و افزایش شاخص برداشت شد (Ding et al., 2020).

محتوای روغن

محتوای روغن تنها تحت تأثیر تنش قرار گرفت (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، کمترین و بیشترین محتوای روغن به ترتیب از آبیاری مطلوب به میزان ۲۴ درصد و تنش غرقاب ملایم به میزان ۲۸/۹ درصد حاصل شد. در شرایط تنش شدید، تفاوت معنی‌داری از نظر درصد روغن در مقایسه با آبیاری مطلوب مشاهده نشد. به عبارتی با شروع تنش ملایم، محتوای روغن افزایش یافت (جدول ۳). افزایش معنی‌دار محتوای روغن در شرایط تنش ملایم را می‌توان به تأثیرپذیری بیشتر ساخت کربوهیدرات‌ها از تنش غرقاب و در نتیجه کاهش بیشتر عملکرد دانه این ارقام نسبت داد، به عبارتی سهم کاهش ساخت کربوهیدرات‌ها بیشتر از سهم ساخت روغن بوده و این امر به صورت افزایش محتوای روغن نمایان شده است، درحالی‌که به نظر می‌رسد در شرایط تنش شدید، سهم این کاهش یکسان باشد (جدول ۳).

اطلاعات اندکی در زمینه تأثیر تنش غرقاب بر محتوای روغن دانه‌های روغنی وجود دارد. گفته می‌شود که کاهش جذب نیتروژن در زمان غرقاب در مرحله طویل شدن ساقه، سبب کاهش محتوای پروتئین دانه می‌شود (Gutierrez-Boem et al., 1996) و از آنجایی که درصد پروتئین دانه رابطه‌ای عکس با محتوای روغن دارد، بنابراین هرچه درصد پروتئین بالا باشد، محتوای روغن کاهش می‌یابد و بالعکس (Brennan, Mason, & Walton, 2000). در گیاه کلزا گزارش شده است که در شرایط تنش غرقاب، محتوای روغن از ۴۲ به ۴۵ درصد افزایش یافت (Wollmer et al., 2018). برخی پژوهشگران گزارش دادند که این صفت عمدتاً به ژنتیک گیاه بستگی دارد و تحت اثر محیط قرار نمی‌گیرد (Koutroubas, Papakosta, & Doitsinis, 2008)، از سوی دیگر، برخی معتقدند که تفاوت

درصدی عملکرد دانه شد، درحالی‌که این کاهش در شرایط مواجهه با تنش در ابتدای مرحله زایشی به ۸۵ درصد رسید (Wollmer, Pitann, & Muehling, 2018). از سایر عوامل تأثیرگذار بر کاهش عملکرد دانه می‌توان به تغییرات فیزیولوژیک و مورفولوژیک مانند اجزای عملکرد، وزن زیست‌توده و تخصیص مواد به دانه اشاره کرد. برای مثال، تغییر مقادیر عملکرد دانه در کلزا دارای ارتباط بالایی با تغییرات تجمع و توزیع مجدد مواد فتوسنتزی به دانه بود (Wang et al., 2016). در این پژوهش نیز تنش غرقاب از طریق تأثیر بر اجزای عملکرد از جمله تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و همچنین کاهش تعداد شاخه‌های فرعی و فرعی فرعی سبب کاهش عملکرد دانه گردید (داده‌ها نشان داده نشده است). به هر جهت، کاهش معنی‌دار عملکرد دانه در شرایط غرقاب بیانگر ظرفیت بازیابی و تحمل پایین گیاه در برابر سطوح تنش اعمال شده بود.

عملکرد زیست‌توده

تنش غرقاب سبب کاهش معنی‌دار عملکرد زیست‌توده در هر دو سطح تنش ملایم و شدید گردید، اگرچه بین مراحل رشدی و برهم‌کنش تنش و مراحل رشدی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۲). آبیاری مطلوب بیشترین و تنش شدید کمترین عملکرد زیست‌توده را به خود اختصاص داد و بین سطوح تنش ملایم و شدید تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. مقادیر درصد کاهش عملکرد زیست‌توده در شرایط ناشی از تنش غرقاب ملایم و شدید در مقایسه با آبیاری مطلوب به ترتیب به میزان ۲۱ و ۲۷ درصد بود (جدول ۳).

زراعت گلرنگ ممکن است در کشت پاییزه بسیاری از مناطق خوزستان با شرایط تنش غرقاب روبه‌رو شود، بر همین اساس، اجتناب از این شرایط در منطقه از اهمیت خاصی برخوردار است. در خاک‌های مستعد شرایط غرقاب، کاهش تنفس ریشه در اثر کمبود اکسیژن، رشد گیاه را محدود می‌کند (Huang & Johnson, 1995). در چنین شرایطی، انتقال اکسیژن بین ریشه‌ها و اندام هوایی تحت تأثیر قرار گرفته و سبب سرکوب فرآیندهای وابسته به اکسیژن و مهار جذب کربن و فتوسنتز می‌شود و در نهایت، تغییرات در متابولیسم گیاه و جذب مواد مغذی تحت شرایط کمبود اکسیژن، باعث محدود شدن رشد و کاهش زیست‌توده و عملکرد دانه می‌شود (Gutierrez-Boem et al., 1996).

شاخص برداشت

تنش غرقاب سبب کاهش معنی‌دار شاخص برداشت در هر دو سطح تنش ملایم و شدید شد، ولی بین مراحل رشدی و برهم‌کنش تنش و مراحل رشدی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۲).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تیمارهای مدت زمان غرقاب در مراحل مختلف رشد گلرنگ به‌طور متفاوتی ویژگی‌های فتوسنتزی و فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی و همچنین عملکرد دانه و روغن این گیاه را تحت تأثیر قرار داد. مرحله رشدی و مدت زمان غرقاب نقش مهمی در واکنش به تنش داشت. تنش غرقاب در هر دو مرحله رشد رویشی و زایشی منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه شد، به‌گونه‌ای که میزان کاهش در تنش ملایم و شدید در مقایسه با آبیاری مطلوب به‌ترتیب برابر با ۳۴ و ۴۰ درصد بود. همچنین مقادیر کاهش در سطوح مختلف تنش و مراحل رشدی متفاوت بود، به‌گونه‌ای که بیشترین کاهش عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری مطلوب در شرایط تنش شدید در مرحله رشد زایشی (۴۳ درصد کاهش) مشاهده شد. افزایش فعالیت آن‌زیم‌های آن‌تی‌اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز نقش مهمی در ایجاد انطباق گیاه با شرایط غرقاب داشتند. براساس این نتایج، به نظر می‌رسد که تقویت شیوه‌های مدیریتی مزارع گلرنگ در منطقه خوزستان در فصل زمستان ضروری باشد و از آنجایی که تنش غرقاب غالباً پدیده‌ای گذرا و موقتی است، لذا هنگام وقوع سیل بارندگی‌های سنگین، به‌منظور حذف آب مازاد و جلوگیری از کاهش خسارات اقتصادی گلرنگ باید زهکشی سطحی و زیرسطحی خاک در مزرعه انجام شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت‌های معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز به شماره پژوهانه SCU.AA99.96 کمال قدردانی را دارند.

محتوای روغن در بین ژنوتیپ‌ها نتیجه برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط است و بیان ژن‌های کنترل‌کننده تولید روغن تابعی از شرایط محیط است (Hussain, Lyra, Farooq, Nikoloudakis, & Khalid, 2016). مشخص شده است که محتوای کربوهیدرات‌های محلول می‌تواند به دانه یعنی منبع اصلی کربن برای متابولیسم چربی دانه‌های کلزا منتقل شود (Khan et al., 2018). بنابراین، وضعیت فتوسنتز و سیستم ریشه‌ای در جذب مواد مغذی و مدت زمان تنش و مراحل رشدی می‌تواند بر محتوای روغن بذر مؤثر واقع شود. در زمان وقوع تنش، پویایی گیاه تغییر می‌کند و ممکن است اولویت انتقال مواد فتوسنتزی برای رشد دانه‌ها تغییر یابد، و کاهش دسترسی به آب ممکن است باعث افزایش جزئی محتوای روغن دانه‌ها شود (Zandi, Rahnama, & Meskarbashi, 2023).

عملکرد روغن

عملکرد روغن در تنش ملایم و شدید در مقایسه با آبیاری مطلوب به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به‌میزان ۱۶ و ۳۲ درصد کاهش یافت و بین مراحل رشدی نیز تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۲ و ۳). بیشترین عملکرد روغن در آبیاری مطلوب و کمترین مقدار آن در تنش شدید مشاهده شد (جدول ۳). عملکرد روغن به دو عامل عملکرد دانه و محتوای روغن بستگی دارد و دلیل کاهش عملکرد روغن در تنش ملایم و شدید علی‌رغم افزایش محتوای روغن، کاهش عملکرد دانه بود. بنابراین علی‌رغم افزایش محتوای روغن، عملکرد روغن کاهش یافت (Sheikh Mamo, Rahnama, & Hassibi, 2023). در این پژوهش، کم‌ترین عملکرد روغن در تنش غرقاب شدید مشاهده شد که این امر به کاهش عملکرد دانه علی‌رغم تغییر در محتوای روغن نسبت داده می‌شود. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عملکرد روغن با عملکرد دانه ($r = 0.79^{**}$)، نیز بر نقش عملکرد دانه در تعیین عملکرد روغن تأکید دارد (جدول ۴).

References

- Annual Report. 2022. Annual harvested area, production, and yield in 2021-2022. Ministry of Agriculture Jihad. Iran.
- Arbona, V., Hossain, Z., López-Climent, M. F., Pérez-Clemente, R. M., & Gómez-Cadenas A. (2008). Antioxidant enzymatic activity is linked to waterlogging stress tolerance in citrus. *Physiology Plantarum*, 132, 452-466. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01029.x>
- Asada, K. (2006). Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiology*, 141(2), 391-6. <https://doi.org/10.1104/pp.106.082040>
- Ashraf, M. A. (2012). Waterlogging stress in plants: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 7, 1976-1981.
- Bailey-Serres, J., Lee, S. C., & Brinton, E. (2012). Waterproofing crops: Effective flooding survival strategies. *Plant Physiology*, 160(4), 1698-709. <https://doi.org/10.1104/pp.112.208173>.
- Bansal, R., & Srivastava, J. P. (2012). Antioxidative defense system in pigeonpea roots under waterlogging stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 515-522. <https://doi.org/10.1007/s11738-011-0848-z>
- Beers, R. F., & Sizer, I. W. (1952). A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. *Journal of Biological Chemistry*, 195(1), 133-40.

8. Blokhina, O. B., Fagerstedt, K. V., & Chirkova, T. V. (1999). Relationships between lipid peroxidation and anoxia tolerance in a range of species during post-anoxic reaeration. *Physiologia Plantarum*, 105, 625-632. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105405.x>
9. Brennan, R. F., Mason, M. G., & Walton, G. H. (2000). Effect of nitrogen fertilizer on the concentrations of oil and protein in canola (*Brassica napus* L.) seed. *Journal of Plant Nutrition*, 23(3), 339-348. <https://doi.org/10.1080/01904160009382020>
10. De San Celedonio, R. P., Abeledo, L. G., Brihet, J. M., & Miralles, D. J. (2014). Waterlogging affects leaf and tillering dynamics in wheat and barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202(5), 409-420. <https://doi.org/10.1111/jac.12151>
11. Ding, J., Liang, P., Wu, P., Zhu, M., Li, C., Zhu, X., Gao, D., Chen, Y., & Guo, W. (2020). Effects of waterlogging on grain yield and associated traits of historic wheat cultivars in the middle and lower reaches of the Yangtze river, China. *Field Crops Research*, 264, 107695. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107695>
12. Fazeli, S. B., Rahnama, A., & Hassibi, P. (2022). Effect of waterlogging stress on yield and yield components and photosynthetic characteristics of two Mung bean cultivars in Ahvaz conditions. *Plant Productions*, 45(1), 95-108. <https://doi.org/10.22055/ppd.2020.30538.1805>
13. Fazeli, S. B., Meskarbashee, M. & Rahnama, A. (2023a). Effect of waterlogging stress at the three-leaf stage on the growth and some physiological characteristics of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Productions*, 46(2), 279-292. <https://doi.org/10.22055/ppd.2023.42792.2072>
14. Fazeli, S. B., Meskarbashee, M. & Rahnama, A. (2023b). Evaluation of waterlogging tolerance in twenty-one cultivars and genotypes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) and its effect on some physiological characteristics of shoot and root system at the three-leaf stage. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(3), 303-318. <https://doi.org/10.22067/jcsc.2023.80038.1209>
15. Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology Biochemistry*, 48(12), 909-30. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
16. Grassini, P., Indaco, G. V., Pereira, M. L., Hall, A. J., & Trápani, N. (2007). Responses to short-term waterlogging during grain filling in sunflower. *Field Crops Research*, 101, 352-363. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.12.009>
17. Gutierrez Boem, F. H., Lavado, R. S., & Porcelli, C. A. (1996). Note on the effects of winter and spring waterlogging on growth, chemical composition and yield of rape seed. *Fied Crops Research*, 47, 175-179. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00025-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00025-1)
18. Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9, 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
19. Hasanuzzaman, M., Hossain, M. A., Teixeira da Silva, J. A., & Fujita, M. (2012). Plant responses and tolerance to abiotic oxidative stress: Antioxidant defense is a key factor. In *Crop Stress and its Management: Perspectives and Strategies*. In: V. A. Bandi, K. Shanker, C. Shanker, M. Mandapaka (Eds.); Springer: Berlin, Germany. 261–316.
20. Huang, B., & Johnson, J. W. (1995). Root respiration and carbohydrate status of two wheat genotypes in response to hypoxia. *Annals of Botany*, 75, 423-427. <https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1041>
21. Hussain, M. I., Lyra, D. A., Farooq, M., Nikoloudakis, N., & Khalid, N. (2016). Salt and drought stresses in safflower: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0344-8>
22. Khan, S., Anwar, S., Kuai, J., Noman, A., Shahid, M., Din, M., Ali, A., & Zhou, G. (2018). Alteration in yield and oil quality traits of winter rapeseed by lodging at different planting density and nitrogen rates. *Scientific Reports*, 8, 634. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18734-8>
23. Koutroubas, S. D., Papakosta, D. K., & Doitsinis, A. (2008). Nitrogen utilization efficiency of safflower hybrids and open-pollinated varieties under Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 107(1), 56-61. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.12.009>
24. Lee, Y. H., Kim, K. S., Jang, Y. S., Hwang, J. H., Lee, D. H., & Choi, I. H. (2014). Global gene expression responses to waterlogging in leaves of rape seedlings. *Plant Cell Reports*, 33, 289-299. <https://doi.org/10.1007/s00299-013-1529-8>
25. Loreti, E., Van Veen, H., & Perata, P. (2016) Plant responses to flooding stress. *Current Opinion in Plant Biology*, 33, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.06.005>
26. Malik, A. L., Colmer, D. T., Lambers, H., Setter, T. L., & Schortemeyer, M. (2002). Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat. *New Phytolog*, 153, 225-236. <http://dx.doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00318.x>
27. Manvelian, J., Weisany, W., Tahir, N. A. R., Jabbari, H., & Diyanat, M. (2021). Physiological and biochemical response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivarsto zinc application under droughtstress. *Industrial Crops and Products*, 172, 15. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114069>
28. Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., & Van Breusegem, F (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, 9(10), 490-8. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.08.009>
29. Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach

- chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5), 867–880. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
30. Parent, C., Capelli, N., Berger, A., Crèvecoeur, M., & Dat, J. F. (2008). An overview of plant responses to soil waterlogging. *Plant Stress*, 2, 20-27.
 31. Plaut, Z., Mayoral, M. L., & Reinhold, L. (1987). Effect of altered sink: Source ratio on photosynthetic metabolism in source leaves. *Plant Physiology*, 85, 786-791. <https://doi.org/10.1104/pp.85.3.786>
 32. Qi, X. H., Xu, X. W., Lin, X. J., Zhang, W. J., & Chen, X. H. (2012). Identification of differentially expressed genes in cucumber (*Cucumis sativus* L.) root under waterlogging stress by digital gene expression profile. *Genomics*, 99, 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2011.12.008>
 33. Rahnema, A., Poustini, K., Munns, R., & James, R. A. (2010). Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil. *Functional Plant Biology*, 37, 255-263. doi: <http://doi.org/10.1071/fp09148>.
 34. Shahrokhnia, M. H., & Sepaskhah, A. R. (2017). Physiologic and agronomic traits in safflower under various irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization. *Industrial Crops and Products*, 95, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.021>
 35. Sheikh Mamo, B., Rahnema, A., & Hassibi, P. (2023). The influence of terminal heat stress on physiological and yield characteristics of promising sunflower cultivars in Ahvaz climate condition. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(3), 835-851. <https://doi.org/10.22077/escs.2023.4928.2107>
 36. Smith, I. K., Vierheller, T. L., & Thorne, C. A. (1988). Assay of glutathione reductase in crude tissue homogenates using 5,5'-dithiobis (2-nitrobenzoic acid). *Analytical Biochemistry*, 175(2), 408-13. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(88\)90564-7](https://doi.org/10.1016/0003-2697(88)90564-7).
 37. Soengas, P., Rodríguez, V. M., Velasco, P., & Cartea, M. E. (2018). Effect of temperature stress on antioxidant defenses in *Brassica oleracea*. *ACS Omega*, 3(5), 5237-5243. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00242>
 38. Striker, G. G. (2012). Time is on our side: The importance of considering a recovery period when assessing flooding tolerance in plants. *Ecological Research*, 27, 983-987. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-0978-9>
 39. Tian, L., Zhang, Y., Chen, P., Zhang, F., Li, J., Yan, F., Dong, Y., & Feng, B. (2021). How does the waterlogging regime affect crop yield? A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 634898. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634898>
 40. Wang, C., Hai, J., Yang, J., Tian, J., Chen, W., Chen, T., & Wang, H. (2016). Influence of leaf and silique photosynthesis on seeds yield and seeds oil quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *European Journal of Agronomy*, 74, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.008>
 41. Wollmer, A. C., Pitann, B., & Muehling, K. H. (2018). Waterlogging events during stem elongation or flowering affect yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) but not seed quality. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204, 165-174. <https://doi.org/10.1111/jac.12244>
 42. Wu, X., Tang, Y., Li, C., Wu, C., & Huang, G. (2015). Chlorophyll fluorescence and yield responses of winter wheat to waterlogging at different growth stages. *Plant Production Science*, 18, 284-294. <https://doi.org/10.1626/pps.18.284>
 43. Yan, K., Zhao, S., Cui, M., Han, G., & Wen, P. (2018). Vulnerability of photosynthesis and photosystem I in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) exposed to waterlogging. *Plant Physiology and Biochemistry*, 125, 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.017>
 44. Yin, D., Sun, D., Han, Z., Ni, D., Norris, A., & Jiang, C. Z. (2019). PhERF2, an ethylene-responsive element binding factor, plays an essential role in waterlogging tolerance of Petunia. *Horticulture Research*, 6, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0165-z>
 45. Zandi, R., Rahnema, A., & Meskarbashi, M. (2023). Effect of deficit irrigation regimes on photosynthetic, morpho-physiological and yield traits of safflower (*Carthamus tinctorious* L.) in Ahvaz climate condition. *Crop Physiology Journal*, 15(59), 19-40. <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1614-en.html>
 46. Zhang, G., Tanakamaru, K., Abe, J., & Morita, S. (2007). Influence of waterlogging on some anti-oxidative enzymatic activities of two barley genotypes differing in anoxia tolerance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29, 171-176. <https://doi.org/10.1007/s11738-006-0022-1>
 47. Zhang, P., Lyu, D., Jia, L., He, J., & Qin, S. (2017). Physiological and de novo transcriptome analysis of the fermentation mechanism of *Cerasus sachalinensis* roots in response to short-term waterlogging. *BMC Genomics*, 18, 649. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-4055-1>
 48. Zhang, R., Zhou, Y., Yue, Z., Chen, X., Cao, X., Xu, X. X., Xing, Y. F., Jiang, B., Al, X. Y., & Huang, R. D. (2019). Changes in photosynthesis, chloroplast ultrastructure, and antioxidant metabolism in leaves of sorghum under waterlogging stress. *Photosynthetica*, 57, 1076–1083. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.124>



The Effect of Foliar Application of Zinc and Iron at Different Developmental Phases on the Quantitative and Qualitative Characteristics of Two Cultivars of Dryland Wheat (*Triticum aestivum* L.)

Sh. Ajam¹, A. Biabani^{1*}, R. Mohammadi², A. Rahemi Karizaki¹, H. Ghorbani Vaghei³

1- Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

2- Agricultural and Horticultural Science Research Department, Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Golestan Province, Gorgan, Iran

3- Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbadkavous University, Gonbadkavous, Iran

(*- Corresponding author's Email: abbas.biabani@gonbad.ac.ir)

Received: 05 July 2024

Revised: 07 November 2024

Accepted: 23 November 2024

Available Online: 11 March 2025

How to cite this article:

Ajam, Sh., Biabani, A., Mohammadi, R., Rahemi Karizaki, A., & Ghorbani Vaghei, H. (2025). The Effect of Foliar Application of Zinc and Iron at Different Developmental Phases on the Quantitative and Qualitative Characteristics of Two Cultivars of Dryland Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 187-200. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.88774.1338>

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is a widely cultivated crop across diverse soil types, and enhancing its yield, both quantitatively and qualitatively per unit area is a key agricultural priority in the country. Micro elements play a key role in improving the quality performance of products and even human health. Foliar spraying in arid and semi-arid areas, which affects the osmotic pressure of absorption and activity of these elements, is of special importance. It is essential to develop high-yielding cultivars with enhanced micronutrient uptake efficiency and strong tolerance to various stresses. Recently, Aseman and Paya dryland wheat cultivars have replaced other cultivars in Golestan province due to their higher yield, but there is no specific information about the agricultural characteristics of these cultivars, including their reaction to zinc and iron micronutrient fertilizers in the grain. Therefore, this study investigated the effects of zinc and iron fertilization, along with optimal foliar application timing, on the quantitative and qualitative traits of Aseman and Paya wheat cultivars under the climatic conditions of Gonbadkavous.

Materials and Methods

This study was conducted as factorial design based on randomized complete block design (RCBD) with three replications. The first factor was the foliar application of micronutrients at three levels (no micronutrient application or pure water, foliar application of 4‰ zinc chelate, and 6‰ iron chelate) and the second factor was the timing of foliar applications at three levels (application at the tillering stage, stem elongation stage, and grain filling stage). The third factor consisted of wheat cultivars (Aseman and Paya). In total therefor 18 treatments



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.88774.1338>

were applied in each replication. Chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, and carotenoids were measured using the Arnon method one week after the implementation of all treatments. The Kjeldahl method was used to measure the protein content of the grain, and grain yield, grain concentrations of iron and zinc, and harvest index were calculated.

Results and Discussion

The results showed that the two cultivars Aseman and Paya had significant differences in grain yield and harvest index, number of spikelets, and the amount of chlorophyll and carotenoids. The foliar treatment (iron, zinc and no foliar application) caused a significant increase in the concentration of iron and zinc in the grain compared to the control, but it did not affect the grain performance, harvest index, grain protein percentage and chlorophyll pigments. The interaction effect of cultivar treatments foliar spraying time showed that the highest value of grain performance was obtained with the application of micronutrient elements in the stemming stage of the Paya cultivar with an average of 730 kg ha^{-1} . Basically, wheat nutrition in drylands is more complicated than in irrigated lands. Because in such conditions, the management of nutrients should be adjusted based on the expected moisture regime in the region. The amount of production in drylands is primarily influenced by weather conditions, especially rainfall, that is, in the conditions of applying proper agricultural management and choosing the right variety for the region, the optimal production will depend on the existence of favorable environmental conditions, as well as the cultivars adapted to the lands and regions.

Conclusion

Foliar application of zinc and iron, as a management strategy to improve the nutritional status of wheat under dry conditions, significantly increased the concentration of zinc and iron in the grain by 55% and 100%, respectively. However, under the prevailing drought conditions of the study area, this treatment did not result in a significant increase in grain yield, harvest index, or grain protein content. This shows that other factors such as water stress, inappropriate crop management and genetic characteristics of the variety play a more decisive role in wheat yield. Choosing the right cultivar that is compatible with environmental conditions is one of the factors that can help improve wheat yield. In this research, Paya variety with an average yield of 675 kg ha^{-1} showed better performance than Aseman variety with an average yield of 616 kg ha^{-1} . Also, the effect of variety x time of foliar spraying also had an effect on the yield and the best yield was observed in Paya cultivar with foliar spraying at the stemming stage with an average yield of 729 kg ha^{-1} . This agricultural method can be used as a short-term solution to reduce nutritional problems caused by the lack of these elements and improve food security indicators.

Acknowledgment

The cooperation of the Honorable Research Assistant of the Faculty of Agriculture of Gonbadkavos University in order to secure the credit of the project and the Honorable Head of the Gonbadkavos Agricultural Research Station for providing the grain s of the studied cultivars and the necessary cooperation are sincerely appreciated.

Keywords: Chlorophyll, Grain yield, Micronutrients

اثر محلول پاشی روی و آهن در مراحل مختلف نمو بر ویژگی های کمی و کیفی دانه دو رقم گندم دیم (*Triticum aestivum* L.)

شهرنوش عجم^۱، عباس بیابانی^{۱*}، رحمت اله محمدی^۲، علی راحمی کاریزکی^۱، حجت قربانی واقعی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

چکیده

به منظور بررسی اثر کاربرد عناصر ریزمغذی (کلات آهن شش در هزار، کلات روی چهار در هزار و محلول پاشی آب به عنوان شاهد) به صورت محلول پاشی در مراحل مختلف رشد (پنجه زنی، ساقه دهی و پر شدن دانه) بر ویژگی های کمی و کیفی دانه دو رقم گندم دیم (*Triticum aestivum* L.) (آسمان و پایا)، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد اجرا شد. در این بررسی، صفات عملکرد دانه، شاخص برداشت، تعداد سنبلچه در سنبله، غلظت روی، آهن، پروتئین دانه و میزان رنگیزه های فتوسنتزی برگ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر رقم بر عملکرد دانه و شاخص برداشت و تعداد سنبلچه در سنبله و میزان کلروفیل و کاروتنوئیدها معنی دار بود. تیمار محلول پاشی آهن و روی سبب افزایش معنی دار غلظت آهن و روی دانه نسبت به شاهد شد، اما بر عملکرد دانه، شاخص برداشت، درصد پروتئین دانه و رنگیزه های کلروفیل تفاوت معنی داری نداشت. اثر متقابل تیمارهای رقم $\times$ زمان محلول پاشی بر عملکرد دانه معنی دار بود. بیشترین مقدار عملکرد دانه با کاربرد عناصر ریزمغذی در مرحله ساقه دهی رقم پایا با میانگین ۷۳۰ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. در مجموع، می توان چنین استنباط نمود که کاربرد روی و آهن در شرایط اقلیمی منطقه به علت اختلال در سنتز کلروفیل و پروتئین سازی ناشی از خشکسالی به وجود آمده بر افزایش عملکرد گندم دیم مؤثر نبوده، اما سبب افزایش غلظت آهن و روی دانه شد و ممکن است یک راهبرد امیدوارکننده برای بهبود امنیت غذایی و مقابله با کمبود عناصر ریزمغذی در انسان باشد.

واژه های کلیدی: کلروفیل، عملکرد دانه، عناصر ریزمغذی

مقدمه

میلیون تن و ۲۲۵۸ کیلوگرم در هکتار می باشد (FAO, 2023). گندم دیم استان گلستان با سطحی معادل ۲۸۵/۶ هزار هکتار و عملکرد ۲/۲۴ تن در هکتار (حدود ۸۰/۷ درصد سطح زیر کشت و ۶۶/۷ درصد تولید گندم استان) جایگاه خاصی را در زراعت گندم منطقه دارد (Iran Statistics Center, 2017). تولید گندم در دیمزارهای گرمسیر کشور به دلیل عواملی از قبیل حجم و پراکنش بارش، خشکی آخر فصل، گرما و بروز بیماری ها با محدودیت های فراوانی روبه رو می باشد بنابراین توسعه ارقام پرمپتانسیل، دارای قابلیت بالا برای جذب ریزمغذی ها و تحمل به تنش ها امری ضروری است. علاوه بر کودهای اساسی (NPK) که نقش مهمی در بهبود عملکرد کمی محصولات دارند، عناصر میکرو نیز نقش کلیدی در بهبود عملکرد کیفی محصولات و حتی سلامت انسان دارند و نگرانی اصلی برای سوء تغذیه در سطح جهان است (Broadley et al., 2017).

گندم (*Triticum aestivum* L.) از گیاهان زراعی است که در بیشتر خاک ها کشت می شود و افزایش کمی و کیفی عملکرد آن در واحد سطح از مهم ترین اولویتهای اجرایی کشور می باشد. سطح زیر کشت، تولید و عملکرد گندم در ایران به ترتیب ۶/۲ میلیون هکتار، ۱۴

۱- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

۲- بخش تحقیقات علوم زراعی-باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، گرگان، ایران

۳- گروه منابع طبیعی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: abbas.biabani@gonbad.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88774.1338>

(Cakmak, Rengel, & Zhao, 2012).

محلول پاشی عناصر میکرو به جذب سریع عناصر از اندام‌ها و بافت‌های محصول کمک می‌کند (Azam Shah et al., 2016). این امر در مناطق خشک و نیمه‌خشک که فشار اسمزی جذب و فعالیت این عناصر را تحت تأثیر رفتار گیاه و زمان‌بندی محلول پاشی افزایش می‌دهد، اهمیت ویژه‌ای دارد (Shehata, Abdel-Azem, Abou El- (Yazied, & El-Gizawy, 2010). آهن در زنجیره انتقال الکترون و سیتوکروم شرکت می‌کند (Rehman Farooq, Ozturk, ASIF, & Siddique, 2018) و نقش اساسی در سنتز کلروفیل، نمو کلروپلاست، انتقال الکترون، فتوسنتز و متابولیسم گیاهان دارد (Ghasemian, Ghalavand, Sorooshzadeh, & Pirzad, 2010). نتایج بررسی واکنش گندم دوروم به محلول پاشی با منابع مختلف و میزان کودهای آهن نشان داد که کاربرد آهن باعث افزایش فعالیت تمام آنزیم‌های برگ، کلروفیل برگ، پروتئین دانه، محتوای آهن و عملکرد دانه شده، ولی نوع کود آهن تأثیری بر فعالیت آنزیم‌ها نداشت، اما بیشترین میزان کلروفیل، عملکرد دانه، آهن دانه و محتوای پروتئین با استفاده از دو گرم در لیتر نانو اکسید آهن، نسبت به سایر کودها (سولفات آهن و کلات آهن) حاصل شد و بعد از آن هشت گرم در لیتر سولفات آهن برای تولید گندم دوروم پیشنهاد گردید (Ghafari, & Razmjoo, 2015). نتایج دوساله در مطالعه‌ای برای تعیین تأثیر کاربردهای روی و آهن بر عملکرد گندم، جذب روی و آهن و غلظت آن در دانه نشان داد که محلول پاشی روی باعث افزایش غلظت روی و غلظت آهن در دانه‌ها به ترتیب ۹۹ و ۸ درصد گردید. محلول پاشی آهن باعث افزایش ۲۱ درصدی غلظت آهن و ۱۳ درصدی غلظت روی در دانه شد (Pahlavan Rad, & Pessarakli, 2009).

روی نقش بسیار مهمی در سنتز پروتئین و کربوهیدرات‌ها، اعمال متابولیک سلول، محافظت غشاء در مقابل ROS و سایر فرآیندهای مرتبط با سازگاری گیاهان به تنش‌ها ایفا می‌کند (Marschner, 1995). طبق گزارشی، کاربرد روی به صورت محلول پاشی باعث افزایش عملکرد، غلظت روی دانه و بهبود جوانه‌زنی با روی در مقایسه با ارقام تیمار نشده گندم شد (Shariatipour, Alavikia, Moghaddam, Velu, & Heidari, 2020). نتایج مطالعه‌ای سه ساله برای تعیین پاسخ ارقام گندم به محلول پاشی سولفات روی یک مرحله (ظهور سنبله) و دو مرحله (گل‌دهی و ظهور سنبله) بر روی تاج پوشش گیاه مشاهده شد، کاربرد روی در مرحله ظهور سنبله، غلظت روی دانه را به میزان ۸/۵ تا ۹/۵ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش داد و با کاربرد عنصر روی در هر دو مرحله گل‌دهی و ظهور سنبله، غلظت عنصر روی به ۴۴/۳ و ۵۲/۴ میلی گرم بر کیلوگرم (در سال دوم و سوم) رسید. کاربرد دو بار استفاده از روی برای تولید دانه‌های با غلظت روی بالاتر از سطح هدف ۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم ضروری

بود (Keshavarzafshar et al., 2020).

کمبود هر یک از عناصر آهن و روی باعث بی‌نظمی در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تولید هورمون‌های رشد و تشکیل کلروفیل می‌شود و موجب عدم توازن عناصر غذایی در گیاه و در نهایت کاهش کمی و کیفی محصول، نمو ریشه و اندام هوایی، کاهش مقاومت محصول در برابر تنش‌های محیطی و در نهایت منجر به مرگ گیاه می‌شود (Dimkpa & Bindraban, 2017).

محققان با بررسی تأثیر محلول پاشی آهن و روی در بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی سه رقم گندم نشان دادند که بین ارقام گندم در اثر محلول پاشی با آهن و روی از لحاظ عملکرد دانه، میزان روی و آهن اختلاف معنی دار وجود دارد. محققان در رابطه با واکنش چند رقم گندم نان به محلول پاشی فرم‌های مختلف روی و آهن در دو منطقه با خاک‌های متفاوت به این نتیجه رسیدند که محلول پاشی روی و آهن منجر به بهبود خصوصیات رشدی و عملکرد دانه شد و محلول پاشی سولفات روی و سولفات آهن در هر دو منطقه با pH و شوری بالا، نتیجه بهتری در مقایسه با فرم کلاته این عناصر داشت. در نهایت، کشت ارقام جدید و محلول پاشی فرم‌های سولفات روی و آهن برای تولید گندم در شرایط مشابه توصیه شد (Arzamjo, Behdani, Sohrabi, & Sadeghzadeh, 2016).

اثر بخش بودن محلول پاشی عناصر ممکن است به عوامل متعددی بستگی داشته باشد که یکی از این عوامل، مرحله رشد گیاه است. در این زمینه، محققان نشان دادند که بیشترین غلظت روی در دانه گندم زمانی حاصل شد که محلول پاشی روی پس از مرحله گل‌دهی در مقایسه با کاربرد قبل از مرحله گل‌دهی استفاده شود (Ozturk et al., 2006; Cakmak, Pfeiffer, & McClafferty, 2010). طی بررسی دیگری از اثر محلول پاشی آهن بر عملکرد ارقام دیم به این نتیجه رسیدند که بهترین و مناسب‌ترین زمان محلول پاشی آهن برای گندم دیم در شرایط اقلیمی کرمانشاه زمان پنجه‌زنی گندم است (Yeganehpour, Kehrarian, Biginia, Moinirad, & Hosni Asl, 2012). همچنین در ارزیابی اثر عناصر کم مصرف آهن و روی بر عملکرد کمی و کیفی گندم تحت تنش شوری در اقلیم خوزستان، کاربرد ۳۰ کیلوگرم در هکتار کود روی (خاک کاربرد) و ۲/۵ کیلوگرم در هکتار کود آهن (کودآبیاری) در مرحله پنجه‌زنی در خاک‌های شور استان خوزستان پیشنهاد شد (Jafarnejhadi, MeskiniVishkaee, MousaviFazl, LotfaliAyeneh, & Behbahani, 2022). سلیم و همکاران (AlamMondal, AlamNadim & Akter, 2023) نیز با محلول پاشی روی شش درصد بر گیاه ماش در بنگلادش، افزایش تعداد گل، وزن هزار دانه، تعداد دانه در غلاف را گزارش کردند و افزایش عملکرد دانه و کاهش روز تا گل‌دهی را نسبت به شاهد اعلام کردند. گنجی و همکاران (Ganji, Khorgami, & Rafiei, 2013)

در شرایط آب‌وهوایی گنبد کاووس بر ویژگی‌های کمی و کیفی دانه گندم ارقام آسمان و پایا مطالعه شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد کاووس (استان گلستان) طی سال زراعی ۱۴۰۱-۰۲ به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. خصوصیات منطقه مورد مطالعه، ارتفاع از سطح دریا ۴۵ متر و طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۱۲° و ۵۵° درجه شرقی و ۱۶° و ۳۷° درجه شمالی و براساس آمار هواشناسی گنبد کاووس، متوسط بارش بلندمدت حدود ۴۵۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت ۱۸/۷۳ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱). عامل اول محلول پاشی عناصر در سه سطح شامل: عدم مصرف ریزمغذی (آب خالص)، محلول پاشی کلات روی چهار در هزار و کلات آهن شش در هزار و عامل دوم زمان‌های محلول پاشی در سه سطح شامل محلول پاشی در مرحله پنجه‌دهی، ساقه‌رفتن و پرشدن دانه و عامل سوم ارقام گندم آسمان و پایا است و در کل تعداد ۱۸ تیمار در هر تکرار کشت شد.

قبل از کاشت، ابتدا نمونه برداری خاک در عمق‌های ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شد (جدول ۲). هر کرت شامل شش خط کاشت به طول چهار متر و فاصله خطوط کاشت ۲۰ سانتی‌متر بود. کاشت به صورت دستی صورت گرفت.

در طول دوره رشد، عملیات زراعی مانند کوددهی و مبارزه با علف‌های هرز و آفات برحسب ضرورت صورت گرفت. تراکم کاشت ۳۰۰ بذر در مترمربع در نظر گرفته شد. کشت به صورت دیم در ۲۱ آذرماه به محض حادث شدن اولین بارندگی مؤثر و پس از گاورو شدن زمین انجام شد، همچنین عملیات آماده‌سازی بستر بذر با دو بار دیسک عمود بر هم انجام شد.

نتیجه گرفتند که تیمار محلول پاشی روی از اثربخشی بیشتری نسبت به سایر تیمارهای محلول پاشی (آهن و بور) بر عملکرد دانه ارقام دیم در آزمایش برخوردار است. بنابراین نیترژن به صورت ترکیب با خاک و محلول پاشی روی و آهن، می‌تواند یک عمل کشاورزی خوب برای افزایش محتوای پروتئین و غلظت روی و آهن در غلات باشد و می‌تواند راهبرد امیدوارکننده‌ای برای رفع کمبود شود (Zhang et al., 2021; Kamai, & Isvand, 2019; Singh, Timsina, Lind, Cagno, & Janssens, 2018)، اما تعیین حد بحرانی عناصر غذایی کم مصرف از اولویت‌های تحقیقاتی برای کاربرد و توصیه کودهای آهن و روی در گندم دیم می‌باشد، زیرا این حدود بحرانی می‌تواند معیاری در تشخیص نیاز و یا عدم نیاز به کاربرد این عناصر غذایی در خاک‌های مناطق مورد مطالعه باشد (Faizi Asl, Valizadeh, Toshih, Taliei, & Belson, 2004). در این رابطه، بلالی و همکاران (Bilali, Malkuti, Mashayikhi, & Khademi, 2000) بیان کردند که محدوده حد بحرانی آهن در کشور از دو تا هشت میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است و حد بحرانی روی را در خاک برای گندم آبی در شمال غرب کشور به طور متوسط ۰/۷۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین کردند و همچنین فیضی اصل (Faizi Asl, 2009) حد بحرانی ۰/۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم را به عنوان حد بحرانی روی در خاک برای گندم دیم رقم سرداری در شمال غرب کشور اعلام کرد.

هدف از مطالعه محلول پاشی آهن و روی در ارقام گندم آسمان و پایا در شرایط دیم، برای بالا بردن تحمل گیاهان زراعی به شرایط نامساعد محیطی رشد، بالا بردن عملکرد و اجزای آن و نیز میزان آهن و روی و پروتئین دانه بود، اخیراً ارقام دیم گندم آسمان و پایا به علت عملکرد بیشتر و مقاومت به بیماری‌ها و کیفیت خوب نانوايي، جایگزین رقم‌های دیگر در استان گلستان شده است، ولی از خصوصیات زراعی این ارقام از جمله واکنش آن نسبت به کودهای ریزمغذی نظیر روی و آهن در دانه اطلاعات خاصی وجود ندارد. لذا در این تحقیق، اثر مصرف کود روی و آهن و زمان محلول پاشی مناسب

جدول ۱- آمار هواشناسی بلندمدت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک گنبد کاووس (۱۳۷۱-۱۴۰۰)

Table 1- Long-term meteorological statistics of Gonbad Kavous synoptic meteorological station (1992-2022)

	فروردین March	اردیبهشت April	خرداد May	تیر June	مرداد July	شهریور August	مهر September	آبان October	آذر November	دی December	بهمن January	اسفند February	میانگین ۳۰ ساله Average 30 years
میزان بارندگی (میلی‌متر) Quantitas pluviae (mm)	51.9	39.0	14.5	20.4	25.0	17.4	33.4	41.2	48.0	39.3	63.4	60.8	454.1
میانگین دما هوا (درجه سانتی‌گراد) Average air temperature (°C)	14.9	20.3	26.4	29.3	30.0	27.5	21.8	15.8	10.7	8.8	8.6	10.8	18.73

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک محل اجرای آزمایش (عمق صفر تا ۶۰ سانتی متر)
Table 2- Physical and chemical properties of soil (depth 0 to 60cm)

عمق خاک (cm)	هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	اسیدیته کل الشیع pH	درصد مواد خشکی T.N.V (%)	درصد کربن الی OrganicC (%)	درصد نیتروژن کل Total N (%)	درصد فسفر قابل جذب P (ppm)	درصد پتاسیم قابل جذب K (ppm)	درصد رس Clay (%)	درصد سیلت Silt (%)	درصد شن Sand (%)	کلاس بافت خاک Soil texture class	آهن Fe (ppm)	منگنز Mn (ppm)	روی Zn (ppm)	مس Cu (ppm)	کلسیم Ca (Meq l ⁻¹)	منیزیم Mg (Meq l ⁻¹)	سدیم Na (Meq l ⁻¹)	نسبت جذب سدیم SAR
0-30	6.2	7.82	10.8	1.19	0.12	11.1	433	38	52	10	Si.C.L.	0.97	52.2	0.68	1.63	5	10	23.5	8.58
30-60	9.1	7.82	11.8	1.05	۱۱.۰	6.9	320	37	52	11	Si.C.L.	74.0	96.1	0.47	1.59	4.5	4.5	17.5	8.25

T.N.V: Total Neutralizing Value Indicates the percentage of a substance (usually lime or calcium carbonate) that has the ability to neutralize soil acidity.

درصدی از یک ماده (معمولاً آهک یا کربنات کلسیم) را نشان می‌دهد که توانایی خنثی کردن اسیدیته خاک را دارد.

سبلیت رسمی لوم

سنبلچه در سنبله معنی دار بود، اما بر درصد پروتئین دانه، غلظت آهن و روی دانه و کلروفیل a غیرمعنی دار بود، همچنین اثرهای تیمار محلول پاشی عناصر ریزمغذی روی، آهن و آب (به عنوان شاهد)، به جز بر غلظت روی و آهن دانه با سایر صفات اختلاف معنی دار نداشت. اثر زمان محلول پاشی بر تمامی صفات غیرمعنی دار بود. اثر برهم کنش تیمار رقم $\times$ محلول پاشی نسبت به غلظت آهن و روی دانه اختلاف معنی دار نشان داد و بر سایر صفات اثر معنی داری نداشت. همچنین اثرات برهم کنش تیمار رقم $\times$ زمان محلول پاشی بر عملکرد دانه معنی دار و بر سایر صفات غیرمعنی دار بود. اثر برهم کنش تیمار محلول پاشی $\times$ زمان محلول پاشی بر صفات مورد مطالعه غیرمعنی دار بود. همچنین اثرات برهم کنش رقم $\times$ محلول پاشی $\times$ زمان محلول پاشی بر صفات تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۳).

عملکرد دانه

نتایج جدول مقایسه میانگین تیمارها (جدول ۴) نشان داد که بیشترین میزان عملکرد مربوط به رقم پایا با میانگین ۶۷۵ کیلوگرم در هکتار با شاخص برداشت ۲۹/۵۳ درصد حاصل شد، در حالی که عملکرد رقم آسمان ۶۱۶ کیلوگرم در هکتار با شاخص برداشت ۲۳/۸۳ درصد به دست آمد. مقایسه میانگین اثر رقم $\times$ زمان محلول پاشی نیز بر عملکرد تأثیرگذار بود و بهترین عملکرد در رقم پایا با محلول پاشی در مرحله ساقه دهی با میانگین عملکرد ۷۲۹ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد (جدول ۵). کشاورز افشار و همکاران (Keshavarzafshar et al., 2020) در آزمایش خود بیان کردند که کاربرد روی باعث افزایش اندک عملکرد دانه شد که با این حال، این افزایش عملکرد برای جبران هزینه‌های تولید اضافی مرتبط با مصرف روی کافی نبود. در شرایط اعمال مدیریت زراعی در مناطق دیم، انتخاب رقم مناسب برای منطقه و تغذیه مطلوب به شرایط محیطی به ویژه بارندگی بستگی دارد. با توجه به خشکسالی ایجاد شده در سال زراعی اجرای آزمایش، آب به عنوان عامل محدودکننده، مانع افزایش معنی داری بین عملکرد دانه تیمارهای محلول پاشی با شاهد شد (جدول ۶). اصولاً تغذیه گندم در دیم‌زارها نسبت به اراضی آبی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است، زیرا که در چنین شرایطی، مدیریت عناصر غذایی باید براساس رژیم رطوبتی مورد انتظار در منطقه باشد، استفاده از آزمون خاک و توجه به حد بحرانی عناصر کم مصرف در خاک‌های زراعی گندم دیم، مقدار کود مورد نیاز برای دستیابی به عملکرد بهینه تنظیم شود، زیرا با کاهش بارندگی و دمای خاک، حد بحرانی عناصر غذایی در خاک (محدودیت جذب عناصر غذایی) افزایش می‌یابد و این شرایط مطابق با جدول ۲ و ۵، میزان آهن و روی (۰/۹۷ و ۰/۶۸) خاک نیاز به توجه و محاسبه حد بحرانی این عناصر است که احتمالاً میزان روی بیشتر از حد بحرانی می‌باشد.

یک هفته پس از اعمال کلیه تیمارها، نمونه برداری در سوم اردیبهشت، ۱۳۳ روز بعد از کاشت انجام شد و کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید به روش آرنون اندازه گیری شد. مقادیر کلروفیل به میلی گرم بر گرم وزن تر برگ تبدیل شد و غلظت کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها با استفاده از فرمول‌های رابطه (۱) محاسبه شد (Arnon, 1967; Bagheri, Sinki, Firouzabadi Brothers, & Esfahalani, 2013).

(۱)

$$\text{Chl a} = (12/7A663 - 2/69A645) \times V/W$$

$$\text{Chl b} = (22/9A645 - 4/68A663) \times V/W$$

$$\text{Chl. total} = (20/2(A645) + 8/02(A663)) \times V/W$$

$$C(x+c) = (7/6A480 - 1/49(A510)) \times V/W$$
 که در آن، Chl.a، Chl.b، Chl.total و $C(x+c)$ به ترتیب کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها، V: حجم نهایی استن مصرفی برحسب میلی لیتر و W: وزن بافت تر است.

برای اندازه گیری میزان پروتئین دانه با روش کج‌لدال، مقدار نیتروژن دانه را در زمان برداشت ۳۱ اردیبهشت ماه ۱۴۱ روز بعد از کاشت بذر برای هر تیمار حساب کرده و با روش تیتراسیون، از رابطه (۲) درصد نیتروژن، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین نمونه مورد نظر حساب شد (Helrich, 1990).

(۲)

$$100 \times \frac{\text{عدد حاصل از تیتراسیون} \times 0.0014}{\text{وزن نمونه (گرم)}} = \text{درصد نیتروژن}$$

$$5/83 \times \text{میزان نیتروژن} = \text{درصد پروتئین}$$
 درصد پروتئین $\times$ عملکرد دانه = عملکرد پروتئین دانه
 برای اندازه گیری روی و آهن در دانه، ابتدا یک گرم از نمونه‌های بذور که از هر کرت آسیاب و وزن شد و در درون بوته چینی با حرارت ۵۵۰ درجه سانتی گراد برای چهار ساعت در کوره الکتریکی قرار گرفت و خاکستر به دست آمده برای هر نمونه در اسید کلریدریک دو مولار حل شده و در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد روی هیتر قرار گرفت. پس از خارج شدن اولین بخار، محلول به دست آمده صاف شد و به وسیله آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسید و بعد از آن مقدار روی و آهن در محلول‌های به دست آمده به وسیله دستگاه جذب اتمی خوانده شد (Malkuti, & Homai, 2013; Melash, Mengistua, Aberraa, & Alemtsehay, 2019)
 پس از اطمینان از یکنواختی واریانس اشتباهات آزمایشی، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام و مقایسات میانگین در صورت معنی دار بودن مقادیر F با آزمون LSD و در سطح احتمال خطای پنج درصد ($P \leq 0.05$) انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر رقم بر عملکرد دانه و شاخص برداشت، کلروفیل b، کلروفیل کل، کاروتنوئیدها و تعداد

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در شرایط محلول پاشی ارقام گندم دیم در زمان‌های مختلف
Table 3- Results of analysis of variance foliar application of Zinc and iron at different developmental stages on the quantitative and qualitative characteristics of two cultivars of dryland wheat

منابع تغییر	df	Grain yield	Harvest index	تعداد سنبلیچه	پروتئین دانه	Grain Fe	Grain Zn	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Chlorophyll total	کلروفیل کل	کاروتنوئیدها
S.O.V												
تکرار	2	55134.57**	46.99ns	0.69ns	0.123ns	92.99ns	5.91ns	0.0085ns	0.0007ns	0.014ns	9.73ns	
ارقام	1	47348.17**	438.61**	9.37*	0.036ns	134.39ns	0.78ns	0.01ns	0.0053*	0.031*	29.83*	
محلول پاشی	2	4127.46ns	3.127ns	0.36ns	0.699ns	27343.5**	428.41**	0.0045ns	0.0028ns	0.014ns	8.08ns	
زمان محلول پاشی	2	6101.79ns	54.56ns	1.2ns	0.171ns	546.1ns	3.99ns	.0004ns	0.0003ns	0.001ns	1.17ns	
زمان محلول پاشی × رقم	2	7614.39ns	57.21ns	1.26ns	0.422ns	1521.84*	9.65*	0.0009ns	0.0012ns	0.003ns	1.7ns	
محلول پاشی × زمان محلول پاشی	2	41952.39**	122.58ns	2.62ns	1.296ns	294.23ns	2.33ns	0.0005ns	0.0002ns	0.0005ns	1.85ns	
محلول پاشی × زمان محلول پاشی × رقم	4	5293.3ns	16.6ns	1.46ns	0.68ns	186.65ns	0.97ns	0.0011ns	0.0007ns	0.0024ns	1.52ns	
رقم × محلول پاشی × زمان محلول پاشی	4	12214.1ns	34.12ns	0.26ns	1.652ns	250.24ns	2.38ns	0.0023ns	0.0008ns	0.056ns	4.12ns	
خطا	34	6308.04	54.06	2.007	0.723	400.91	3.07	0.0031	0.001	0.0073	7.011	
Error												
ضریب تغییرات		12.3	27.5	12.6	4.9	18.5	9.1	24.0	25.2	25.9	25.6	
Cv (%)												

*, ** و ns: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم تفاوت معنی داری.
*, ** and ns: are significant at the 5 and 1 percent of probability levels and non-significant, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین تیمارهای مورد مطالعه بر برخی ویژگی‌های کمی و کیفی گندم
 Table 4- Mean comparison of Fe and Zn Foliar application effects at different developmental stages on the quantitative and qualitative characteristics of two cultivars of dryland wheat

تیمار Treatment	عملکرد Grain yield (kg ha ⁻¹)	شاخص برداشت HI (%)	تعداد سنبلیچه Number of spikes	پروتئین دانه Grain protein (%)	آهن دانه Grain Fe (ppm)	روی دانه Grain Zn (ppm)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g FW ⁻¹)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg g FW ⁻¹)	کلروفیل کل Chlorophyll total (mg g FW ⁻¹)	کاروتنوئیدها Carotenoid
ارقام Cultivars										
آسمان Aseman	616.3b*	23.837b	10.81 b	17.26a	109.51 a	19.14 a	0.25 a	0.107 a	0.35 a	11.07 a
پایا Paya	675.52 a	29.537a	11.64 a	17.31a	106.36 a	19.38 a	0.22 a	0.087 b	0.30 b	9.59 b
محلول پاشی Foliar application										
شاهد Control	629 a	26.67 a	11.39 a	17.08a	75.51 c	16 b	0.22 a	0.091 ab	0.31 a	9.8 a
محلول پاشی آهن Fe foliar application	650.5 a	27.11 a	11.11 a	17.47a	151.18 a	16.89 b	0.25 a	0.11 a	0.36 a	11.08 a
محلول پاشی روی Zn foliar application	658.22 a	26.28 a	11.19 a	17.31a	97.12 b	24.88 a	0.22 a	0.087 b	0.31 a	10.1 a
زمان محلول پاشی Foliar time										
پنج‌ه‌زری Tillering	665.06 a	28.69 a	11.11 a	17.37a	102.15 a	19.01 a	0.237 a	0.101 a	0.339 a	10.56 a
ساقه‌دهی Shoot elongation	644.33 a	25.77 a	11.52 a	17.18 a	108.54 a	19.81 a	0.238 a	0.097 a	0.335 a	10.42 a
پر شدن دانه Grain filling	628.33 a	25.58 a	11.05 a	17.31a	113.12 a	18.98 a	0.228 a	0.092 a	0.321 a	10.04 a

* Means with common letters do not show significant differences at the 5% level of the LSD test.

* میانگین‌ها در هر ستون و برای هر عامل که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند براساس LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل رقم در زمان محلول پاشی بر عملکرد دانه

Table 5- The results of comparison of the average interaction effects of cultivars at the time of foliar application on grain yield

رقم	زمان محلول پاشی	عملکرد دانه
Cultivar	Time foliar application	Grain yield (kg ha ⁻¹)
Aseman آسمان	Tillering پنجه زنی	658.6 b*
Aseman آسمان	Shoot elongation ساقه‌دهی	559.2 d
Aseman آسمان	Grain filling پرشدن دانه	631 c
Paya پایا	Tillering پنجه زنی	671.4 b
Paya پایا	Shoot elongation ساقه‌دهی	729.4 a
Paya پایا	Grain filling پرشدن دانه	625.6 c

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح پنج درصد آزمون LSD تفاوت معنی‌داری نشان نمی‌دهد.

*Means with common letters do not show significant differences at the 5% level of the LSD test.

جدول ۶- آمار هواشناسی کوتاه مدت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک گندکاووس ۱۴۰۱-۱۴۰۲

Table 6- Short-term meteorological statistics of Gonbad Kavous synoptic meteorological station 2022-2023

[illegible]

گفته کوچیان (Kochian, 1991)، آهن دارای تحرک آبکش متوسط بوده است و به نظر کشاورز افشار و همکاران (Keshavarzafshar et al., 2020)، کاربرد دو بار استفاده از روی برای تولید دانه‌های با غلظت روی بالاتر از سطح هدف ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ضروری است. نتایج آزمایشی دوساله نشان داد که محلول پاشی روی باعث افزایش غلظت روی و غلظت آهن در دانه‌ها به ترتیب ۹۹ و ۸ درصد شد. محلول پاشی آهن باعث افزایش ۲۱ درصدی غلظت آهن و ۱۳ درصدی افزایش غلظت روی در دانه شد (Pahlavan Rad, & Pessarakli, 2009). نتایج حاصل از این تحقیق، نشان از عدم تأثیر مصرف کود آهن و روی در مراحل مختلف رشد و ارقام مختلف بر میزان پروتئین دانه داشته است. در این رابطه به کاربرد تقسیمی نیتروژن به صورت ترکیب با خاک همراه محلول پاشی روی و آهن، می‌توان اشاره کرد که به علت خشکسالی و عدم جذب مناسب اوره و کاهش نیتروژن، محلول پاشی آهن و روی بر محتوای پروتئین دانه گندم مؤثر نشد (جدول ۴).

صفات فیزیولوژیکی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ارقام بر محتوای کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها معنی‌دار بود (جدول ۳). با مقایسه میانگین تیمار ارقام مشخص شد که میزان کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها در رقم پایا نسبت به رقم آسمان بالاتر است، اما سایر تیمارها بر صفات کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها غیرمعنی‌دار شد (جدول ۴). غریب عشقی و همکاران (Gharib Eshghi, Adelzadeh, Shiri, & Shahbazi, 2009) طی آزمایشی بر ژنوتیپ‌های گندم نشان دادند که ژنوتیپ‌های متحمل تر به شرایط تنش در گندم، غشاهای سیتوپلاسمی پایدارتر و غلظت کلروفیل بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های حساس‌تر داشتند. طبق بررسی محققان، کاربرد آهن باعث افزایش فعالیت تمام آنزیم‌های برگ و کلروفیل برگ، پروتئین دانه، محتوای آهن، کربوهیدرات دانه و عملکرد دانه می‌شود (Ghafari, & Razmjoo, 2015). آرزمجو و همکاران (Arzamjo et al., 2016) طی مطالعه واکنش چند رقم گندم نان به محلول پاشی فرم‌های مختلف روی و آهن در دو منطقه با خاک متفاوت به این نتیجه رسیدند که محلول پاشی روی و آهن منجر به بهبود خصوصیات رشدی و عملکرد دانه شد و محلول پاشی سولفات روی و آهن در هر دو منطقه با pH و شوری بالا، نتیجه بهتری در مقایسه با فرم کلات روی و آهن دارد. در نهایت، کشت ارقام جدید و محلول پاشی فرم‌های سولفات روی و آهن برای تولید گندم توصیه گردید.

در این رابطه، بالالی و همکاران (Bilali et al., 2000) بیان کردند که محدوده حد بحرانی آهن در کشور از دو تا هشت میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است و فیضی اصل (Faizi Asl, 2009) نیز حد بحرانی ۰/۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم را به عنوان حد بحرانی روی در خاک برای گندم دیم رقم سرداری در شمال غرب کشور اعلام کرد.

خصوصیات کیفی

مقایسه میانگین اثر ساده تیمارها روی برخی از خصوصیات کیفی دانه گندم شامل پروتئین، غلظت آهن و روی دانه در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج مقایسه میانگین تیمار محلول پاشی بر درصد آهن و روی دانه نشان داد که بالاترین میزان آهن دانه ۱۵۱ پی‌پی‌ام نسبت به شاهد ۷۵/۵۱ پی‌پی‌ام با محلول پاشی آهن مشاهده شد و بیشترین میزان روی دانه ۲۴/۸۸ پی‌پی‌ام نسبت به شاهد ۱۶ پی‌پی‌ام با محلول پاشی تیمار روی به دست آمد. طبق گزارش شریعتی‌پور و همکاران (Shariatipour et al., 2020)، کاربرد روی به صورت محلول پاشی باعث افزایش عملکرد و غلظت روی دانه گندم شد.

مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای رقم $\times$ محلول پاشی بر غلظت آهن دانه (جدول ۷) نشان داد که بیشترین میانگین غلظت آهن دانه ۱۵۴ پی‌پی‌ام با کاربرد آهن شش در هزار در رقم آسمان حاصل شد و بیشترین میانگین غلظت روی دانه با کاربرد روی چهار در هزار به ترتیب ۲۵/۷۳ پی‌پی‌ام در رقم پایا و ۲۴/۰۲ پی‌پی‌ام در رقم آسمان بود. محلول پاشی روی و آهن باعث افزایش غلظت و جذب این عناصر غذایی در دانه شد، به طوری که محلول پاشی روی موجب افزایش ۵۵ درصدی غلظت روی دانه و محلول پاشی آهن ۱۰۰ درصد، غلظت آهن دانه را افزایش داد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که محلول پاشی روی، مقدار آهن دانه را نیز افزایش داده است، ولی با کاربرد محلول پاشی آهن، مقدار روی دانه تغییر معنی‌داری نداشت. در واقع، روی بر آهن اثر سینرژیست یا هم‌افزایی داشته است که نتایج مشابهی نیز توسط پیرسون و رنگل (Pearson & Rengel, 1994) و کوچیان (Kochian, 1991) گزارش شده است. احتمالاً غلظت این عناصر در بافت‌های گیاهی با محلول پاشی آن‌ها افزایش یافته است. سپس این عناصر در دانه‌ها دوباره توزیع شدند. مقدار هر عنصر غذایی در انتقال مجدد از طریق آوند آبکش تا حد زیادی به تحرک عنصر بستگی دارد (Garnett, & Graham, 2005). پیرسون و رنگل (Pearson & Rengel, 1994)، توزیع و انتقال مجدد روی و منگنز در طول رشد دانه در گندم را بررسی کردند و دریافتند که روی انتقال مجدد خوبی را نشان داد، اما انتقال مجدد منگنز ضعیف بود که بیان کردند روی و منگنز ممکن است از مسیر استفاده‌شده توسط عناصر سفر، پتاسیم و کربوهیدرات‌ها برای ورود به دانه استفاده نکنند. به

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل رقم در محلول پاشی بر روی برخی صفات مورد مطالعه در گندم
Table 7- Mean comparison results of interaction effects of cultivars in Foliar application Zn, Fe

تیمار Treatment		آهن دانه Grain Fe (ppm)	روی دانه Grain Zn (ppm)
رقم Cultivar	محلول پاشی Foliar application		
Aseman آسمان	شاهد Control	67.16 f*	15.91 d
Aseman آسمان	آهن Fe foliar application	154.45 a	17.5 b
Aseman آسمان	روی Zn foliar application	106.92 c	24.02 a
Paya پایا	شاهد control	83.86 e	16.15 c
Paya پایا	آهن Fe foliar application	147.9 b	16.28 c
Paya پایا	روی Zn foliar application	87.32 d	25.73 a

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح پنج درصد آزمون LSD تفاوت معنی‌داری نشان نمی‌دهد.

* Means with common letters do not show significant differences at the 5% level of the LSD test.

نتیجه‌گیری

محلول پاشی روی و آهن به‌عنوان یک روش مدیریتی برای بهبود وضعیت تغذیه‌ای گندم در شرایط دیم، اگرچه منجر به افزایش معنی‌دار غلظت عناصر روی و آهن در دانه به‌میزان ۵۵ و ۱۰۰ درصد شد، اما اثر معنی‌داری بر افزایش عملکرد دانه، شاخص برداشت و پروتئین دانه در شرایط خشکسالی حاکم بر منطقه مطالعه نداشت. این امر نشان می‌دهد که عوامل دیگری مانند تنش آبی، مدیریت زراعی نامناسب و خصوصیات ژنتیکی رقم، نقش تعیین‌کننده‌تری در عملکرد گندم دارند. انتخاب رقم مناسب و سازگار با شرایط محیطی، از جمله عواملی است که می‌تواند به بهبود عملکرد گندم کمک کند. در این تحقیق، رقم پایا با میانگین عملکرد ۶۷۵ کیلوگرم در هکتار، عملکرد بهتری نسبت به رقم آسمان با میانگین عملکرد ۶۱۶ کیلوگرم در هکتار داشت. همچنین، اثر رقم $\times$ زمان محلول پاشی نیز بر عملکرد تأثیرگذار بود و بهترین عملکرد در رقم پایا با محلول پاشی در مرحله ساقه‌دهی با میانگین عملکرد ۷۲۹ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. در

نهایت، به نظر می‌رسد که با استفاده از محلول پاشی روی و آهن می‌توان عملکرد کیفی گندم را در خاک‌هایی که با کمبود روی و آهن مواجه هستند بهبود بخشید، اما این روش به‌زراعی می‌تواند به‌عنوان راهکار کوتاه‌مدت برای کاهش مشکلات تغذیه‌ای ناشی از کمبود این عناصر و بهبود شاخص‌های امنیت غذایی مورد کاربرد قرار گیرد و برای راهکار بلندمدت و افزایش عملکرد با مصرف خاکی روی و آهن برای سال‌های متعدد پیشنهاد شود.

سپاسگزاری

از همکاری معاونت پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه گنبدکاووس به‌جهت تأمین اعتبار پروژه و ریاست محترم ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبدکاووس جهت تأمین بذر ارقام مورد مطالعه و همکاری لازم صمیمانه قدردانی می‌شود.

References

1. Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, 112-121.
2. Arzamjo, A., Behdani, M. A., Sohrabi, M., & Sadeghzadeh, B. (2016). Response of some bread wheat cultivars to foliar application of Zn and Fe different forms in two locations with different soil properties. *Iranian Agricultural Research Journal*, 16(1), 203-216. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i1.61570>.
3. Azam Shah, S., Mohammad, W., Shahzadi, S., Elahi, R., Al, A., Basir, A., & Haroon, A. (2016). The effect of foliar application of urea, humic acid and micronutrients on potato crop. *Iran Agricultural Research*, 35(1), 89-94. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22099/iar.2016.3680>
4. Bagheri, A., Sinki, J. M., Firouzabadi Brothers, M., & Esfahalani, M. A. (2013). The effect of salicylic acid foliar spraying on the amount of pigments and chlorophyll fluorescence of sesame cultivars under the condition of interruption of irrigation. *Journal of Crop Ecophysiology*, 7(3), 327-340.
5. Bilali, M. R., Malkuti, M. J., Mashayikhi, H., & Khademi, Z. (2000). The effect of micronutrient elements on

- increasing yield and determining their critical limit in Iranian water wheat cultivated soils. *Journal of Soil Research*, 12(6) (special paper on wheat).
6. Broadleyet, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). *Functions of Nutrient: Micronutrients*. P Marschner (Ed.). Marschner's mineral nutritionof higher plants, 3rd Ed. Elsevier, Oxford, pp. 243–248.
7. Cakmak, I., Pfeiffer, & McClafferty, W. H., (2010). Biofortification of durum wheat with zinc and iron. *Cereal Chemistry*, 87, 10–20. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-87-1-0010>
8. Dimkpa, O., & Bindraban, S. (2017). Fortification of micronutrients for efficient agronomic production. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(7), 5–33. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0346-6>
9. Faizi Asl, V. (2009). Comparison of different methods of determining the critical limit of zinc in soils under dry wheat cultivation. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 22(2). (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i22.1011>
10. Faizi Asl, V., Valizadeh, G. R., Toshih, V., Taliei, A. A., & Belson, V. (2004). Determining the critical limit of low consumption elements in rainfed wheat soils in northwest Iran. *Journal of Agricultural Sciences of Iran*, 5(4), 236-247. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377878.669731>
11. Ganji, K., Khorgami, A., & Rafiei, M., (2013). *The effect of foliar application of zinc, iron and boron on the yield and yield components of three varieties of rainfed wheat (Kohdasht, Karim and Zagros) in Kohdasht region*. The First National Conference on Agriculture and Sustainable Natural Resources Tehran, Iran.
12. Garnett, T. P., & Graham, R. D. (2005). Distribution and remobilization of iron and copper in wheat. *Annals of Botany*, 95, 817–826. <https://doi.org/10.1093/aob/mci085>
13. Ghafari, H., & Razmjoo, J. (2015). Response of durum wheat to foliar application of varied sources and rates of iron fertilizers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17, 321-331. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2015.17.2.21.4>
14. Gharib Eshghi, A., Adelzadeh, R., Shiri, M. R., & Shahbazi, K. (2009). The effect of winter cold on cytoplasmic membrane stability, chlorophyll content and crown depth in a number of spring and winter wheat genotypes in Ardabil region. *Crop Production Magazine*, 3(2), 255-262.
15. Ghasemian, V., Ghalavand, A., Sorooshzadeh, A., & Pirzad, A. (2010). The effect of iron, zinc and manganese on quality and quantity of soybean seed. *Journal of Phytology*, 2, 73-79.
16. Helrich, K. (1990). Association of official analytical chemists. 15th Edition. Volume 1. AOAC, Incorporated. Pp. 673.
17. <https://www.FAO.org>. (2023). The State of Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
18. Iran Statistics Center. (2017). Summary of the results of the agriculture statistics plan.
19. Jafarnejhadi, A. R., MeskiniVishkaee, F., MousaviFazl, M. H., LotfaliAyeneh, Gh., & Behbahani, L. (2022). Evaluating the effect of iron and zinc micronutrient on wheat quantitative and qualitative yield under salinity stress in Khuzestan climate. *Agricultural Engineering (Agricultural Scientific Journal)*, 44(4) 367-379. <https://doi.org/10.22055/agen.2022.39694.1625>
20. Kamai, H., & Isvand, H. R. (2019). The effect of iron, zinc and manganese solution spraying on physiological, agronomic and protein traits of wheat under end-of-season heat stress. *Environmental Tensions in Agricultural Sciences*, 13(1), 285-295. <https://doi.org/10.22077/escs.2019.1888.1452>
21. Keshavarzafshar, R., Chen, Ch., Zhou, Sh., Etemadi, F., He, H., & Li, Zh. (2020). Agronomic and economic response of bread wheat to foliar zinc application. *Agronomy Journal*, 112(5), 4045-4056. <https://doi.org/10.1002/agj2.20247>
22. Kochian, L. V. (1991). Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants. In *Micronutrients in Agriculture*, J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. M. Shuman, & R. M. Welch (Eds.). pp. 229–296. Madison, Wisc.: Soil Science Society of America.
23. Malkuti, M. J., & Homai, M. (2013). Fertility of soils in arid and semi-arid regions. Publications of TarbiatModares University, Tehran, Iran. Second Edition, 488 pp.
24. Marschner, H., (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2nd Ed. Academic Press, New York.
25. Melash, A. A., Mengistua, D. K., Aberraa, D. A., & Alemtsehay, T. (2019). The influence of seeding rate and micronutrients foliar application on grain yield and quality traits and micronutrients of durum wheat. *Journal of Cereal Science*, 85, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.005>
26. Ozturk, L., Yazici, M. A., Yucel, C., Torun, A., Cekic, C., Bagci, A., Ozkan, H., Braun, H. J., Sayers, Z., & Cakmak, I. (2006). Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiologia. Plantarum*, 128, 144-152. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00737.x>
27. Pahlavan Rad, M. R., & Pessarakli, M. (2009). Response of wheat plants to zinc, iron, and manganese applications and uptake and concentration of zinc, iron, and manganese in wheat grains. *Soil Science and Plant Analysis*, 40, 7-8.
28. Pearson, J. N., & Rengel, Z. (1994). Distribution and remobilization of Zn and Mn during grain development in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 45, 1829–1835. <https://doi.org/10.1093/jxb/45.12.1829>

29. Rehman, A., Farooq, M., Ozturk, L., Asif, M., & Siddique, K. H. M. (2018). Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. *Plant Soil*, 422, 283–315. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3507-3>
30. Selim, R., Adhikary, S., AlamMondal, M., AlamNadim, K., & Akter, B. (2023). Foliar application of different levels of zinc and boron on the growth and yield of mungbean. *Turkish Journal of Agriculture–Food Science and Technology*, 11(8), 1415-1421. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v11i8.1415-1421.6107>.
31. Shariatipour, N., Alavikia, S., Moghaddam, M., Velu, G., & Heidari, B. (2020). Foliar applied zinc increases yield, zinc concentration and germination in wheat genotypes. *Agronomy Journal*, 112(2), 961-974. <https://doi.org/10.1002/agj2.20117>
32. Shehata, S. M., Abdel-Azem, H. S., Abou El-Yazied, A., & El-Gizawy, A. M. (2010). Interactive effect of mineral nitrogen and biofertilization on the growth, chemical composition and yield of Celeriac plant. *European Journal of Scientific Research*, 47, 248–255.
33. Singh, B. R., Timsina, Y. N., Lind, O. C., Cagno, S., & Janssens, K. (2018). Zinc and iron concentration as affected by nitrogen fertilization and their localization in wheat grain. *Frontiers in Plant Science*, 9, 307. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00307>
34. Yeganehpour, F., Kehrarian, B., Biginia, V., Moinirad, A., & Hosni Asl, N. (2012). The effect of iron application on some morphological and qualitative traits of dry wheat. *Journal of Agricultural Sciences*, 5(19), 125-135.
35. Zhang, P. P., Chen, Yu. lu., Wang Ch. Y., MA, G., Lu, J. J., Liu J. B., & Guo, T. C. (2021). Distribution and accumulation of zinc and nitrogen in wheat grain pearling fractions in response to foliar zinc and soil nitrogen applications. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(12), 3277–3288. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63491-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63491-8)



24-Epibrassinolid and Cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) Extract Effect on Grain Yield and Some Morphophysiological Characteristics of the Sensitive and Tolerant Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Cultivars

R. Sohrabi¹, A. Pirzad¹, M. Niazkhani^{2*}, T. MirMahmoodi³

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

2- Department of Microbiology and Medical Engineering, Faculty of Agriculture, Afagh Higher Education Institute, Urmia, Iran

3- Department of Agronomy and Plant Breeding, Islamic Azad University Mahabad Branch, Mahabad, Iran

(*- Corresponding author's Email: SM.Niazkhani@urmia.ac.ir)

How to cite this article:

Sohrabi, R., Pirzad, A., Niazkhani, M., & MirMahmoodi, T. (2025). 24-Epibrassinolid and Cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) Extract Effect on Grain Yield and Some Morphophysiological characteristics of the Sensitive and Tolerant Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 201-225. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88847.1339>

Received: 07 July 2024

Revised: 11 September 2024

Accepted: 15 September 2024

Available Online: 11 March 2025

Introduction

Recent alterations in climate patterns have resulted in a reduction of precipitation. This shift not only contributes to drought conditions but also increases the salinity levels of both water and soil utilized for agricultural purposes. To mitigate the impact of this phenomenon on food security, it is essential to consider strategies that involve the utilization of alternative plants and compounds, such as Brassinosteroids (BRs), which can enhance the resilience of plant products to salinity stress. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a plant with high production potential, which can be used as a good candidate to replace salt-sensitive cereal due to its richness in nutrients needed by humans and livestock. Due to the consecutive droughts in the Iran and as a result the lack of water resources and then the salinity of water and soil resources, the production of some traditional agricultural and horticultural plants has faced many limitations. This has caused a decrease in the quantity and quality of agricultural products in these regions. In the meantime, the drying up of Lake Urmia, which was considered the largest salt lake in the world, has faced additional tension in West Azerbaijan province. For this reason, the introduction of planting pattern of new plants with high yield potential, which have good agricultural performance in dry and salty conditions, and the production product, is of high quality is on the agenda.

Materials and Methods

In order to investigate the effect of 24-epibrassinolide and cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) extract on some biochemical characteristics and related to the forage quality of Quinoa cultivars at salinity levels, a factorial experiment in the form of a completely randomized design (CRD) with four replications in the greenhouse of the Faculty of Agriculture of Azad University of Mahabad in the spring and summer of the year 1401 was done. The investigated factors included the tolerant (Titikaka) and semi-sensitive (Sajma) Quinoa cultivars to salinity, the use of stress-modulating substances (at three levels, without application, application of 24-epibrassinolide and application of cauliflower extract), and the salinity levels (2 levels, without salinity and 15 dS m⁻¹) of irrigation water. After sampling, morphological, biochemical and fodder quality characteristics were measured.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

 <https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88847.1339>

Results and Discussion

The results showed that spraying with 24-epibrassinolide and cauliflower extract increased total chlorophyll, carotenoid, relative content of leaf water, proline, phenol, soluble carbohydrates, and forage quality characteristics (digestible dry matter, crude protein, ash, water-soluble carbohydrates), and decreased hydrogen peroxide (H_2O_2) and negative attributes associated with forage quality (insoluble fibers in acid detergent, insoluble fiber in neutral detergent and fiber). The use of two anti-stress solutions, especially 24-epibrassinolide, significantly improved oxidative damage caused by salinity stress by reducing hydrogen peroxide and increasing the activity of non-enzymatic antioxidants.

Conclusion

In this study, morphological characteristics (root length, plant height and dry weights of roots, shoots and seeds), total chlorophyll, carotenoid, relative content of leaf water and digestible dry matter of forage decreased under salt stress. While the amount of proline, phenol, soluble carbohydrates, hydrogen peroxide and characteristics related to forage quality (crude protein, insoluble fibers in acidic detergent, insoluble fibers in neutral detergent, percentage of ash, water-soluble carbohydrates and crude fiber) increased. Foliar application of 24-epibrassinolide and cauliflower extract enhanced morphological traits, total chlorophyll, carotenoids, relative leaf water content, proline, phenols, and leaf soluble carbohydrates. It also improved forage quality by increasing the percentage of digestible dry matter, crude protein, ash content, and water-soluble carbohydrates, while reducing hydrogen peroxide levels and undesirable forage quality traits such as acid detergent fiber (ADF), neutral detergent fiber (NDF), and overall fiber content. According to the results, the use of two anti-stress solutions, especially 24-epibrassinolide, significantly improved the oxidative damage caused by salt stress by reducing hydrogen peroxide and increasing the activity of non-enzymatic antioxidants. Titikaka was more resistant to the negative effects of salinity stress on morphological and biochemical characteristics than Sajma, and Sajma under foliar spraying of cauliflower extract and Titikaka under foliar spraying of 24-epibrassinolide showed a better response to saline conditions. Therefore, in order to improve the growth and quality of fodder and reduce the negative effects of salinity stress, foliar spraying with 24-epibrassinolide and cauliflower extract can be recommended in both Titikaka and Sajma cultivars.

Keywords: Carotenoide, Fiber, Hydrogen peroxide, Phenol, Plant height, Proline, Salinity

تأثیر ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) بر عملکرد دانه و برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی ارقام حساس و متحمل به شوری کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.)

روژین سهرابی^۱، علیرضا پیرزاد^۱، محسن نیازخانی^{۲*}، تورج میرمحمودی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

چکیده

تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر، کاهش بارش را به دنبال داشته است. این پدیده علاوه بر تحمیل خشکی، موجب شوری آب و خاک مورد استفاده برای کشاورزی شده است. برای به حداقل رساندن اثرات این پدیده بر امنیت غذایی، لازم است از هم‌اکنون تمهیداتی در خصوص استفاده از گیاهان جایگزین و موادی مانند براسینواستروئیدها که تنش شوری را برای محصولات گیاهی قابل تحمل می‌کنند، اندیشیده شود. کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) گیاهی است با پتانسیل تولید بالا که با توجه به غنی بودن آن از مواد مغذی مورد نیاز انسان و دام، می‌تواند به‌عنوان نماینده مناسبی جهت جایگزینی غلات حساس به تنش شوری مورد استفاده قرار گیرد. به‌منظور بررسی تأثیر ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم (*Brassica oleracea* var. *botrytis*)، روی برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و مرتبط با کیفیت علوفه ارقام کینوا در سطوح شوری، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد مه‌آباد در بهار و تابستان سال ۱۴۰۱ انجام شد. تیمارهای مورد بررسی شامل ارقام متحمل (تی‌تی‌کاکا) و نیمه‌حساس (ساجما) به شوری کینوا، کاربرد مواد تعدیل‌کننده تنش در سه سطح (بدون کاربرد، کاربرد ۲۴-اپی براسینولید و کاربرد عصاره گل کلم) و سطوح شوری آب آبیاری (بدون شوری و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. بعد از نمونه‌گیری، ویژگی‌های ریخت‌شناختی، بیوشیمیایی و ویژگی‌های مربوط به کیفیت علوفه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که محلول پاشی ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم باعث افزایش کلروفیل کل، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب برگ، پرولین، فنل و کربوهیدرات‌های محلول و افزایش ویژگی‌های کیفی علوفه (درصد ماده خشک قابل هضم، پروتئین خام، درصد خاکستر و کربوهیدرات‌های محلول در آب) و کاهش پراکسید هیدروژن و ویژگی‌های منفی مرتبط با کیفیت علوفه (الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و الیاف نامحلول در شوینده خنثی و فیبرخام) شدند. استفاده از دو محلول ضدتنش به‌خصوص ۲۴-اپی براسینولید به‌طور قابل توجهی آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش شوری را با کاهش پراکسید هیدروژن و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی بهبود بخشید. از این‌رو به‌منظور بهبود رشد و کیفیت علوفه و کاهش اثرات منفی تنش شوری، محلول پاشی توسط ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم در هر دو رقم تی‌تی‌کاکا و ساجما می‌تواند مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع بوته، پراکسید هیدروژن، پرولین، شوری، فنل، فیبر، کاروتنوئید

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

۲- گروه میکروبیولوژی و مهندسی پزشکی، دانشکده کشاورزی، مؤسسه آموزش عالی آفاق ارومیه، ارومیه، ایران

۳- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مه‌آباد، مه‌آباد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: SM.Niazkhani@urmia.ac.ir (Email: SM.Niazkhani@urmia.ac.ir)

مقدمه

باتوجه به خشکسالی‌های پی‌درپی در کشور و به‌تبع آن کمبود منابع آبی و به‌دنبال آن شوری منابع آب‌و خاک، تولید برخی از گیاهان زراعی و باغی مرسوم با محدودیت‌های زیادی مواجه شده و این موضوع موجب کاهش کمی و کیفی محصولات کشاورزی در این مناطق گردیده است. در این بین، خشک شدن دریاچه ارومیه که بزرگ‌ترین دریاچه نمکی جهان به شمار می‌رفت، استان‌های آذربایجان غربی و شرقی را با تنش مضاعفی مواجه کرده است. شوری خاک یک تنش غیرزیستی مهم و تأثیرگذار برای کشاورزی مدرن در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که به‌شدت جوانه‌زنی بذر، رشد و نمو گیاه و در نهایت بهره‌وری محصولات کشاورزی را شدیداً تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Julkowska et al., 2017). پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که در پی گرم شدن کره زمین و بهره‌برداری غیرمنطقی از زمین‌های کشاورزی، شور شدن خاک تسریع شده که این امر منجر به از دست رفتن نیمی از زمین‌های قابل کشت تا سال ۲۰۵۰ شود (Albaladejo et al., 2018). به همین جهت، معرفی الگوی کاشت گیاهان جدید و با پتانسیل عملکرد بالا که هم از نظر زراعی در شرایط خشک و شور عملکرد مناسبی داشته باشند و هم محصول تولیدی، از کیفیت بالایی برخوردار باشد در دستور کار قرار گرفته است. گونه گیاهی در کنار دمای محیط، رطوبت نسبی، مرحله رشد گیاه، آلودگی هوا و ترکیب نمک در خاک و آب از جمله مهم‌ترین عواملی است که بر واکنش گیاه در برابر تنش شوری مؤثر می‌باشد (Claussen, 2005).

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) محصولی راهبردی است که برای حفظ امنیت غذایی در مواجهه با تغییرات آب‌وهوایی توصیه شده است (Ruiz et al., 2014). این گیاه با ارزش به‌دلیل تنوع ژنتیکی وسیعی که دارد، نقش مهمی در امنیت غذایی داشته و تنوع و سازگاری فوق‌العاده با طیف وسیعی از شرایط اکولوژیک دارد (Alan, 2011). کینوا به‌دلیل محتوای پروتئین با کیفیت بالا، نماینده امیدوارکننده برای تولید مواد غذایی با پروتئین گیاهی با کیفیت در جهان در نظر گرفته می‌شود (Pulvento et al., 2016). از طرفی، کینوا گیاهی است که علاوه‌بر دانه آن، از برگ گیاهان جوان به‌عنوان سبزی تازه و یا به‌صورت پخته استفاده می‌شود. کل گیاه همچنین به‌عنوان یک منبع غذایی غنی برای تغذیه دام از جمله گاو، خوک و طیور استفاده می‌شود (Bhargava, Shukla, & Ohri, 2006). از آنجاکه کینوا بدون گلوتن و غذایی ارزشمند است، می‌تواند جایگزین برنج شده و به سلامت جامعه کمک کند (Abdellatif, 2018). تمامی این عوامل سبب شده است که توسعه کینوا به‌عنوان یک گیاه مناسب در راستای دستیابی به سیاست‌های جهانی کشاورزی پایدار مورد توجه قرار گیرد، به‌نحوی که طبق آخرین آمار منتشره، در طول

۵۰ سال اخیر، سطح زیرکشت جهانی آن از ۲۹ هزار هکتار در سال ۱۹۷۲ به بیش از ۱۹۳ هزار هکتار و میزان تولید آن از حدود ۱۸ هزار تن به حدود ۱۵۹ هزار تن در سال ۲۰۲۲ رسیده است (FAO, 2024).

در کنار معرفی گیاهان جایگزین مقاوم به شوری، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی یا فیتوهورمون‌ها برای افزایش مقاومت به تنش‌ها، از موضوعاتی است که همیشه از جایگاه ویژه‌ای در بین پژوهشگران برخوردار بوده است. فیتوهورمون‌ها نه‌تنها در رشد گیاه نقش مهمی دارند، بلکه از گیاه در برابر تنش‌های زیست‌محیطی و غیرزنده محافظت می‌کنند. سازوکار آشنایی انتقال سیگنال که توسط هورمون‌های گیاهی ایجاد می‌شود، اهمیت حیاتی در پاسخ به تنش‌های غیرزیستی دارد (Verma, Ravindran, & Kumar, 2016). این هورمون‌ها در دسته‌هایی شامل اکسین، سیتوکینین، جبرلین، اسیدآبسیزیک، اتیلن، اسیدسالیسیلیک، جاسمونات‌ها، استریگولاکتون‌ها و براسینوسترئوئیدها طبقه‌بندی می‌شوند (Zhang, 2006). در میان همه این هورمون‌ها، گروه هورمونی براسینوسترئوئیدها به‌دلیل دخالت آن‌ها در رشد گیاه و سازوکارهای تنش به موضوع مورد علاقه بسیاری از محققان تبدیل شده است. این گروه از هورمون‌های استروئیدی علاوه‌بر عملکرد طبیعی گیاه مانند فتومورفوژن، رشد سلولی، افزایش طول سلولی، صفاتی همچون جوانه‌زنی بذر و تمایز آوندهای چوبی را نیز کنترل می‌کنند (Sasse, 2003). گزارش‌های مختلف، نقش حیاتی براسینوسترئوئیدها را در سیگنال‌های واسطه تنش در گیاهان نشان می‌دهند. طیف وسیعی از تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، گرما، شوری، سرما با کمک براسینوسترئوئیدها تحمل می‌شوند (Kagale, 2007). (Divi, Krochko, Keller & Krishna, 2007).

با عنایت به موارد ذکرشده و با توجه به تغییرات اجتناب‌ناپذیر آب‌وهوایی کشور، که خشکی و شوری آب و خاک، مزارع و باغات را در پی خواهد داشت، انتظار می‌رود که در آینده، تولید و عرضه محصولات کشاورزی به یک چالش عمده تبدیل شده و نه‌تنها امنیت غذایی مردم، بلکه امنیت و استقلال کشور نیز تحت‌تأثیر قرار گیرد. به همین خاطر، در کنار دیگر راه‌کارهای اساسی برای کاهش پیامدهای این پدیده‌ها، لازم است که در مورد شناسایی ارقام متحمل و گیاهان جایگزین و همچنین استفاده از مواد و روش‌های کمکی برای کاهش اثرات سوء تنش‌ها تحقیقات جامعی صورت پذیرد. به‌همین جهت، پژوهش حاضر با اهداف زیر اجرا گردید:

تعیین میزان کاهش عملکرد و صفات مرتبط با عملکرد ارقام کینوا با مقاومت متفاوت به شوری در شرایط شوری، در مقایسه با شرایط غیرشور.

داخل مخلوط کن، خرد و آسیاب شد، تا یک محلول یکنواخت تهیه شد. عصاره تهیه شده بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای اتاق، با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۱، صاف و سپس الکل آن با استفاده از دستگاه تبخیرکننده دوار در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد حذف و تا زمان مصرف، در داخل بطری تیره رنگ در فریزر ۲۰- درجه سانتی گراد نگهداری گردید (Shamon, El-Awadi, Gergis & El-Rorkiek, 2020). محلول های تهیه شده از عصاره گل کلم و ۲۴-آپی براسینولید (Sigma Aldrich، آمریکا)، به ترتیب با دوزهای ۲۰۰ میلی گرم در لیتر و ۰/۱ میلی گرم در لیتر در دو مرحله ۳۰ درصد گل دهی و گل دهی کامل روی تیمارهای مورد مطالعه محلول پاشی شدند (Shamon et al., 2020). جهت تقویت و افزایش ماده آلی خاک، در ماه دوم بعد از کاشت به هر گلدان مقدار شش گرم اسید هیومیک اضافه گردید.

نمونه گیری برای اندازه گیری طول ریشه، وزن های خشک ریشه و شاخساره، محتوای نسبی آب برگ، کربوهیدرات های محلول برگ، کلروفیل کل و کاروتنوئید، پرولین، فنل و پراکسید هیدروژن ۲۰ روز پس از محلول پاشی مرحله اول انجام شد. بعد از رسیدگی کامل دانه، ارتفاع بوته، وزن خشک دانه و ویژگی های مرتبط با کیفیت علوفه اندازه گیری شدند.

محتوای نسبی آب برگ از نمونه برگ سبز به روش تورنر (Turner, 1981) اندازه گیری شد. برای اندازه گیری کربوهیدرات های محلول برگ، نخست ۰/۵ گرم از بافت تازه گیاه به همراه پنج میلی لیتر اتانول ۹۵ درصد در داخل هاون چینی کوبیده شده و بعد از سانتریفیوژ، فاز مایع رویی برداشت شد. در نهایت میزان جذب آن ها در طول موج ۶۲۵ اندازه گیری شد. برای اندازه گیری کلروفیل کل و کاروتنوئید، عصاره گیری با استون ۸۰ درصد انجام و میزان جذب در سه طول موج ۶۴۳/۲، ۶۴۶/۸ و ۴۷۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر (Cecil CE2501) قرائت شد (Arnon, 1949). برای اندازه گیری پرولین از روش بیتس و همکاران (Bates, Waldren, & Teare, 1973) استفاده شد. در این روش، میزان جذب لایه رنگی فوقانی که حاوی تولوئن و پرولین بود در ۵۲۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر تعیین شد. برای اندازه گیری فنل کل، ابتدا ۰/۵ گرم از بافت تر گیاه در داخل هاون چینی با ۱۰ میلی لیتر اتانول ۸۰ درصد کاملاً هموژنیزه شد و جذب توسط اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۶۰ نانومتر قرائت شد. از روی منحنی درجه بندی (اسید گالیک به عنوان استاندارد) مقدار ترکیبات فنولیک کل بر مبنای اسید گالیک بر حسب میلی گرم بر گرم تعیین شد (Tawaha, Alali, Gharaibeh, Mohammad, & El-Elimat, 2007).

بررسی و مقایسه اثر ۲۴-آپی براسینولید و عصاره گل کلم (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) بر تعدیل کاهش عملکرد دانه و کیفیت علوفه ارقام کینوای متحمل و حساس به شوری. مطالعه اثر ۲۴-آپی براسینولید و عصاره گل کلم در تعدیل اثرات منفی شوری بر دیگر صفات ریخت شناختی و بیوشیمیایی مهم در ارقام متفاوت از نظر مقاومت به شوری گیاه کینوا.

مواد و روش ها

پژوهش به صورت گلدانی و به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با چهار تکرار آزمایشی در تاریخ ۱۴۰۱/۰۱/۰۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد واحد مهاباد اجرا شد. دمای روزانه گلخانه 33 ± 3 و دمای شب 14 ± 3 درجه سانتی گراد تنظیم گردید. عوامل آزمایش شامل دو رقم کینوا (تی تی کاکا متحمل به شوری و ساجما نیمه حساس به شوری)، سطوح شوری آب آبیاری در دو سطح (بدون شوری و ۱۵ دسی زیمنس بر متر) و کاربرد مواد تعدیل کننده تنش در سه سطح (بدون کاربرد مواد، کاربرد ۲۴-آپی براسینولید و کاربرد عصاره گل کلم) بود.

خاک مورد استفاده از عمق ۳۰ سانتی متری مزارع اطراف شهرستان مهاباد (روستای دریاز مهاباد) تهیه و سپس با استفاده الک چهار میلی متری غربال و با خاک برگ و شن به نسبت مساوی مخلوط شده و در گلدان های تهیه شده ریخته شد (جدول ۱). به جهت اینکه نمونه برداری در مراحل مختلف رشدی انجام گرفت، برای هر تیمار، پنج گلدان یکسان در نظر گرفته شد.

بذور ارقام مورد استفاده شامل دو رقم تی تی کاکا به عنوان رقم متحمل به شوری و ساجما به عنوان رقم نیمه حساس به شوری (Tavoosi, Anafjeh, & Mahdavi Majd, 2021) از مرکز تحقیقات کشاورزی کرج تهیه و بعد از ضد عفونی طبق دستورالعمل های معمول در گلدان هایی (با قطر ۲۲ سانتی متر دارای زهکش) که قبلاً به این منظور در نظر گرفته شده بودند، کشت شدند. آبیاری تا زمان استقرار کامل گیاه، با استفاده از آب شرب شهری و بعد از آن اعمال تنش شوری صورت گرفت. برای اعمال تنش شوری، بعد از تهیه محلول شور ($EC=15 \text{ ds m}^{-1}$) از منبع سدیم کلرید (MERCK، آلمان)، آبیاری صرفاً با محلول تهیه شده انجام شد، با این توضیح که جهت تعدیل وضعیت تیمارها، بعد از هر سه نوبت آبیاری با محلول تهیه شده، یک بار آبیاری با آب شرب شهری انجام گردید.

برای تهیه محلول عصاره گل کلم، بعد از حذف برگ های گل کلم، قسمت گل آن قطعه قطعه و به همراه الکل اتانول ۸۰ درصد در

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک
Table 1- Physicochemical properties of soil

درصد اشباع Saturation percentage	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	شن Sand (%)	آهک CaO (%)	pH	هدایت الکتریکی Ec (dS m ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon (%)	پتاسیم K (ppm)	فسفر P (ppm)	نیتروژن N (%)
45	45	31	24	28	7.54	0.42	0.81	3495	16.09	0.03

جهت تعیین کیفیت علوفه تولیدی هر تیمار، نمونه هر گلدان بعد از برداشت، به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد در داخل آون خشک، سپس آسیاب و الک گردید. نمونه‌های آماده‌شده، جهت اندازه‌گیری درصد خاکستر^۱، ماده خشک قابل هضم^۲، پروتئین خام^۳ و فیبر خام^۴، کربوهیدرات‌های محلول در آب^۵، الیاف نامحلول در شوینده اسیدی^۶ و الیاف نامحلول در شوینده خنثی^۷ با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک^۸ (AOAC, 1999)، به آزمایشگاه مرجع^۹ ارسال شدند.

بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، نسبت به تجزیه و تحلیل آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS-9.2 اقدام گردید. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج جدول تجزیه واریانس اثر شوری و محلول‌پاشی ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم بر ویژگی‌های ریخت‌شناختی نشان داد که طول ریشه، ارتفاع بوته، وزن خشک شاخساره ($p < 0.05$) و وزن خشک دانه ($p < 0.01$) به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل شوری × رقم × محلول‌پاشی قرار گرفتند. وزن خشک ریشه به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تحت تأثیر اثر متقابل شوری × محلول‌پاشی و شوری × رقم قرار گرفت (جدول ۲).

ویژگی‌های ریخت‌شناختی

طول ریشه و ارتفاع بوته

طول ریشه و ساقه از مناسب‌ترین ویژگی‌هایی هستند که می‌توانند برای ارزیابی تحمل به نمک مورد استفاده قرار گیرند

(Shin, Bhandari, Cho, & Lee, 2020)، زیرا ریشه‌ها مسئول جذب آب و شاخه‌ها برای تأمین آب بافت‌های بالای زمین هستند. براساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × رقم × محلول‌پاشی، با وجود اینکه تنش شوری باعث کاهش طول ریشه هر دو رقم گردید، اما این مقدار کاهش معنی‌دار نبود (شکل ۱-الف).

محلول‌پاشی با ۲۴-اپی براسینولید تأثیر معنی‌داری بر تحمل شرایط تنش شوری بر رقم متحمل تی‌تی‌کاکا نداشت، باین‌حال، طول ریشه رقم حساس ساجما با وجود محلول‌پاشی با ۲۴-اپی براسینولید کاهش معنی‌داری یافت. این موضوع نشان می‌دهد که رقم متحمل تی‌تی‌کاکا بهتر از رقم حساس ساجما به محلول‌پاشی با ۲۴-اپی براسینولید برای افزایش طول ریشه و ارتفاع بوته واکنش نشان می‌دهد. برعکس این وضعیت، محلول‌پاشی با عصاره گل کلم قادر به افزایش قدرت تحمل رقم متحمل در مقایسه با شرایط نرمال نشده و طول ریشه تی‌تی‌کاکا به‌طور غیرمعنی‌داری در شرایط تنش شوری کاهش پیدا کرد. این در حالی بود که محلول‌پاشی با عصاره گل کلم توانست از کاهش معنی‌دار طول ریشه رقم حساس ساجما جلوگیری نماید. مقایسه دو محلول ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم نشان داد که ۲۴-اپی براسینولید بیشتر از عصاره گل کلم در شرایط شوری و نرمال بر مقاومت رقم تی‌تی‌کاکا تأثیر مثبت داشته که این تأثیر در شرایط تنش شوری به‌طور معنی‌داری بیشتر بود.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × رقم × محلول‌پاشی بر ارتفاع بوته نشان داد که محلول‌پاشی باعث افزایش ارتفاع بوته در شرایط شوری شد. در همین شرایط، افزایش ارتفاع در رقم متحمل تی‌تی‌کاکا به‌طور معنی‌داری بیشتر از رقم حساس ساجما بود. این وضعیت نشان داد که رقم متحمل برای افزایش ارتفاع بوته بیشتر از رقم حساس از مواد کمکی تعدیل‌کننده تنش شوری تأثیر می‌پذیرد. مقایسه دو محلول مورد استفاده نشان می‌دهد که در هر دو رقم متحمل و حساس تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشته و برای جلوگیری از کاهش ارتفاع بوته در شرایط شوری، هر دو محلول را می‌توان به‌جای هم به کار برد (شکل ۱-ب).

- 1- Ash
- 2- Digestible dry-matter: DMD
- 3- Crude protein: CP
- 4- Crude Fiber: CF
- 5- Water-soluble carbohydrates: WSC
- 6- Acid detergent Insoluble fiber: ADF
- 7- Neutral detergent fiber: NDF
- 8- Near-InfraRed Spectroscopy: NIRS

۹- آزمایشگاه مرکز تحقیقات سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر شوری و محلول پاشی ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم بر ویژگی‌های ریخت‌شناختی ارقام حساس و متحمل به شوری کینوا

Table 2- Variance analysis results of the effect of salinity and foliar application of 24-epibrasinolide and cauliflower extract on the morphological characteristics of sensitive and tolerant quinoa cultivars to salinity.

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares				
		طول ریشه RLt	ارتفاع بوته PHt	وزن خشک ریشه RDW	وزن خشک شاخساره SDW	وزن خشک دانه GDW
شوری Salinity	1	16.51**	101.62**	6.45**	40.02**	3.43**
رقم Cultivar	1	0.12 ^{ns}	1.64 ^{ns}	0.26**	28.97**	121.7**
محلول پاشی Foliar application	2	35.36**	66.04**	2.15**	13.76**	3.33**
شوری × رقم Salinity × cultivar	1	2.57 ^{ns}	15.06*	0.54**	3.23**	1.47**
شوری × محلول پاشی Foliar application × salinity	2	0.52 ^{ns}	3.47 ^{ns}	0.99**	0.471 ^{ns}	0.317*
رقم × محلول پاشی Cultivar × foliar application	2	3.78 ^{ns}	12.42**	0.06 ^{ns}	2.02**	1.51**
شوری × رقم × محلول پاشی Salinity × cultivar × foliar application	2	7.40*	9.07*	0.009 ^{ns}	0.99*	1.13**
خطای آزمایشی Error	36	1.52	2.085	0.031	0.213	0.087
ضریب تغییرات CV		12.5	4.6	12.9	11.0	16.6

^{ns}, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

^{ns}, * and ** non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively

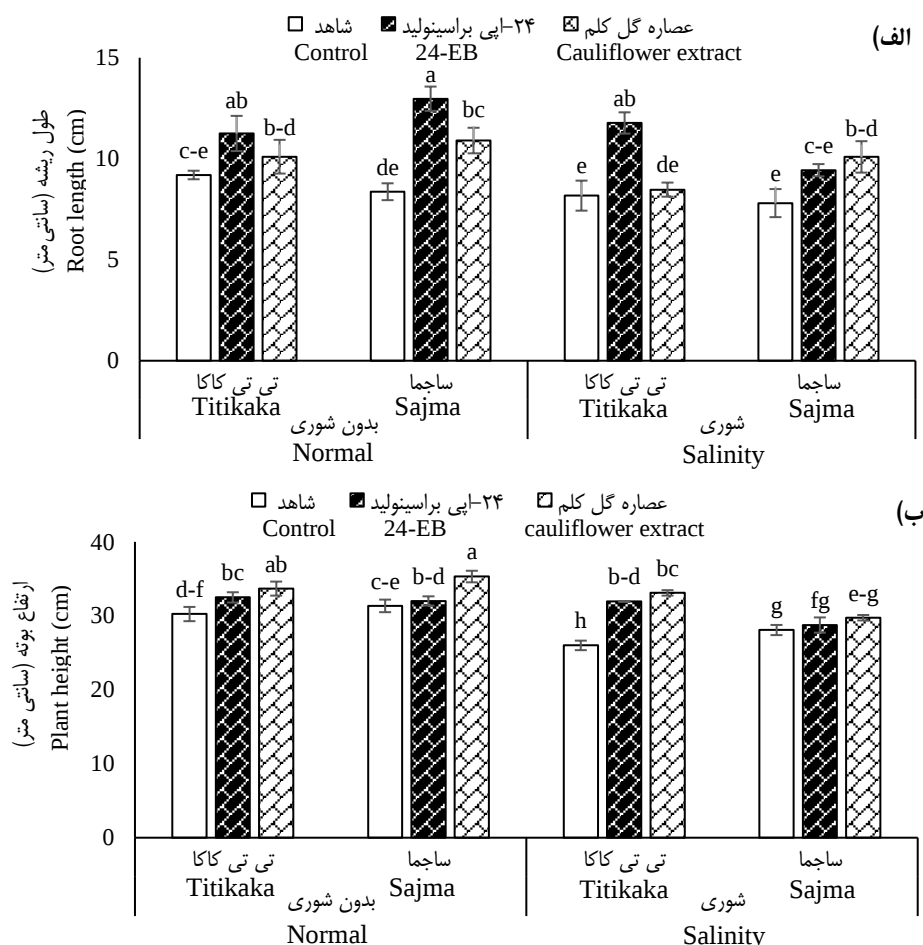
RLt: root length, PHt: plant height, RDW: root weight, SDW: shoot weight, GDW: grain weight

بررسی‌های دیگر پژوهشگران نیز تنش شوری اثر کاهشی بر طول سلول و بافت عدس (*Lens culinaris* Medik.) (Foti, Khah, & Pavli, 2019) و سویا (*Glycine max*) (Pavli, Foti, Skoufogianni, Karastergiou, & Panagou, 2021) داشت. کاهش طول ساقه تحت شوری در بررسی‌های انجام‌یافته بر گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) نیز گزارش شده است (Singh, Singh, & Prasad, 2019).

وزن‌های خشک ریشه، شاخساره و دانه

مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × رقم حاکی از کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه‌های هر دو رقم در شرایط شوری دارد، اما این کاهش در رقم متحمل تی‌تی‌کاکا (۴۹/۴۹ درصد) بیشتر از رقم حساس ساجما (۳۳/۶۵ درصد) بود. از طرفی، نتایج نشان داد که در شرایط نرمال، وزن خشک ریشه رقم متحمل (۱۸/۷۵ درصد) بیشتر (p<0.05) از رقم حساس بود (شکل ۲-الف).

طبق نتایج بررسی حاضر، تحت شرایط شوری، طول ریشه و ساقه کاهش داشت که این کاهش در رقم ساجما نسبت به رقم تی‌تی‌کاکا بیشتر بود. محققان کاهش طول ریشه و ساقه را به سمیت و همچنین جذب محدود مواد مغذی و آب به دلیل تنش اسمزی مربوط می‌دانند (Ouji, El-Bok, Mouelhi, Younes, & Kharrat, 2015). براسینولید یک تنظیم‌کننده رشد گیاهی است که نقش‌های متنوعی در تقسیم و گسترش سلولی، طویل شدن ساقه، تمایز آوند چوبی و رشد ریشه ایفا می‌کند (Zheng et al., 2016). نتایج مطالعه حاضر با محلول پاشی با ۲۴-اپی براسینولید نشان داد که رشد ساقه و ریشه نسبت به عدم محلول پاشی افزایش داشت، که این افزایش در ریشه بیشتر بود. این توانایی ۲۴-اپی براسینولید در افزایش طویل شدن ریشه و ساقه در شرایط شوری می‌تواند به دلیل محدود کردن سمیت نمک توسط این ماده باشد که با تعدیل تقسیم سلولی و طویل شدن و همچنین تمایز سلول‌های بنیادی در مریستم ریشه، باعث افزایش رشد بیشتر ریشه شده که با جذب آب و مواد مغذی و انتقال آن به بخش هوایی، رشد ساقه را نیز در پی داشته است (Lima, da Silva, Batista, & da Silva Lobato, 2019).



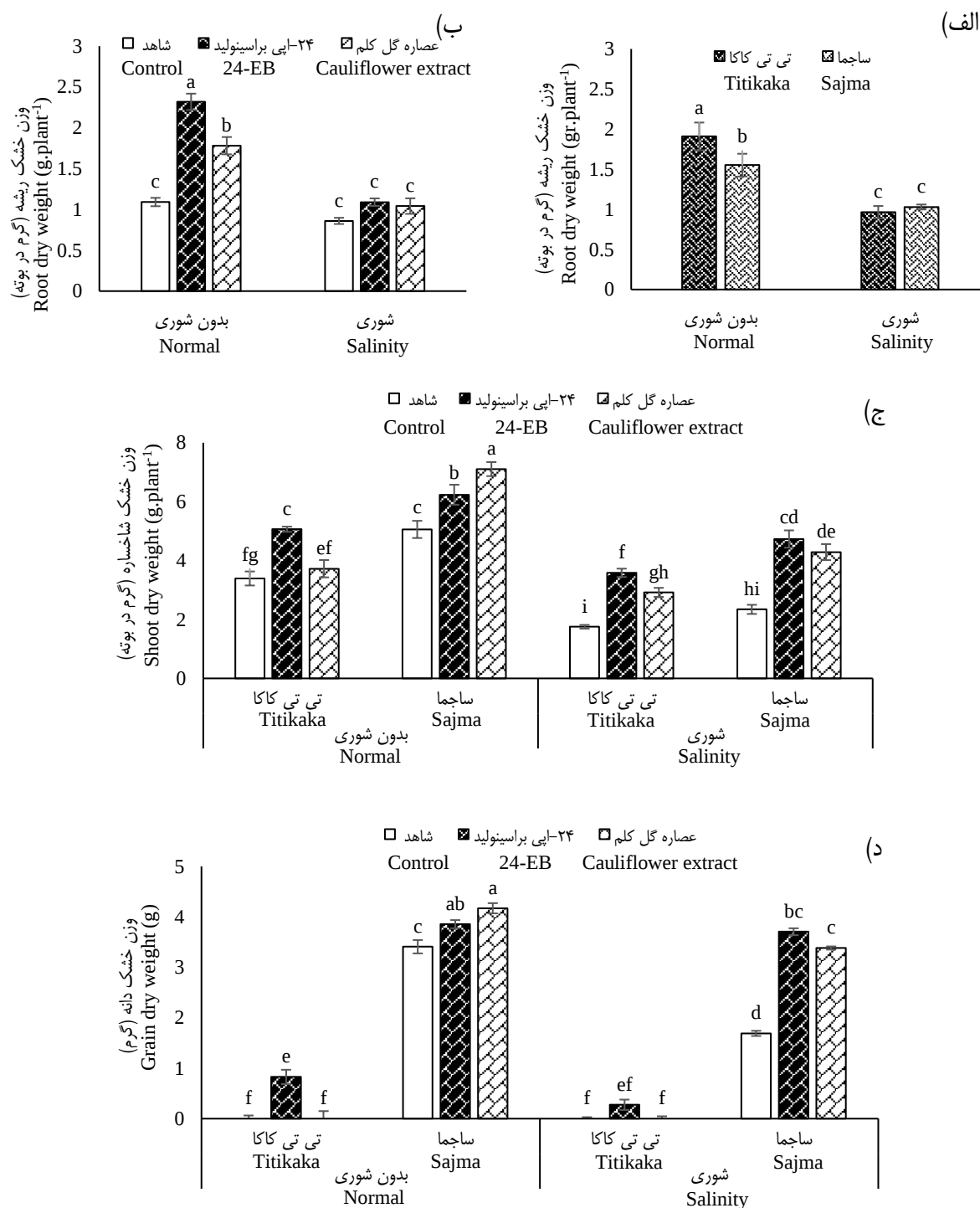
شکل ۱- مقایسه میانگین طول ریشه (الف) و ارتفاع بوته کینوا (ب) تحت اثر متقابل شوری × رقم × محلول پاشی
Figure 2- Mean comparison of root length (a) and plant height (b) in interaction effect of salinity × cultivar × foliar application

حروف غیرمشابه نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد می باشند (Error Bars=±SD).
Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

(Rao, & Ram, 2010).

مقایسه میانگین داده ها نشان می دهد که شوری به طور معنی داری باعث افت وزن خشک شاخساره هر دو رقم شد (شکل ۲-ج). در شرایط نرمال، عصاره گل کلم بیشتر از ۲۴-اپی براسینولید موجب افزایش وزن خشک شاخساره در رقم حساس ساجما شد، در حالی که، در همین شرایط ۲۴-اپی براسینولید بیشتر از عصاره گل کلم در افزایش وزن خشک شاخساره رقم متحمل تی تی کاکا مؤثرتر بود. با همه این تفاسیر، در تعدیل کاهش وزن خشک شاخساره در شرایط شوری، محلول پاشی با ۲۴-اپی براسینولید به طور معنی داری مؤثرتر از محلول پاشی با عصاره گل کلم بود.

براساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × محلول پاشی، در شرایط بدون شوری، محلول پاشی باعث افزایش معنی دار وزن خشک ریشه شد، که در این شرایط تأثیر ۲۴-اپی براسینولید (۵۲/۹۳ درصد) و عصاره گل کلم (۳۸/۷۴ درصد) بیشتر از شاهد بود. با این حال در شرایط تنش شوری، محلول پاشی هر دو نوع ماده ضدتنش، تأثیر معنی داری بر وزن خشک ریشه نداشت (شکل ۲-ب). در بررسی های انجام یافته روی بادمجان (*Solanum melongena* L.) کاربرد ۲۴-اپی براسینولید سبب افزایش وزن تر و خشک ریشه چه در شرایط شوری گردید (Wu, Ding, Zhu, Yang, & Zha, 2012). براسینوئستروئیدها با افزایش تقسیم سلولی، افزایش تولید ریشه های جانبی و بهبود رشد گیاه باعث افزایش مقاومت به تنش ها می شوند. به نظر می رسد که این چنین پاسخ هایی مربوط به توانایی آزادسازی پتانسیل درونی (ژنتیکی) گیاهی برای ریشه زایی باشد (Swamy,).



شکل ۲- مقایسه میانگین وزن خشک ریشه تحت اثر متقابل شوری × رقم (الف) و شوری × محلول پاشی (ب)، مقایسه میانگین تغییرات وزن خشک شاخساره (ج) و تغییرات وزن خشک دانه کینوا (د) تحت اثر متقابل شوری × رقم × محلول پاشی

Figure 2- Mean comparison of root dry weight in the effect of salinity × cultivar (a) and salinity × foliar application (b), mean comparison of shoot dry weight (c) and grain dry weight (d) in effect of salinity × cultivar × foliar application

حروف غیرمشابه نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد می باشند (Error Bars=±SD).

Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین، اثر متقابل شوری × رقم × محلول پاشی بر وزن خشک دانه در هر دو شرایط نرمال و شور،

داد که میزان فنل تحت تأثیر محلول پاشی و شوری ($p < 0.01$) و دو ویژگی پراکسید هیدروژن و محتوای نسبی آب برگ ($p < 0.01$) تحت اثر متقابل شوری $\times$ رقم و محلول پاشی قرار گرفتند (جدول ۳).

کلروفیل

نتایج مقایسه میانگین اثرات سه جانبه نشان می‌دهد که شرایط تنش شوری نتوانست به‌طور معنی‌داری مقدار کلروفیل کل را کاهش دهد (شکل ۳). در شرایط نرمال، تفاوت معنی‌داری بین دو رقم در مقدار کلروفیل کل در اثر محلول پاشی با ۲۴-پی براسینولید وجود نداشت. همچنین مشاهده گردید که در هر دو شرایط نرمال و تنش شوری، محلول پاشی با هر دو محلول تعدیل‌کننده تنش، منجر به افزایش مقدار کلروفیل کل می‌شود. در شرایط تنش، اثر مثبت عصاره گل کلم در رقم حساس ساجما بیشتر از رقم متحمل بود. از طرفی، تفاوت معنی‌داری بین دو محلول در رقم متحمل تی‌تی‌کاکا دیده نشد، در صورتی که در رقم حساس ساجما تأثیر مثبت ۲۴-پی براسینولید در افزایش کلروفیل کل به‌طور معنی‌داری بیشتر از عصاره گل کلم بود. رنگ سبز گیاهان مانند دمای بدن در جانوران می‌تواند شاخصی برای سلامت گیاه مورد استفاده قرار گیرد، به همین جهت غلظت کلروفیل برگ که نشانگر تشکیل سبزینه است، گویای کارایی فتوسنتزی و سلامت عمومی گیاهان می‌باشد. بررسی‌های انجام‌یافته روی سویا نشان می‌دهد که شوری اثر کاهشی شدیدی بر مقدار کلروفیل داشته، اما با محلول پاشی براسینولید و بهبود تشکیل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی تحت این ماده تعدیل‌کننده، تولید کلروفیل در شرایط شوری بهبود می‌یابد (Otie et al., 2021). در پژوهشی دیگر مشاهده شد که کاربرد پی‌براسینولید منجر به افزایش محتوای کلروفیل کل در گیاه گوجه‌فرنگی در تمام سطوح شوری می‌شود (Maia Júnior et al., 2022).

کاروتنوئید

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که شوری در هر دو رقم و تحت محلول پاشی و عدم محلول پاشی، منجر به کاهش مقدار کاروتنوئید شد (شکل ۴). با این وجود، این مقدار کاهش در رقم حساس به شوری ساجما معنی‌دار نبود. در شرایط نرمال، میزان کاروتنوئید در رقم متحمل تی‌تی‌کاکا به‌طور معنی‌داری بیشتر از رقم حساس ساجما بود. در شرایط تنش شوری بین دو رقم تفاوت معنی‌داری از نظر مقدار کاروتنوئید مشاهده نشد.

رقم حساس ساجما دارای وزن خشک دانه بیشتری در مقایسه با رقم متحمل تی‌تی‌کاکا بود (شکل ۲-د). در شرایط نرمال و با تنش شوری، محلول پاشی موجب افزایش معنی‌دار وزن خشک دانه در رقم حساس ساجما در مقایسه با شاهد شد. در عین حال، تفاوت معنی‌داری بین دو محلول در افزایش وزن خشک دانه در این رقم وجود نداشت.

در مورد کاهش وزن خشک اندام‌های گیاه ناشی از شوری گزارش‌های زیادی وجود دارد. علت این افت وزن خشک ناشی از تنش شوری، به تحت تأثیر قرار گرفتن تقسیم سلولی و در نتیجه کاهش ازدیاد طول و در نهایت کاهش رشد گیاه و تنزل پتانسیل زیست‌توده نسبت داده شده است (Ahmad et al., 2018). البته علاوه بر این، به اختلال در جذب مواد مغذی ضروری که در نهایت باعث کاهش زیست‌توده گیاهان تحت تنش شوری می‌شود نیز اشاره شده است (Parvin, Hasanuzzaman, Bhuyan, Mohsin, & Fujita, 2019). از دیگر عواملی که در پژوهش‌های مختلف به آن اشاره شده است، سمیت ناشی از افزایش یون سدیم (Na^+) در محیط شور می‌باشد. ثابت شده است که با کاهش غلظت کربن دی‌اکسید (CO_2) و بسته شدن روزنه‌ها، در امر فتوسنتز اختلال ایجاد می‌شود (Kaymakanova & Stoeva, 2008). تبعات افزایش یون سدیم محیط در شرایط تنش شوری به این موارد محدود نمی‌شود. مشخص شده است که سطوح بالای نمک (Na^+) می‌تواند باعث کاهش سرعت انتقال یون‌های ضروری مانند نیترات (NO_3^-) شود که این وضعیت باعث می‌شود ترکیبات حاوی نیتروژن کاهش یافته و در نهایت رشد گیاه و تجمع زیست‌توده مهار شود (Chien, Liao, Wang, & Mannepalli, 2009).

با توجه به موارد ذکرشده، به نظر می‌رسد که کاربرد ۲۴-پی براسینولید و عصاره گل کلم به‌دلیل توانایی در سم‌زدایی حاصل از تنش شوری از طریق اصلاح پارامترهای مختلف تبادل گازی (Wani, Tahir, Ahmad, Dar, & Nisar, 2017) و کمک به فعالیت‌های فتوسنتزی با افزایش رنگ‌دانه و تنظیمات اسمزی (Yang et al., 2018) در تعدیل کاهش وزن خشک اندام‌های گیاه کینوا در شرایط تنش شوری مؤثر می‌باشد.

ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی

نتایج جدول تجزیه واریانس اثر شوری و محلول پاشی ۲۴-پی براسینولید و عصاره گل کلم بر ویژگی‌های بیوشیمیایی نشان داد که چهار ویژگی مقدار کلروفیل کل، کاروتنوئید، پرولین و کربوهیدرات‌های محلول به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) تحت تأثیر اثر متقابل شوری $\times$ رقم $\times$ محلول پاشی قرار گرفتند. همین نتایج نشان

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر شوری و محلول پاشی ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم بر ویژگی‌های بیوشیمیایی ارقام حساس و متحمل به شوری کینوا

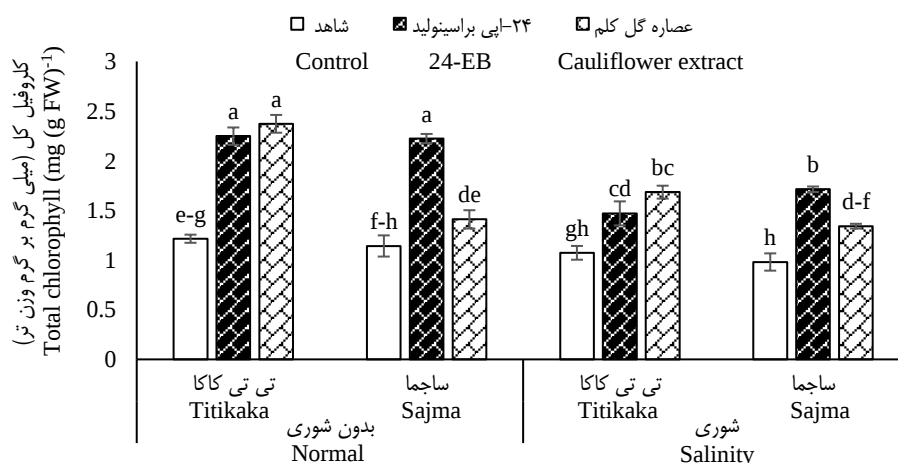
Table 3- Variance analysis results of the effect of salinity and foliar application of 24-epibrasinolide and cauliflower extract on the biochemical of sensitive and tolerant quinoa cultivars to salinity.

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares						
		کلروفیل کل CHL	کاروتنوئید CAR	پرولین PRL	فنل PHN	کربوهیدرات- های محلول برگ LSF	محتوای نسبی آب برگ LWC	پراکسید هیدروژن H ₂ O ₂
شوری Salinity	1	1.84**	0.30**	0.09**	1.74**	4.17**	740.60**	0.10**
رقم Cultivar	1	0.522**	0.05**	0.02**	0.08 ^{ns}	0.02 ^{ns}	263.63**	0.01*
محلول پاشی Foliar application	2	2.93**	0.20**	0.03**	0.67**	1.54**	176.35**	0.15**
شوری × رقم Salinity × cultivar	1	0.24**	0.08**	0.01**	0.02 ^{ns}	1.53**	123.69**	0.06**
شوری × محلول پاشی Salinity × foliar application	2	0.24**	0.01**	0.01**	0.09 ^{ns}	0.04 ^{ns}	10.48 ^{ns}	0.01 ^{ns}
رقم × محلول پاشی Cultivar × foliar application	2	0.63**	0.01*	0.01**	0.04 ^{ns}	0.79**	1.35 ^{ns}	0.003 ^{ns}
شوری × رقم × محلول پاشی Salinity × cultivar × foliar application	2	0.10*	0.01*	0.003*	0.09 ^{ns}	0.07*	6.98 ^{ns}	0.002 ^{ns}
خطای آزمایشی Error	36	0.02	0.002	0.001	0.03	0.02	16.22	0.002
ضریب تغییرات CV		9.8	7.8	10.4	9.9	9.3	8.3	9.6

^{ns}, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

^{ns}, * and ** non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively

CHL: total chlorophyll, CAR: carotenoid, PRL: proline, PHN: phenol, LSF: leaf soluble carbohydrates, LWC: relative leaf water content, H₂O₂: hydrogen peroxide



شکل ۳- مقایسه میانگین تغییرات مقدار کلروفیل کل برگ کینوا تحت اثر متقابل شوری × رقم × محلول پاشی.

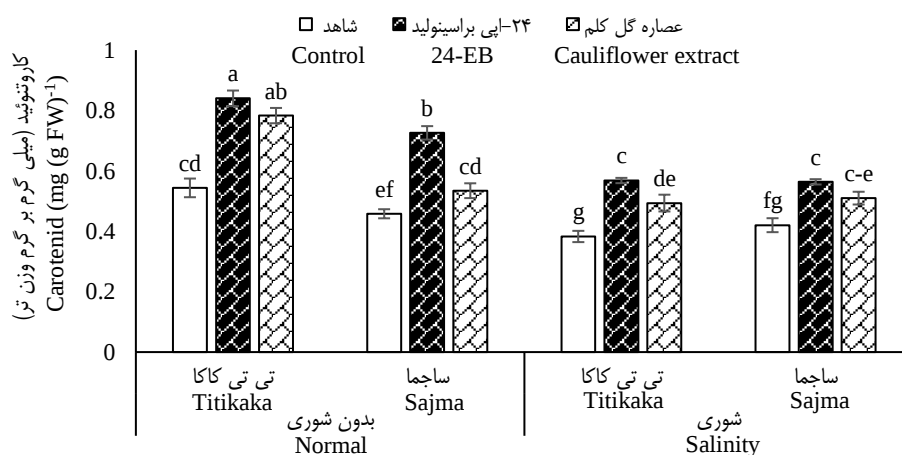
Figure 3- Mean comparison of total chlorophyll of quinoa leaf in effect of salinity × cultivar × foliar application.

حروف غیرمشابه نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند (Error Bars = ±SD).

Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

و محلول پاشی (با هر دو ماده تعدیل کننده تنش) در هر دو شرایط (تنش شوری و نرمال) باعث افزایش مقدار کاروتنوئید برگ شد. نتایج بررسی حاضر همسو با تحقیقاتی است که توسط پاندا و همکاران (Panda, Ghosh, & Kar, 2013)، روی برنج انجام گرفته بود. در بررسی پوراسدالهی و همکاران (Pourasadollahi, Siosemardeh, Hosseinpanahi, & Sohrabi, 2020)، مقدار کاروتنوئید برگ سیب زمینی تحت محلول پاشی اپی براسینولید افزایش معنی داری نسبت به شاهد داشت.

مقایسه مواد تعدیل کننده تنش نشان می دهد که در شرایط تنش شوری، تفاوت معنی داری بین دو ماده ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم وجود نداشت. باین حال در شرایط نرمال ۲۴-اپی براسینولید به طور معنی داری بیشتر از عصاره گل کلم باعث افزایش کاروتنوئید شد. در شرایط تنش شوری، کارآیی استفاده از کربن در گیاه کاهش یافته و تولید اتانول و لاکتات افزایش پیدا می کند. این دو از عواملی هستند که سبب کاهش سنتز کاروتنوئیدها و کلروفیل در شرایط تنش می شوند (Oliveira Neto et al., 2009). طبق نتایج حاصل از بررسی حاضر، مقدار کاروتنوئید برگ تحت تنش شوری کاهش داشته



شکل ۴- مقایسه میانگین تغییرات مقدار کاروتنوئید برگ کینوا تحت اثر متقابل شوری × رقم × محلول پاشی
Figure 4- Mean comparison of carotenoid of quinoa leaf in effect of salinity × cultivar × foliar application

حروف غیرمشابه نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد می باشند (Error Bars=±SD).
Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

2009). محققان معتقد هستند که پرولین تحت تنش شوری، جذب آب را افزایش داده و از این طریق موجب کاهش تجمع یون های سمی در گیاه شده که این امر در نهایت منجر به القاء سازوکارهای آنتی اکسیدانی می شود (Zhang & Dai, 2019; Ismail & Horie, 2017). گزارش های متعددی در مورد افزایش سطح پرولین تحت تنش شوری در گیاهانی مانند آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) (Ramaswamy & Seeta, 2018)، گندم (Akbari, Toorchi, & Shakiba, 2016) و یونجه (Shakiba, 2016) و یونجه (Mezni, Albouchi, Bizid, & Hamza, 2010) وجود دارد که نتایج حاصل از تحقیقات حاضر را تأیید می کند.

از سوی دیگر، بررسی حاضر نشان می دهد که تحت تنش شوری و محلول پاشی با ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم، مقدار پرولین برگ هر دو رقم حساس و متحمل کینوا افزایش پیدا می کند. بررسی قاسمی و همکاران (Ghasemi, Jahanbin, Latifmanesh, Farajee, & Mirshekari, 2021) نیز با تأیید نتایج به دست آمده

پرولین

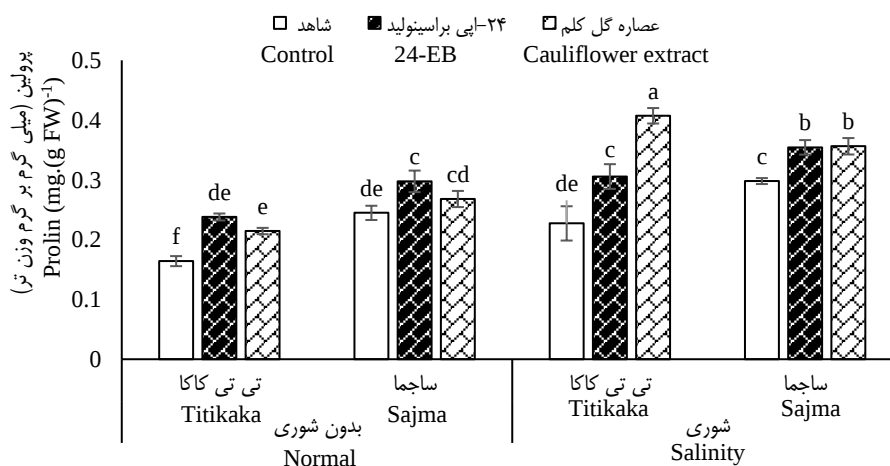
تنش شوری در هر دو رقم و تحت محلول پاشی با هر دو ماده تعدیل کننده موجب افزایش معنی دار پرولین گردید (شکل ۵). در شرایط تنش شوری و نرمال در هر سه تیمار محلول پاشی، مقدار پرولین در رقم حساس ساجما به طور معنی داری بیشتر از رقم متحمل تی تی کاکا بود. مقایسه دو محلول تعدیل کننده تنش نشان می دهد که در شرایط نرمال تفاوت معنی داری بین دو محلول وجود نداشت، ولی در شرایط تنش شوری مقدار پرولین در محلول پاشی با ۲۴-اپی براسینولید در مقایسه با عصاره گل کلم به طور معنی داری بیشتر بود. بررسی ها نشان می دهند که در شرایط تنش شوری، پرولین در مقایسه با دیگر آمینواسیدها بیشتر تولید و در سلول ها ذخیره می شود (Teakle & Tyerman, 2010). این اسید آمینه با تنظیم فشار اسمزی و افزایش پایداری غشاء سلولی، تأثیر تعیین کننده ای در کاهش اثر شوری بر تخریب غشاء سلولی دارد (Melchiorre et al., 2009).

نشان داد که با کاربرد براسینولید میزان پرولین برگ آفتابگردان افزایش معنی‌داری داشت. در بررسی‌های دیگری مشخص شد که کاربرد براسینولید سبب افزایش مقدار پرولین سورگوم (*Sorghum vulgare Pers.*) در مناطق شور شده و این افزایش با بالاتر رفتن میزان شوری منطقه، بیشتر شد (Vardhini, 2012). در پژوهشی دیگر روی لوبیا (*Phaseolus vulgaris L.*)، سطح پرولین افزایش قابل توجهی در پاسخ به ۲۴-اپی براسینولید و همچنین به تنش شوری نشان داد (Rady, 2011).

فنل کل

نتایج نشان می‌دهد که تحت تنش شوری، محتوای فنل کل افزایش معنی‌داری (۱۹/۷۶ درصد) داشت (شکل ۶-الف). محتوای فنل کل، با محلول‌پاشی توسط تعدیل‌کننده‌های تنش شوری افزایش پیدا کرد، اما این افزایش توسط عصاره گل کلم غیرمعنی‌دار بود. مقایسه بین دو محلول مورد استفاده نشان می‌دهد، تفاوت معنی‌داری بین دو محلول از نظر افزایش محتوای فنل کل وجود نداشت (شکل ۶-ب).

یکی از سازوکارهای دفاعی غیرآنزیمی در مقابله با تنش‌های محیطی، تولید و تجمع ترکیبات فنلی است که به جمع‌آوری پراکسید هیدروژن (H_2O_2) تولیدشده به واسطه تنش در سلول‌های گیاهی کمک می‌کند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که تنش شوری باعث افزایش محتوای فنل کل در گیاه کینوا شد. در پژوهشی دیگر نیز فیروزه و همکاران (Firoozeh, Khavarinejad, Najafi, &)

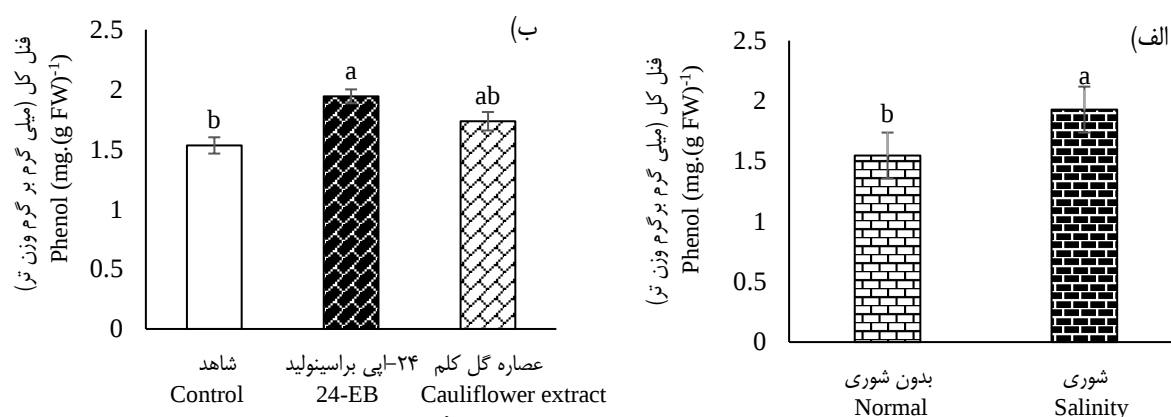


شکل ۵- مقایسه میانگین تغییرات پرولین برگ کینوا تحت اثر متقابل شوری × رقم × محلول‌پاشی.

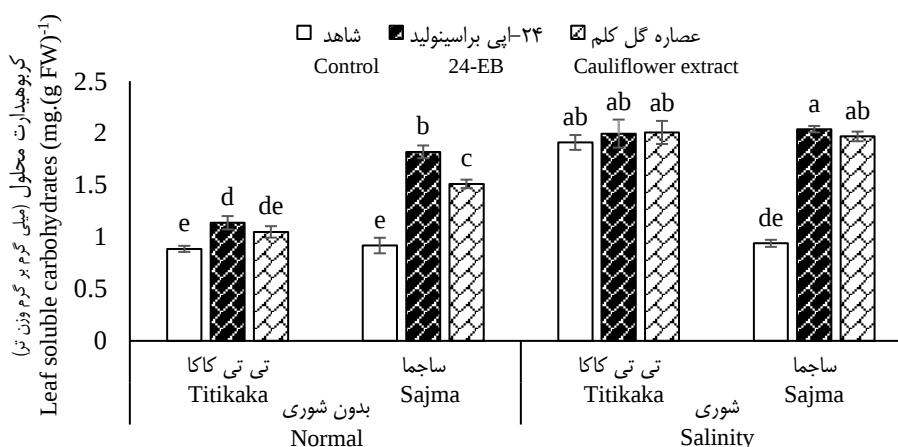
Figure 5- Mean comparison of prolin of quinoa leaf in effect of salinity × cultivar × foliar application.

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند (Error Bars=±SD).

Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).



شکل ۶- مقایسه میانگین تغییرات محتوای فنل کل برگ کینوا تحت تأثیر شوری (الف) و محلول‌پاشی (ب).
Figure 6- Mean comparison of phenol content of quinoa leaf in effect of salinity (a) and foliar application (b).
(Error Bars=±SD).
Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).



شکل ۷- مقایسه میانگین تغییرات کربوهیدرات‌های محلول برگ کینوا تحت اثر متقابل شوری × رقم × محلول‌پاشی
Figure 7- Mean comparison of leaf soluble carbohydrates of quinoa leaf in effect of salinity × cultivar × foliar application
(Error Bars=±SD).
Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

اسمزی از راهکارهای مهم گیاهان برای مقاومت در مقابل تنش‌های محیطی مانند شوری و خشکی است. گیاهان از این طریق باعث بهبود جذب آب از محیط و افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شوند (Liang, Ma, Wan, & Liu, 2018).

پژوهش‌های انجام‌یافته روی گوجه فرنگی نشان داد که در پاسخ به تنش شوری، مقدار کربوهیدرات‌های محلول روند افزایشی پیدا کرد (Xue-feng Lin, Hong-Tao XIE, Mu-kui Yu, & Shun-Wei Chen, 2018). که این گزارش با نتایج حاصل از این بررسی مطابقت دارد. در همین راستا، سو و همکاران (Su, Zheng, Tian, & Wang, 2020) نشان دادند که در شرایط تنش شوری، محتوای پروتئین و کربوهیدرات‌های محلول به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا

به نظر می‌رسد که احتمالاً یکی از راهکارهای مهم در ارقام متحمل کینوا برای مقابله با شوری، تجمع کربوهیدرات‌های محلول در شرایط شوری باشد. در هر دو شرایط شوری و نرمال، محلول‌پاشی با مواد تعدیل‌کننده تنش شوری موجب افزایش محتوای کربوهیدرات‌های محلول گردید، هر چند تفاوت معنی‌داری بین مواد تعدیل‌کننده و شاهد در رقم تی‌تی‌کاکا در شرایط شوری وجود نداشت. در شرایط تنش شوری، تفاوت معنی‌داری بین دو محلول مورد استفاده در افزایش مقدار کربوهیدرات‌های محلول دیده نشد، لذا به نظر می‌رسد که از هر دو محلول می‌توان برای تعدیل اثرات شوری به‌جای هم استفاده نمود.

تولید و انباشت اسمولیت‌ها در سیتوپلاسم جهت حفظ تعادل

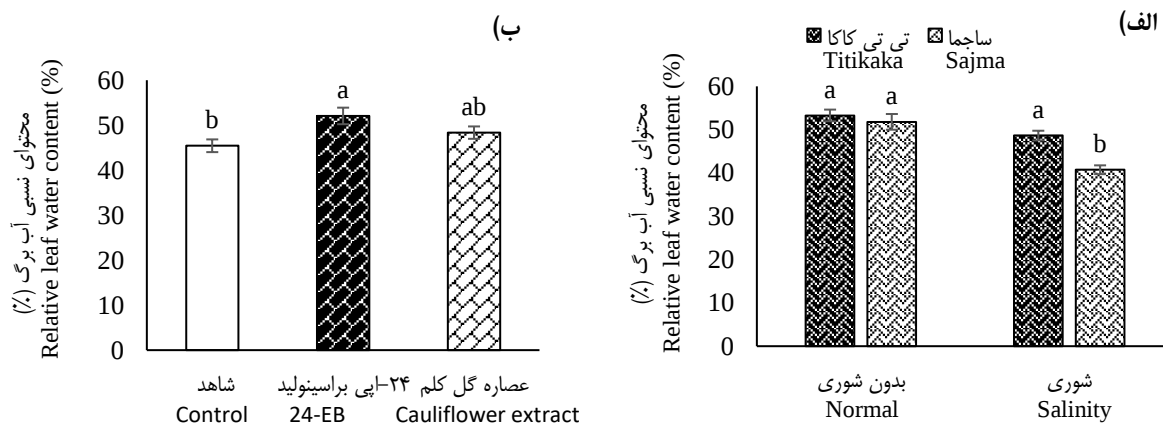
محتوای نسبی آب برگ تحت محلول‌پاشی نشان می‌دهد که محلول‌پاشی با ۲۴-اپی براسینولید موجب افزایش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ (۱۲/۷۳ درصد) نسبت به شاهد شد، اما تحت محلول‌پاشی عصاره گل کلم، افزایش محتوای نسبی آب برگ نسبت به شاهد معنی‌دار نبود (شکل ۸-ب).

در شرایط شور، گیاهان به دلیل عدم تعادل در فشار اسمزی در سلول‌های گیاهی، دچار تنش اسمزی می‌شوند. علاوه بر این، تجمع نمک در مناطق ریشه، پتانسیل آب ریشه را کاهش داده و جذب آب را محدود می‌کند، که در نهایت به کاهش محتوای نسبی آب برگ منجر می‌شود (Otie et al., 2021). نتایج مطالعه زاهدی و همکاران (Zahedi, Asgarian, Gholami, & Karami, 2019) نشان داد که تحت تنش شوری، محتوای نسبی آب برگ کاهش قابل توجهی نسبت به عدم شوری داشت، اما با کاربرد ۲۴-اپی براسینولید، تا حد زیادی اثرات منفی شوری بر کاهش محتوای نسبی آب برگ کاهش پیدا کرد. اثر افزایشی ۲۴-اپی براسینولید بر محتوای نسبی آب برگ تحت تنش شوری را می‌توان به توانایی منحصربه‌فرد این هورمون در ارتقاء و بهبود پایداری غشاء و سازوکارهای فیزیولوژیکی گیاهان در مقابله با هرگونه کمبود در جذب آب در برابر تنش‌های ناشی از شوری نسبت داد (Wu, Zhang, Ervin, Yang, & Zhang, 2017). بررسی فرضی امین آباد و همکاران (Farzi-Aminabad, Nasrollah Zadeh & Ghassemi-Golezani, 2021)، محتوای نسبی آب برگ گلرنگ تحت محلول‌پاشی ۲۴-اپی براسینولید افزایش معنی‌داری داشت که با نتایج حاصل از این بررسی مطابقت دارد.

می‌کند. ایشان گزارش کردند که کاربرد براسینولید، محتوای پرولین و کربوهیدرات‌های محلول را افزایش می‌دهد. همسو با این گزارشات، مطالعه انجام‌یافته روی گندم نشان داد که استفاده از براسینولید موجب افزایش قابل توجه محتوای پرولین و کربوهیدرات‌های محلول در شرایط تنش شوری شد که می‌تواند تا حدودی باعث محافظت گیاهان از اثرات نامطلوب سمیت شوری شود (Yusuf, Fariduddin, Khan, & Hayat, 2017). نتایج تحقیق پوراسدالهی و همکاران (Pourasadollahi et al., 2020) نشان داد که محلول‌پاشی اپی براسینولید اثر افزایشی معنی‌داری بر مقدار کربوهیدرات برگ سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) داشت. جمیع این نتایج نشان می‌دهد که از طریق محلول‌پاشی با مواد تعدیل‌کننده می‌توان گیاهان را در مقابل تنش شوری به طور قابل ملاحظه‌ای مقاوم نمود.

محتوای نسبی آب برگ

مقایسه میانگین محتوای نسبی آب برگ ارقام در شرایط نرمال و تنش شوری نشان می‌دهد که در شرایط نرمال، تفاوت معنی‌داری بین محتوای نسبی آب برگ دو رقم وجود نداشت، درحالی‌که در شرایط تنش شوری، محتوای نسبی آب برگ رقم متحمل تی‌تی‌کاکا بیشتر از رقم حساس ساجما بود (شکل ۸-الف). همچنین داده‌ها نشان می‌دهند که شرایط تنش تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ رقم متحمل تی‌تی‌کاکا در مقایسه با شرایط نرمال نداشت، درحالی‌که محتوای نسبی آب برگ رقم حساس به شوری ساجما در شرایط تنش شوری کاهش معنی‌داری (۲۱/۳۵ درصد) پیدا کرد. مقایسه میانگین

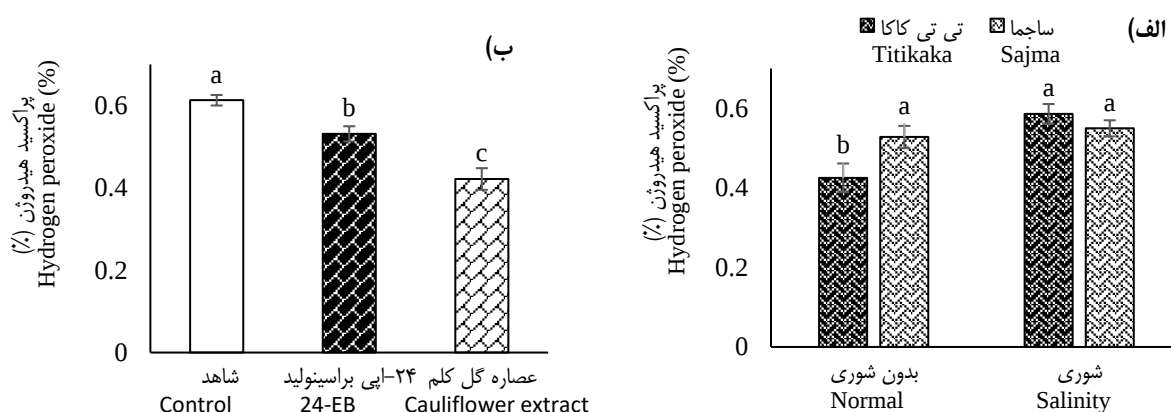


شکل ۸- مقایسه میانگین تغییرات محتوای نسبی آب برگ تحت اثر متقابل شوری × رقم (الف) و محلول‌پاشی (ب)
Figure 8- Mean comparison of relative leaf water content of quinoa leaf in effect of salinity × cultivar (a) and foliar application (b)

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند (Error Bars=±SD).
Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

پراکسید هیدروژن (H_2O_2)

مقایسه میانگین درصد پراکسید هیدروژن نشان می‌دهد که در شرایط نرمال، مقدار H_2O_2 در رقم حساس ساجما به‌طور معنی‌داری بیشتر از رقم متحمل تی‌تی‌کاکا بود. با این وجود در شرایط تنش شوری، تفاوت معنی‌داری بین درصد پراکسید هیدروژن این دو رقم مشاهده نشد. از طرفی، نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با شرایط نرمال، درصد پراکسید هیدروژن رقم متحمل در شرایط تنش شوری به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، ولی این افزایش برای رقم حساس ساجما معنی‌دار نبود (شکل ۹-الف). مقایسه میانگین درصد پراکسید هیدروژن اثر محلول پاشی نشان می‌دهد که هر دو محلول اثر



شکل ۹- مقایسه میانگین تغییرات پراکسید هیدروژن برگ تحت اثر متقابل شوری × رقم (الف) و محلول پاشی (ب)
Figure 9- Mean comparison of hydrogen peroxide of quinoa leaf in effect of salinity × cultivar (a) and foliar application (b)

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند (Error Bars=±SD).
Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

درصد ماده خشک قابل هضم

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × رقم نشان می‌دهد که در هر دو شرایط نرمال و تنش شوری، بین دو رقم تفاوت معنی‌داری از نظر درصد ماده خشک قابل هضم وجود نداشت (شکل ۱۰-الف). باین حال، در مقایسه با شرایط نرمال، ماده خشک قابل هضم هر دو رقم تی‌تی‌کاکا و ساجما تحت تنش شوری (به ترتیب ۱۲/۵۲ و ۱۸/۵۴ درصد) کاهش یافت.

نتایج نشان می‌دهد که محلول پاشی با ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم باعث افزایش به ترتیب ۱۲/۲۵ و ۱۳/۵۶ درصدی ماده خشک قابل هضم علوفه نسبت به شاهد شد، هرچند بین دو نوع محلول تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید (شکل ۱۰-ب).

کیفیت علوفه

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان می‌دهد که الیاف نامحلول در شوینده اسیدی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تحت تأثیر اثر متقابل شوری × رقم × محلول پاشی قرار گرفت. پروتئین خام و الیاف نامحلول در شوینده خنثی ($p < 0.05$) تحت تأثیر اثر متقابل شوری × محلول پاشی و رقم × محلول پاشی قرار گرفتند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که اثر محلول پاشی و اثر متقابل شوری × رقم بر درصد ماده خشک قابل هضم و کربوهیدرات‌های محلول در آب معنی‌دار ($p < 0.01$) بودند. از طرفی مشخص شد که درصد خاکستر تحت تأثیر اثر متقابل رقم × محلول پاشی ($p < 0.05$) و اثر شوری ($p < 0.01$) قرار گرفت. با همه این احوال، فیبر خام، تحت تأثیر هیچ‌کدام از اثرات متقابل قرار نگرفت و فقط اثرات اصلی این ویژگی را تحت تأثیر ($p < 0.01$) قرار دادند (جدول ۴).

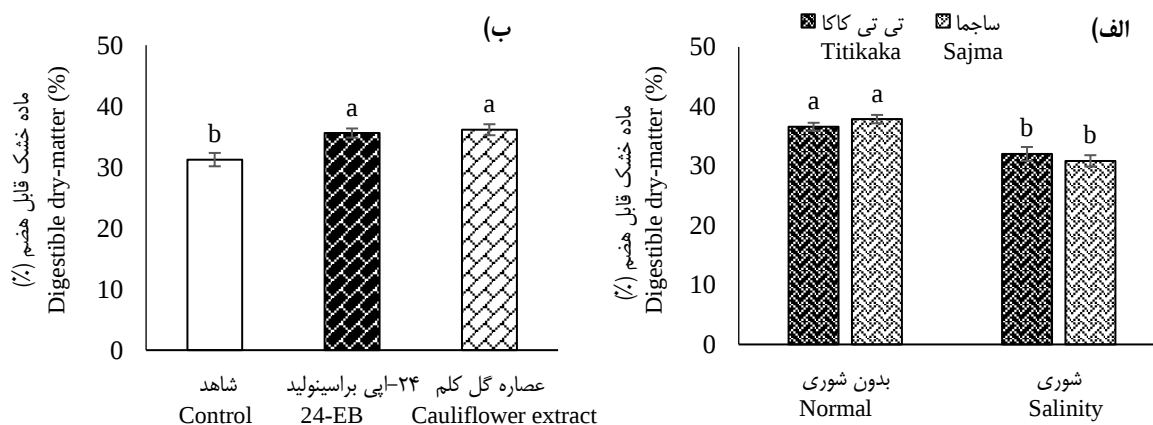
جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر شوری و محلول پاشی ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم بر کیفیت علوفه ارقام حساس و متحمل به شوری کینوا
Table 4- Variance analysis results of the effect of salinity and foliar application of 24-epibrasinolide and cauliflower extract on forage quality of sensitive and tolerant quinoa cultivars to salinity.

منبع تغییرات S.V.O	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares						
		ماده خشک قابل هضم DMD	پروتئین خام علوفه CPr	کربوهیدرات- های محلول در آب علوفه WSC	فیبر خام علوفه CFF	درصد خاکستر علوفه Ash	الیاف نامحلول در شوینده اسیدی علوفه NDF	الیاف نامحلول در شوینده خشکی علوفه ADF
شوری Salinity	1	403.98**	9.29**	18.50**	128.18**	2.67**	138.17**	188.49**
رقم Cultivar	1	0.045 ^{ns}	8.74**	2.27*	154.51**	0.070*	66.83**	223.26**
محلول پاشی Foliar application	2	115.57**	17.08**	11.73**	131.81**	1.95**	965.51**	98.89**
شوری × رقم Salinity × cultivar	1	17.92**	1.31*	7.39**	0.97 ^{ns}	0.015 ^{ns}	23.63*	6.99 ^{ns}
شوری × محلول پاشی Salinity × foliar application	2	13.05 ^{ns}	0.84*	1.004 ^{ns}	2.26 ^{ns}	0.131 ^{ns}	21.14*	18.40**
رقم × محلول پاشی Cultivar × foliar application	2	1.63 ^{ns}	2.07*	0.082 ^{ns}	14.15 ^{ns}	0.427*	22.93*	13.70**
شوری × رقم × محلول پاشی Salinity × cultivar × foliar application	2	10.55 ^{ns}	0.52 ^{ns}	0.86 ^{ns}	9.54 ^{ns}	0.114 ^{ns}	15.09 ^{ns}	21.08**
خطای آزمایشی Error	36	4.006	0.18	0.461	5.46	0.124	5.12	2.46
ضریب تغییرات CV		5.8	8.0	5.3	5.2	5.3	4.7	2.6

^{ns}, * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

^{ns}, * and ** non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

DMD: digestible dry-matter, CPr: crude protein of forage, WSC: water-soluble carbohydrates of forage, CFF: crude fiber of forage, Ash: forage ash percentage, ADF: acid detergent Insoluble fiber of the forage, NDF: neutral detergent fiber



شکل ۱۰- مقایسه میانگین تغییرات ماده خشک قابل هضم علوفه تحت اثر شوری × رقم (الف) و محلول پاشی (ب)

Figure 10- Mean comparison of digestible dry-matter of quinoa in effect of salinity × cultivar (a) and foliar application (b)

حروف غیرمشابه نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد می باشند (Error Bars = ±SD).

Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

معنی‌داری وجود نداشت.

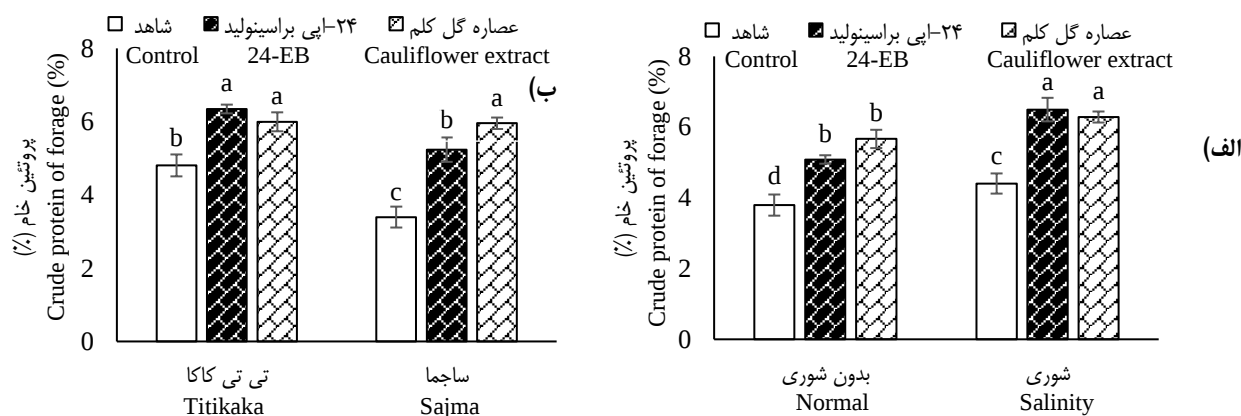
مقایسه میانگین اثر متقابل رقم $\times$ محلول پاشی نشان می‌دهد که محلول پاشی باعث افزایش معنی‌دار پروتئین خام علوفه شد، ولی در رقم متحمل تی‌تی‌کاکا، بین دو محلول مورد استفاده تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید (شکل ۱۱-ب). با این حال مقدار افزایش درصد پروتئین خام علوفه در رقم حساس ساجما در محلول پاشی با عصاره گل کلم به‌طور معنی‌داری، بیشتر از محلول پاشی با محلول ۲۴-اپی براسینولید بود. به همین دلیل، به‌نظر می‌رسد که با توجه به سازگار بودن با طبیعت و در دسترس بودن گل کلم، برای افزایش پروتئین خام بهتر است از عصاره گل کلم استفاده نمود.

از دیگر عوامل تعیین‌کننده کیفیت علوفه، می‌توان به پروتئین خام بالای آن اشاره نمود. گزارش شده است که تنش شوری با افزایش درصد پروتئین خام علوفه، تأثیر مثبتی بر کیفیت یونجه دارد (Ferreira et al., 2015). همان‌طور که گفته شد، در پژوهش حاضر، تنش شوری اثر افزایشی بر درصد پروتئین خام هر دو رقم حساس و متحمل کینوا داشت. پژوهش‌های دیگر محققان نیز نشان می‌دهد که شوری با افزایش درصد پروتئین خام یونجه رابطه مستقیم دارد (Suyama et al., 2007; Qiu et al., 2023). افزایش سنتز پروتئین و جذب نیتروژن توسط هورمون براسینولید می‌تواند دلیلی بر افزایش پروتئین خام علوفه باشد که در نتایج پژوهش حاضر در محلول پاشی ۲۴-اپی براسینولید، درصد پروتئین خام علوفه افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد داشت.

علت پایین بودن ماده خشک قابل هضم در شرایط اعمال تنش را می‌توان ناشی از کاهش تعداد، سطح برگ و افزایش نسبت ساقه به برگ دانست که در نهایت منجر به افزایش مقادیر الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و الیاف نامحلول در شوینده خنثی می‌شود. افزایش ماده خشک قابل هضم تحت اثر مواد محلول تعدیل‌کننده تنش می‌تواند به دلیل نقش این مواد در کاهش الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و الیاف نامحلول در شوینده خنثی باشد. قابلیت هضم بالا یکی از عوامل کیفیت بهتر علوفه است (Ferreira, Cornacchione, Liu, & Suarez, 2015). لذا به نظر می‌رسد که شوری باعث افت کیفی علوفه از لحاظ قابلیت هضم شده، ولی محلول پاشی با ایجاد سازوکارهایی می‌تواند از به‌طور معنی‌داری کاهش کیفیت بکاهد. با توجه به غیرمعنی‌دار بودن تفاوت دو ماده تعدیل‌کننده مورد استفاده، به‌کارگیری عصاره گل کلم می‌تواند از نظر اقتصادی و حفظ بهداشت محیط توجیه‌پذیرتر باشد. بررسی انجام‌یافته روی سورگوم نشان می‌دهد که درصد ماده خشک قابل هضم این گیاه تحت تنش شوری کاهش پیدا می‌کند (Tokas et al., 2021). این نتایج با یافته‌های حاصل از بررسی حاضر مطابقت دارد.

پروتئین خام

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل شوری $\times$ محلول پاشی نشان می‌دهد که شوری باعث افزایش معنی‌دار مقدار پروتئین خام علوفه می‌شود (شکل ۱۱-الف). همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در هر دو شرایط، بین دو محلول تعدیل‌کننده تنش، تفاوت



شکل ۱۱- مقایسه میانگین تغییرات پروتئین خام علوفه کینوا تحت اثر متقابل شوری $\times$ محلول پاشی (الف) و اثر متقابل رقم $\times$ محلول پاشی (ب)

Figure 11- Mean comparison of crude protein of forage in effect of salinity $\times$ foliar application (a) and cultivar $\times$ foliar application (b)

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند (Error Bars = $\pm$ SD).

Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = $\pm$ SD).

قابل توجهی موجب افزایش فیبر خام شده و به این شیوه از قابلیت هضم و کیفیت علوفه کینوا می‌کاهد (شکل ۱۳-الف). از طرفی، مشاهده شد که رقم متحمل تی تی کاکا در مقایسه با رقم حساس به شوری ساچما از مقدار فیبر کمتری برخوردار بود (شکل ۱۳-ب). مقایسه میانگین اثر محلول پاشی مواد تعدیل کننده تنش شوری در درصد فیبر خام نشان می‌دهد که این مواد به‌طور معنی داری باعث کاهش فیبر خام و در نتیجه افزایش قابلیت هضم و بالا رفتن کیفیت آن می‌شود. در این میان، بین دو محلول مورد استفاده از نظر آماری تفاوت معنی داری مشاهده نشد (شکل ۱۳-ج).

بررسی که توسط دیان‌تی و همکاران (Dianati, Salehi, & Sadati, 2015) روی دو گیاه *M. polymer* و *M. scutellata* انجام شد، نشان داد که تنش شوری در افزایش فیبر خام آن‌ها تأثیر داشته که این نتایج مؤید یافته‌های پژوهش حاضر می‌باشد.

درصد خاکستر

نتایج مقایسه میانگین درصد خاکستر علوفه نشان می‌دهد که تنش شوری موجب افزایش معنی دار (۶/۸۹ درصد) درصد خاکستر علوفه می‌شود (شکل ۱۴-الف). همچنین نتایج نشان می‌دهد که محلول پاشی با مواد تعدیل کننده تنش در افزایش خاکستر علوفه تأثیر داشته است (شکل ۱۴-ب). مقایسه محلول‌های مورد استفاده نشان می‌دهد که در رقم حساس ساچما، هر دو محلول به یک اندازه در افزایش درصد خاکستر علوفه کینوا مؤثر بودند، در حالی که در رقم متحمل تی تی کاکا، این مقدار افزایش در کاربرد محلول ۲۴-اپی براسینولید به‌طور معنی داری بیشتر از کاربرد عصاره گل کلم بود.

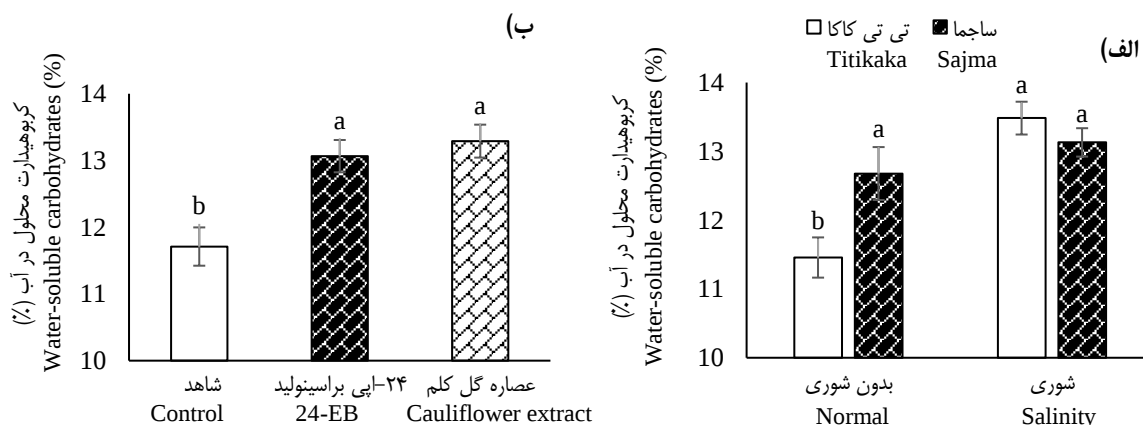
کربوهیدرات‌های محلول در آب

بالا بودن درصد کربوهیدرات‌های محلول در آب یکی از تعیین کننده‌ترین شاخص‌های کیفیت علوفه به حساب می‌آید (Humphreys, 1999). نتایج مقایسه میانگین درصد کربوهیدرات‌های محلول در آب نشان می‌دهد که درصد این مواد در رقم متحمل تی تی کاکا در شرایط تنش به‌طور معنی داری افزایش پیدا کرد، در حالی که تفاوت معنی داری بین شرایط نرمال و تنش شوری در رقم حساس ساچما مشاهده نشد (شکل ۱۲-الف). همچنین نتایج نشان داد که محلول پاشی به‌طور معنی داری باعث افزایش درصد کربوهیدرات‌های محلول در آب می‌شود و جالب اینکه بین دو محلول از نظر افزایش درصد کربوهیدرات‌های محلول در آب تفاوت معنی داری وجود نداشت (شکل ۱۲-ب).

کربوهیدرات‌های محلول در آب علاوه بر نقش مهمی که در افزایش کیفیت علوفه دارند، اثر بالقوه‌ای در مقاومت به سرما و مقاومت به چرای دام نیز دارا هستند، بنابراین از آن‌ها به عنوان مهم‌ترین ویژگی کیفی بعد از قابلیت هضم نام برده می‌شود (Humphreys, 1999). در بررسی حاضر، تحت تنش شوری، درصد کربوهیدرات‌های محلول در آب علوفه افزایش داشت. این نتایج هم‌راستا با یافته‌های توکاس و همکاران (Tokas et al., 2021) است.

فیبر خام

محتوای فیبر کم در کنار محتوای پروتئین بالا، در افزایش قابلیت هضم و خوش خوراکی علوفه مؤثر بوده و موجب افزایش کیفیت آن می‌شود (Ferreira et al., 2015). نتایج نشان داد که شوری به‌طور

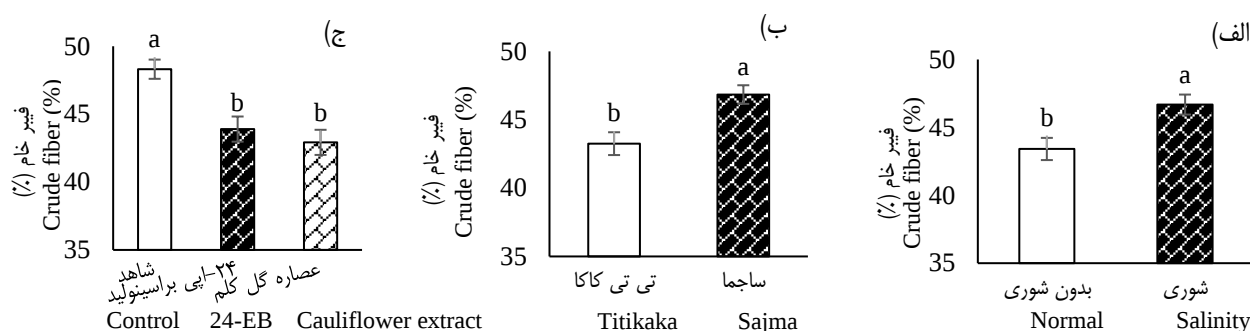


شکل ۱۲- مقایسه میانگین کربوهیدرات‌های محلول در آب علوفه تحت اثر شوری × رقم (الف) و محلول پاشی (ب).

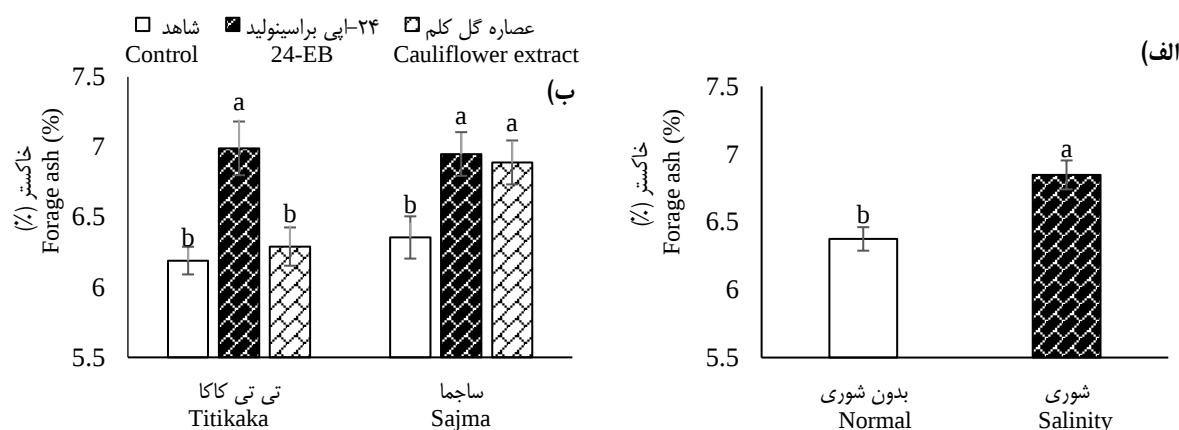
Figure 12- Mean comparison of water-soluble carbohydrates in effect of salinity × cultivar (a) and foliar application (b).

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند (Error Bars=±SD).

Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).



شکل ۱۳- مقایسه میانگین تغییرات فیبر خام علوفه کینوا تحت تأثیر شوری (الف)، رقم (ب) و محلول پاشی (ج)
Figure 13- Mean comparison of crude fiber in effect of salinity (a) cultivar (b) and foliar application (c)
(Error Bars= $\pm$ SD).
حروف غیرمشابه نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد می باشند (Error Bars = $\pm$ SD).
Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = $\pm$ SD).



شکل ۱۴- مقایسه میانگین تغییرات خاکستر علوفه کینوا تحت اثر شوری (الف) و رقم $\times$ محلول پاشی (ب)
Figure 14- Mean comparison of forage ash in effect of salinity (a) and foliar application (b)
(Error Bars= $\pm$ SD).
حروف غیرمشابه نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد می باشند (Error Bars = $\pm$ SD).
Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = $\pm$ SD).

الیاف نامحلول

الیاف نامحلول در شوینده اسیدی

مقایسه میانگین الیاف نامحلول در شوینده اسیدی نشان می دهد که تنش شوری موجب افزایش این نوع الیاف شد، هرچند این مقدار افزایش در شاهد (بدون محلول پاشی) در رقم متحمل تی تی کاکا معنی دار نبود (شکل ۱۵).

همچنین نتایج نشان می دهد که محلول پاشی با هر دو ماده تعدیل کننده تنش شوری، در کاهش این نوع الیاف مؤثر بودند، باین حال در شرایط تنش شوری برعکس محلول پاشی با ۲۴-ای پی-براسینولید که بر کاهش مقدار الیاف رقم متحمل تأثیر معنی داری نداشت، این محلول در رقم حساس ساجما باعث کاهش معنی دار الیاف گردید. مقایسه دو نوع محلول به کاررفته در پژوهش نشان

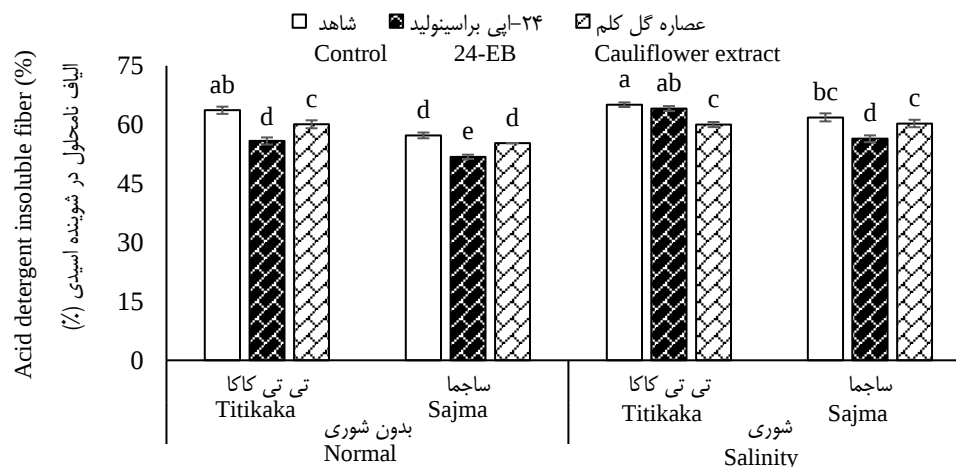
می دهد که محلول ۲۴-ای پی براسینولید بیشتر از عصاره موجب کاهش این الیاف می شود.

الیاف نامحلول در شوینده خنثی

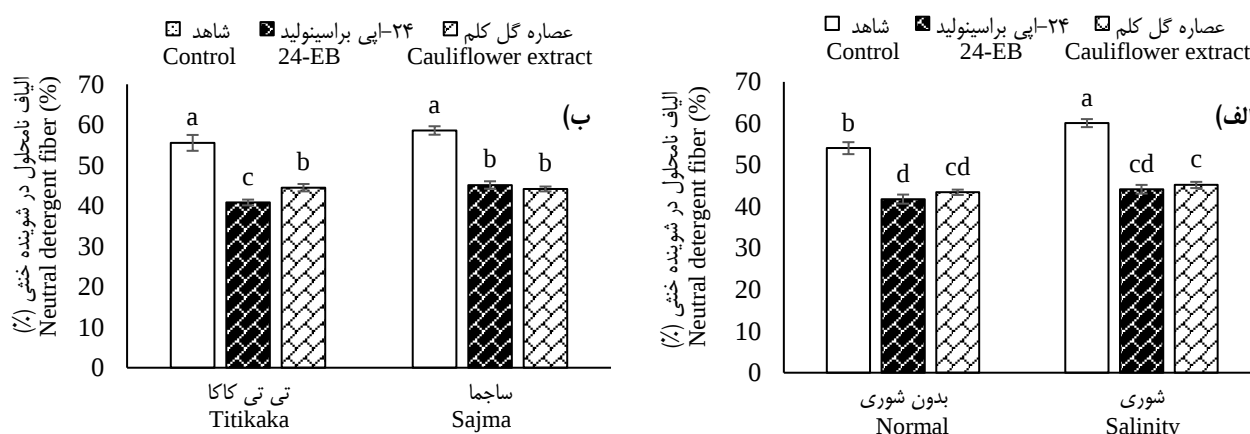
نتایج نشان می دهد که شوری موجب افزایش الیاف نامحلول در شوینده خنثی می شود، این افزایش در شاهد (بدون محلول پاشی) معنی دار، ولی در محلول پاشی با مواد تعدیل کننده تنش شوری از نظر آماری بی معنی بود (شکل ۱۶-الف). لذا به نظر می رسد که محلول پاشی با مواد تعدیل کننده تنش شوری، به طور مؤثری از تولید الیاف نامحلول در شوینده خنثی در شرایط تنش شوری جلوگیری می کند. مقایسه اثر دو محلول مورد استفاده نشان می دهد که تفاوت معنی داری بین این دو محلول از نظر کاهش اثرات سوء تنش بر افزایش مقدار الیاف نامحلول در شوینده خنثی وجود نداشته و می توان

تی-تی کاکا، محلول ۲۴-اپی براسینولید به طور معنی داری بهتر از عصاره در کاهش این نوع الیاف مؤثر بود (شکل ۱۶-ب).

آن‌ها را به جای هم به کار برد. نتایج مقایسه میانگین رقم در محلول پاشی نشان می‌دهد که در رقم حساس ساجما، تفاوت آماری بین دو محلول مورد استفاده وجود نداشت، اما در رقم متحمل



شکل ۱۵- مقایسه میانگین تغییرات الیاف نامحلول در شوینده اسیدی علوفه تحت اثر شوری × رقم × محلول پاشی
Figure 15- Mean comparison of acid detergent insoluble fiber in effect of salinity × cultivar × foliar application
 حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند (Error Bars=±SD).
 Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).



شکل ۱۶- مقایسه میانگین تغییرات الیاف نامحلول در شوینده خنثی علوفه کینوا تحت اثر متقابل شوری × محلول پاشی (الف) و رقم × محلول پاشی (ب)

Figure 16- Mean comparison of neutral detergent fiber in effect of salinity × foliar application (a) and cultivar × foliar application (b)

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند (Error Bars=±SD).
 Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level (Error Bars = ±SD).

در شوینده اسیدی تحت تأثیر شرایط محیطی و اکولوژیک قرار می‌گیرد و معرف مقادیر لیگنین و سلولز گیاه بوده که با افزایش لیگنین هضم‌پذیری کاهش می‌یابد. الیاف نامحلول در شوینده خنثی شامل لیگنین، سلولز و همی سلولز است و شاخصی برای بیان میزان دیواره سلولی گیاه و نیز

الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و الیاف نامحلول در شوینده خنثی از مهم‌ترین عوامل برای سنجش کیفیت علوفه هستند. علوفه‌هایی با مقادیر کمتر الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و شوینده خنثی، به دام اجازه مصرف بیشتر علوفه خشک را می‌دهند (Masters, Tiong, Vercoe, & Norman, 2010). الیاف نامحلول

در آب و فیبر خام) افزایش یافت. محلول پاشی ۲۴-آپی براسینولید و عصاره گل کلم باعث بهبود ویژگی‌های ریخت‌شناسی، کلروفیل کل، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب برگ، پرولین، فنل و کربوهیدرات‌های محلول برگ و افزایش ویژگی‌های کیفی علوفه (درصد ماده خشک قابل هضم، پروتئین خام، درصد خاکستر و کربوهیدرات‌های محلول در آب) و کاهش پراکسید هیدروژن و منفی مرتبط با کیفیت علوفه (الیاف نامحلول در شوینده اسیدی، الیاف نامحلول در شوینده خنثی و فیبر خام) شد. با توجه به نتایج کلی، استفاده از دو محلول ضد تنش به خصوص ۲۴-آپی براسینولید به طور قابل توجهی آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش شوری را با کاهش پراکسید هیدروژن و افزایش فعالیت آن‌تی اکسیدان‌های غیرآنزیمی بهبود بخشید. رقم تی‌تی‌کاکا در مقابل اثرات منفی تنش شوری بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی، مقاومت بیشتری نسبت به رقم ساجما داشت و رقم ساجما تحت محلول پاشی عصاره گل کلم و رقم تی‌تی‌کاکا تحت محلول پاشی ۲۴-آپی براسینولید، واکنش بهتری نسبت به شرایط شور نشان دادند. بنابراین به منظور بهبود رشد و کیفیت علوفه و کاهش اثرات منفی تنش شوری، محلول پاشی توسط ۲۴-آپی براسینولید و عصاره گل کلم در هر دو رقم تی‌تی‌کاکا و ساجما مناسب خواهد بود.

عامل مهمی برای تعیین میزان خوردن دام محسوب می‌شود (Buxton & Brasche, 1991). الیاف نامحلول در شوینده خنثی رابطه معکوسی با قابلیت هضم مواد خوراکی دارد و غلظت دیواره سلولی را نشان می‌دهد (Mc Donald, Edwards, Greanhalgh, & Morgan, 1995). هرچه مقدار الیاف نامحلول در شوینده خنثی بیشتر باشد، کیفیت علوفه کاهش پیدا کرده و پتانسیل خوردن علوفه توسط دام کاهش می‌یابد (Dianati et al., 2015; Fisher & Burns, 1987). براساس نتایج بررسی حاضر مقدار الیاف نامحلول در شوینده خنثی علوفه تحت تنش شوری نسبت به عدم شوری افزایش داشت.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تحت تنش شوری ویژگی‌های مورفولوژیک (طول ریشه، ارتفاع بوته و وزن‌های خشک ریشه، شاخساره و دانه)، کلروفیل کل، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب برگ و ماده خشک قابل هضم علوفه کاهش پیدا کرد، درحالی‌که مقدار پرولین، فنل، کربوهیدرات‌های محلول و پراکسید هیدروژن و ویژگی‌های مرتبط با کیفیت علوفه (پروتئین خام، الیاف نامحلول در شوینده اسیدی، الیاف نامحلول در شوینده خنثی، درصد خاکستر، کربوهیدرات‌های محلول

References

- Abdellatif, A. S. A. (2018). Chemical and technological evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivated in Egypt. *Acta Scientific Nutritional Health*, 2, 42-53.
- Ahmad, P., Abass Ahanger, M., Nasser Alyemeni, M., Wijaya, L., Alam, P., & Ashraf, M. (2018). Mitigation of sodium chloride toxicity in *Solanum lycopersicum* L. by supplementation of jasmonic acid and nitric oxide. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 64-72. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1420830>
- Akbari, M., Toorchi, M., & Shakiba, M. R. (2016). The effects of sodium chloride stress on proline content and morphological characteristics in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Biological Forum*, 8(1), 379-385.
- Alan, B. (2011). *Quinoa an ancient crop to contribute to world food security*. 37th FAO Conference.
- Albaladejo, I., Egea, I., Morales, B., Flores, F. B., Capel, C., & Lozano, R. (2018). Identification of key genes involved in the phenotypic alterations of res (restored cell structure by salinity) tomato mutant and its recovery induced by salt stress through transcriptomic analysis. *BMC Plant Biology*, 18(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1436-9>
- AOAC. (1999). In: P. Cunniff (Ed.). Official methods of analysis of the association of official analytical chemists' 16th Ed. AOAC International Gaithersburg MD USA.
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Bates, L. S., Waldren, R. P. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2006). *Chenopodium quinoa* - An Indian perspective. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.04.002>
- Buxton, D. R., & Brasche, M. R. (1991). Digestibility of structural carbohydrates in cool-season grass and legume forages. *Crop Science*, 31(5), 1338-1345.
- Cheraghi, M., Hatamnia, A. A. & Ghanbari, F. (2023). Effects of salinity stress on calendula (*Calendula officinalis* L.) by exogenous application of melatonin. *Plant Process and Function*, 12(54), 21-37. (in Persian with English abstract)
- Chien, S. W. C., Liao, J. H., Wang, M. C., & Mannepalli, M. R. (2009). Effect of Cl^- , SO_4^{2-} and fulvate anions on Cd^{2+} free ion concentrations in simulated rhizosphere soil solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 172(2-3), 809-817. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.076>

13. Claussen, W. (2005). Proline as a measure of stress in tomato plants. *Plant Science*, 168(1), 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.039>
14. de Oliveira, V. P., Lima, M. D. R., da Silva, B. R. S., Batista, B. L., & da Silva Lobato, A. K. (2019). Brassinosteroids confer tolerance to salt stress in Eucalyptus urophylla plants enhancing homeostasis antioxidant metabolism and leaf anatomy. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 557-573. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9870-3>
15. Deyantitilki, G. A., Salehi, S., & Sadati, E. (2015). Effect of salinity stress (Na_2SO_4) on forage quality of *Medicago polymorpha* and *Medicago scutellata*. *Watershed Management Researches (Pajouhesh-va-Sazandegi)*, 28(107), 57-65.
16. FAO. (2024). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
17. Farzi-Aminabad, R., Nasrollah Zadeh, S., & Ghassemi-Golezani, K. (2021). Response of sunflower in water deficit and foliar application of putrescine and 24-epibrassinolide. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2), 289-302. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/saps.2021.13110>
18. Ferreira, J. F., Cornacchione, M. V., Liu, X., & Suarez, D. L. (2015). Nutrient composition forage parameters and antioxidant capacity of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in response to saline irrigation water. *Agriculture*, 5(3), 577-597. <https://doi.org/10.3390/agriculture5030577>
19. Firoozeh, R., Khavarinejad, R., Najafi, F., & Saadatmand, S. (2019). Effects of gibberellin on contents of photosynthetic pigments proline phenol and flavonoid in savory plants (*Satureja hortensis* L.) under salt stress. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 31(4), 894-908. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1397.31.4.12.4>
20. Fisher, D. S., & Burns, J. C. (1987). Quality analysis of summer-annual forages. II. Effects of forage carbohydrate constituents on silage fermentation 1. *Agronomy Journal*, 79(2), 242-248. <https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900020014x>
21. Foti, C., Khah, E. M., & Pavli, O. I. (2019). Germination profiling of lentil genotypes subjected to salinity stress. *Plant Biology*, 21(3), 480-486. <https://doi.org/10.1111/plb.12714>
22. 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>
23. Humphreys, M. O. (1999). Water-soluble carbohydrates in perennial ryegrass breeding. *Grass Forage Science*, 44, 423-430. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1989.tb01932.x>
24. Ismail, A. M., & Horie, T. (2017). Genomics physiology and molecular breeding approaches for improving salt tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 68, 405-434. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042916-040936>
25. Julkowska, M. M., Koevoets, I. T., Mol, S., Hoefslot, H., Feron, R., & Tester, M. A. (2017). Genetic components of root architecture remodeling in response to salt stress. *The Plant Cell*, 29(12), 3198-3213. <https://doi.org/10.1105/tpc.16.00680>
26. Kagale, S., Divi, U. K., Krochko, J. E., Keller, W. A., & Krishna, P. (2007). Brassinosteroid confers tolerance in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica napus* to a range of abiotic stresses. *Planta*, 225(2), 353-364. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0361-6>
27. Kaymakanova, M., & Stoeva, N. (2008). Physiological reaction of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) to salt stress. *General and Applied Plant Physiology*, 34, 177-188.
28. Liang, W., Ma, X., Wan, P., & Liu, L. (2018). Plant salt-tolerance mechanism: A review. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 495(1), 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.11.043>
29. Lopez-Gomez, M., Hidalgo-Castellanos, J., Lluch, C., & Herrera-Cervera, J. A. (2016). 24-Epibrassinolide ameliorates salt stress effects in the symbiosis *Medicago truncatula*-*Sinorhizobium meliloti* and regulates the nodulation in cross-talk with polyamines. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.017>
30. Maia Júnior, S. D. O., Andrade, J. R. D., Nascimento, R. D., Lima, R. F. D., Bezerra, C. V. D. C., & Ferreira, V. M. (2022). Brassinosteroid application increases tomato tolerance to salinity by changing the effects of stress on membrane integrity and gas exchange. *Acta Scientiarum Agronomy*, 44, 1-12. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.55647>
31. Masters, D., Tiong, M., Vercoe, P., & Norman, H. (2010). The nutritive value of river saltbush (*Atriplex amnicola*) when grown in different concentrations of sodium chloride irrigation solution. *Small Ruminant Research*, 91(1), 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.10.019>
32. Mc Donald, P., Edwards, R. A., Greanhalgh, J. F. D., & Morgan, C. A. (1995). *Animal Nutrition*. Addison Wesley Longman Inc. UK. ISE reprint. 607.
33. Melchiorre, M., Quero, G. E., Parola, R., Racca, R., Trippi, V. S. & Lascano, R. (2009). Physiological characterization of four model Lotus diploid genotypes: *L. japonicus* (MG20 and Gifu) *L. filicaulis* and *L. burtii*

- under salt stress. *Plant Science*, 177(6), 618-628. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.09.010>
34. Mezni, M., Albouchi, A., Bizid, E., & Hamza, M. (2010). Minerals uptake organic osmotica contents and water balance in alfalfa under salt stress. *Journal of Phytology*, 2(11), 1-12.
 35. Mohammadi Khalifelouiy, Z., Abbasifar, A. R., Khadivi, A., & Akramian, M. (2020). The effect of proline and 24-epibrassinolide on growth indices and biochemical characteristics of the summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 32(4), 925-940. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1398.32.4.10.9>
 36. Oliveira Neto, C. F. D., Lobato, A. K. D. S., Gonçalves-Vidigal, M. C., Costa, R. C. L. D., Santos Filho, B. G. D., Alves, G. A. R., & Lopes, M. S. (2009). Carbon compounds and chlorophyll contents in sorghum submitted to water deficit during three growth stages. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 7(3,4), 588-593.
 37. Otie, V., Udo, I., Shao, Y., Itam, M. O., Okamoto, H., An, P., & Eneji, E. A. (2021). Salinity effects on morpho-physiological and yield traits of soybean (*Glycine max* L.) as mediated by foliar spray with brassinolide. *Plants*, 10(3), 541. <https://doi.org/10.3390/plants10030541>
 38. Ouji, A., El-Bok, S., Mouelhi, M., Younes, M. B., & Kharrat, M. (2015). Effect of salinity stress on germination of five Tunisian lentil (*Lens culinaris* L.) genotypes. *European Scientific Journal*, 11(21), 63-75.
 39. Panda, D., Ghosh, D. C., & Kar, M. (2013). Effect of salt stress on the pigment content and yield of different rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 4(3), 431-434.
 40. Parvin, K., Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Mohsin, S. M., & Fujita, M. (2019). Quercetin mediated salt tolerance in tomato through the enhancement of plant antioxidant defense and glyoxalase systems. *Plants*, 8(8), 247. <https://doi.org/10.3390/plants8080247>
 41. Pavli, O. I., Foti, C., Skoufogianni, G., Karastergiou, G., & Panagou, A. (2021). Effect of salinity on seed germination and seedling development of soybean genotypes. *International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*, 27(2), 556210. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2021.27.556210>
 42. Pourasadollahi, A., Siosemardeh, A., Hosseiniapanahi, F., & Sohrabi, Y. (2020). Effect of spraying of growth regulators on water use efficiency some osmolites and physiological traits of potato in drought stress conditions. *Plant Process and Function*, 9(35), 329-345. (in Persian with English abstract)
 43. Pulvento, C., Jacobsen, S. E., Alandia, G., Prins, U., Andria, R., Sellami, M. H., Grimberg, A., Carlsson, A. S., Capannini, S., & Lavini, A. (2016). *Evaluation of quinoa adaptability under European conditions to enhance high quality food protein production*. In Proceedings of the Quinoa for Future Food and Nutrition Security in Marginal Environments Conference Dubai United Arab Emirates. 28.
 44. Qiu, Y., Wang, Y., Fan, Y., Hao, X., Li, S., & Kang, S. (2023). Root yield and quality of alfalfa affected by soil salinity in northwest China. *Agriculture*, 13(4), 750. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040750>
 45. Rady, M. M. (2011). Effect of 24-epibrassinolide on growth yield antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress. *Scientia Horticulturae*, 129(2), 232-237. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.035>
 46. Ramaswamy, A., & Seeta, R. R. S. (2018). Effect of salinity stress on seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes. *International Journal of Biology Research*, 3(1), 70-75.
 47. Ruiz, K. B. S., Biondi, R., Oses, I. S., Acuña-Rodríguez, I. S., Antognoni, F., Martinez-Mosqueira, E. A., Molina-Montenegro, M. A., Coulibaly, A., Canahua-Murillo, A., Pinto, M., Zurita-Silva, A., & Bazile, D. (2014). Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 349-359. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0195-0>
 48. Sasse, J. M. (2003). Physiological actions of brassinosteroids: An update. *Journal of Plant Growth Regulation*, 22(4), 276-288. <https://doi.org/10.1007/s00344-003-0062-3>
 49. Shamon, M. S., El-Awadi, M. E., Gergis, M. D., & El-Rorkiek, G. A. (2020). Physiological role of brassinosteroids and cauliflower extract on quinoa plant grown under sandy soil. *Asian Journal of Applied Sciences*, 13(2), 68-75. <https://doi.org/10.3923/ajaps.2020.68.75>
 50. Shin, Y. K., Bhandari, S. R., Cho, M. C., & Lee, J. G. (2020). Evaluation of chlorophyll fluorescence parameters and proline content in tomato seedlings grown under different salt stress conditions. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 61, 433-443. <https://doi.org/10.1007/s13580-020-00231-z>
 51. Singh, M., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2019). Nitrogen alleviates salinity toxicity in *Solanum lycopersicum* seedlings by regulating ROS homeostasis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 466-476. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.004>
 52. Su, Q., Zheng, X., Tian, Y., & Wang, C. (2020). Exogenous brassinolide alleviates salt stress in *Malus hupehensis* Rehd. by regulating the transcription of NHX-Type Na⁺(K⁺)/H⁺ antiporters. *Frontiers in Plant Science*, 11(38), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00038>
 53. Suyama, H., Benes, S. E., Robinson, P. H., Grattan, S. R., Grieve, C., & Mand Getachew, G. (2007). Forage yield and quality under irrigation with saline-sodic drainage water: Greenhouse evaluation. *Agricultural Water Management*, 88(1-3), 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.011>
 54. Swamy, K., Rao, N. S., & Ram, S. (2010). Effect of brassinosteroids on rooting and early vegetative growth of

- Coleus [Plectranthus forskohlii (Willd.) Briq.] stem cuttings. *Indian Journal of Natural Products Resources*, 1(1), 68-73.
55. Tavoosi, M., Anafjeh, Z., & Mahdavi Majd, J. (2021). Effect of different salinity levels on germination indices of 20 new quinoa genotypes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(3), 837-847. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2987.1772>
56. Tawaha, K., Alali, F. Q., Gharaibeh, M., Mohammad, M., & El-Elmat, T. (2007). Antioxidant activity and total phenolic content of selected Jordanian plant species. *Food Chemistry*, 104(4), 1372-1378. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.064>
57. Teakle, N. L., & Tyerman, S. D. (2010). Mechanisms of Cl-transport contributing to salt tolerance. *Plant Cell and Environment*, 33(4), 566-589. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02060.x>
58. Tokas, J., Punia, H., Malik, A., Sangwan, S., Devi, S., & Malik, S. (2021). Growth performance nutritional status forage yield and photosynthetic use efficiency of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under salt stress. *Range Management and Agroforestry*, 42(1), 59-70.
59. Turner, N. C. (1981). Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil*, 58, 339-366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>
60. Vardhini, B. V. (2012). Application of brassinolide mitigates saline stress of certain metabolites of sorghum grown in Karaikal. *Journal of Phytology*, 4(2). 1-4.
61. Verma, V., Ravindran, P., & Kumar, P. P. (2016). Plant hormone-mediated regulation of stress responses. *BMC Plant Biology*, 16(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0771-y>
62. Wani, A. S., Tahir, I., Ahmad, S. S., Dar, R. A., & Nisar, S. (2017). Efficacy of 24-epibrassinolide in improving the nitrogen metabolism and antioxidant system in chickpea cultivars under cadmium and/or NaCl stress. *Scientia Horticulturae*, 225, 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.06.063>
63. Wu, W., Zhang, Q., Ervin, E. H., Yang, Z., & Zhang, X. (2017). Physiological mechanism of enhancing salt stress tolerance of perennial ryegrass by 24-epibrassinolide. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1017, 1-11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01017>
64. Wu, X. X., Ding, H. D., Zhu, Z. W., Yang, S. J., & Zha, D. S. (2012). Effects of 24-epibrassinolide on photosynthesis of eggplant (*Solanum melongena* L.) seedlings under salt stress. *African Journal of Biotechnology*, 11(35), 8665-8671. <http://doi.org/10.5897/AJB11.3416>
65. Xue-feng LIN, L. X., Hong-tao XIE, X. H., Mu-kui Yu, Y. M., & Shun-Wei Chen, C. S. (2018). Morphological and physiological response and salt-tolerance differences of three coastal plants under salt stress. *Forest Research, Beijing*, 31(3), 95-103.
66. Yang, A. J., Anjum, S. A., Wang, L., Song, J. X., Zong, X. F., Lv, J., & Wang, S. G. (2018). Effect of foliar application of brassinolide on photosynthesis and chlorophyll fluorescence traits of *Leymus chinensis* under varying levels of shade. *Photosynthetica*, 56, 873-883. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0742-z>
67. Yusuf, M., Fariduddin, Q., Khan, T. A., & Hayat, S. (2017). Epibrassinolide reverses the stress generated by combination of excess aluminum and salt in two wheat cultivars through altered proline metabolism and antioxidants. *South African Journal of Botany*, 112, 391-398. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.06.034>
68. Zahedi, S. M., Asgarian, Z. S., Gholami, R., & Karami, F. (2019). Effect of 24- epibrassinolide foliar application on the "Camarosa" strawberry plant growth and fruit yield under salinity stress condition in soilless culture. *Journal of Plant Production Research*, 26(1), 169-183. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jopp.2019.14493.2300>
69. Zhang, J., Jia, W., Yang, J., & Ismail, A. M. (2006). Role of ABA in integrating plant responses to drought and salt stresses. *Field Crops Research*, 97(1), 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.08.018>
70. Zhang, Q., & Dai, W. (2019). Plant response to salinity stress. In *Stress, Physiology of Woody Plants*. 155-173. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429190476>
71. Zheng, Q., Liu, J., Liu, R., Wu, H., Jiang, C., Wang, C., & Guan, Y. (2016). Temporal and spatial distributions of sodium and polyamines regulated by brassinosteroids in enhancing tomato salt resistance. *Plant and Soil*, 400, 147-164. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2712-1>

The Effect of Foliar Applications of Fe and Salicylic Acid on Sesame (*Sesamum indicum* L.) under Water Deficit Conditions

M. B. Amiri^{1,2*}, M. Sepehri Bimorghi³, A. Mirzaeian²

1- Department of Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Gonabad, Gonabad, Iran

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

3- Medicinal Plants and Drugs Research Institute, Beheshti University of Tehran, Tehran, Iran

(*- Corresponding author's Email: amiri@gonabad.ac.ir, mb.amiri@um.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 28 January 2024
Revised: 27 February 2025
Accepted: 11 March 2025
Available Online: 12 April 2025

Amiri, M. B., Sepehri Bimorghi, M., & Mirzaeian, A. (2025). The effect of foliar applications of Fe and salicylic acid on sesame (*Sesamum indicum* L.) under water deficit conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 227-240. (In Persian with English abstract)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.86586.1304>

Introduction

Sesame, with the scientific name *Sesamum indicum* L., is a member of the Pedaliaceae family. It is one of the oldest and most popular oilseeds known in the world and has the highest oil and seed protein content among oilseed plants. This plant is typically cultivated as a drought-resistant plant in arid and semi-arid regions, however, there have been reports of a significant effect of deficit irrigation on sesame yield and a decrease in the number of capsules per plant, number of seeds per plant, thousand-seed weight, grain yield, and biological yield under drought stress compared to full irrigation. Plants are constantly exposed to various stresses, and drought stress is the most important factor limiting crop yield in many parts of the world. Given that most of Iran's oil needs are imported and the limited water resources, the development of water-resistant oilseed crops is essential. The application of micronutrients through foliar application can improve plant growth under stress conditions. Among the micronutrients, Fe is particularly important for many metabolic activities in plants; therefore, plants require sufficient amounts of this element to continue their growth. Fe deficiency causes a significant reduction in the yield and quality of the crop. Salicylic acid is a plant regulator that is effective in increasing plant tolerance to stresses such as drought and plays a fundamental role in regulating plant physiological processes. Increased germination, induction of flowering, improved growth and development, increased yield and fruit yield, inhibition of ethylene synthesis, and effects on plant activities including stomatal opening and closing, water relations, membrane stability, nutrient absorption, and activation of disease resistance factors are some of the cases attributed to the use of salicylic acid. Given Iran's arid and semi-arid climate, and the importance of sesame as a valuable crop in tropical and subtropical regions with wide applications in the food and cosmetic industries, this study aimed to investigate the effects of foliar application of iron (Fe) and salicylic acid on the growth and yield of sesame under deficit irrigation conditions. Despite the significance of ecological approaches, limited research has addressed drought stress mitigation in sesame cultivation using such inputs.

Materials and Methods

In order to investigate the response of sesame to drought stress, and especially the effect of foliar spraying with iron and salicylic acid, an experiment was conducted as a factorial split-plot based on a randomized complete block design with three replications at the research farm of the Faculty of Agriculture, Gonabad



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.86586.1304>

University in 2020-2021. Three different irrigation levels (full irrigation, cut-off irrigation at the podding stage, and cut-off irrigation at the flowering stage) were applied to the main plots and a factorial combination of foliar spraying and non-foliar spraying of salicylic acid and Fe (iron) was applied to the subplots. At the end of the growing season, with the beginning of the seed ripening stage and the drying of the plant's aerial parts, plants of 0.1 m² from each experimental plot were randomly selected and traits such as plant height, shoot dry weight, number of pods per plant, number of seeds per pod, number of seeds per plant, seed weight per plant, and 1,000-seed weight were measured. To determine the seed yield, biological yield, and harvest index, after removing the marginal effect, plants from the entire experimental plot were harvested and their total and seed weights were determined. Data analysis of variance (ANOVA) and graphing were performed using Ver. SAS 9.4 and MS Excel Ver. 11 and comparison of treatment means was performed using Duncan's multiple range test at a probability level of 5%.

Results and Discussion

The maximum plant height was observed under the combined application of salicylic acid and Fe with full irrigation (82.6 cm), while the minimum plant height was recorded in the treatment without salicylic acid and Fe application under cut-off irrigation at the flowering stage (42.6 cm). The highest number of seeds per capsule was obtained in the treatment with combined foliar application of salicylic acid and Fe under cut-off irrigation at the podding stage (56.6), whereas the lowest value for this trait was observed in the absence of salicylic acid and Fe application under cut-off irrigation at the flowering stage (22.7 seeds per capsule). Cut-off irrigation at the podding and flowering stages led to a reduction in seed yield by 39% and 55%, respectively, compared to full irrigation. Foliar application of iron increased seed yield by 18% compared to the non-application of Fe. The treatment involving cut-off irrigation at the podding stage, combined foliar application of salicylic acid and Fe, and separate foliar application of salicylic acid and Fe increased the harvest index by 16%, 7%, and 6%, respectively, compared to the non-application of foliar treatments.

Conclusion

In general, it appears that foliar application of 1 mM salicylic acid and 5 in 1000 Fe mitigated the adverse effects of cut-off irrigation at podding and flowering stages in sesame.

Keywords: Cut of irrigation, Harvest index, Micronutrients, Organic acid, Seed yield

مقاله پژوهشی

جلد ۲۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۲۴۰-۲۲۷

اثر محلول پاشی آهن و اسید سالیسیلیک بر خصوصیات رشدی و عملکرد کنگد (*Sesamum indicum* L.) در شرایط کم آبیاری

محمد بهزاد امیری^{۱*}، محمد سپهری بيمرغی^۳، عاطفه میرزائیانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

چکیده

یکی از اثرات تنش خشکی بر هم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاهان است. کاربرد عناصر غذایی مانند آهن به صورت محلول پاشی به دلیل تأثیر در افزایش مقاومت به تنش‌های غیرزیستی می‌تواند در کاهش خسارت ناشی از کمبود آب مؤثر باشد. اسید سالیسیلیک یکی از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است که در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌هایی هم‌چون خشکی مؤثر است. به منظور بررسی واکنش کنگد (*Sesamum indicum* L.) به خشکی به‌ویژه تأثیر محلول پاشی با آهن و اسید سالیسیلیک، آزمایشی در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه مجتمع آموزش عالی گناباد با سه تکرار انجام شد. سه سطح مختلف آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و از مرحله کپسول‌دهی تا انتهای فصل رشد) در کرت‌های اصلی، و محلول پاشی (یک میلی مولار) و عدم محلول پاشی اسید سالیسیلیک و ریزمغذی آهن (سه در هزار) به صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. بیشترین ارتفاع بوته در شرایط کاربرد همزمان اسید سالیسیلیک و آهن در آبیاری کامل (۸۲/۶۶ سانتی متر) و کمترین ارتفاع بوته در تیمار عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن و شرایط قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (۴۲/۶۶ سانتی متر) مشاهده شد. بیشترین تعداد دانه در کپسول در تیمار کاربرد همزمان محلول پاشی اسید سالیسیلیک و آهن در تیمار قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی (۵۶/۶۶) و کمترین مقدار این صفت در شرایط عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن و تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (۲۲/۷۷) دانه در کپسول) به دست آمد. با قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی و گل‌دهی، عملکرد دانه به ترتیب ۳۹ و ۵۵ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش یافت و محلول پاشی آهن باعث افزایش عملکرد دانه به میزان ۱۸ درصد نسبت به عدم مصرف آهن شد. تیمار قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی، محلول پاشی همزمان اسید سالیسیلیک و آهن و محلول پاشی جداگانه اسید سالیسیلیک و آهن، شاخص برداشت را به ترتیب ۱۶، ۷ و ۶ درصد نسبت به عدم کاربرد محلول پاشی افزایش داد. به طور کلی، به نظر می‌رسد که محلول پاشی یک میلی مولار اسید سالیسیلیک و پنج در هزار آهن، اثرات منفی قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و کپسول‌دهی در کنگد را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: اسید آلی، شاخص برداشت، عملکرد دانه، عناصر ریزمغذی، قطع آبیاری

مقدمه

است و در بین گیاهان دانه روغنی، دارای بالاترین میزان روغن و پرتتین دانه می‌باشد (Wei et al., 2015). کنگد حاوی کليه اسیدهای آمینه و اسیدهای چرب ضروری بوده و سرشار از ویتامین‌ها و مواد معدنی مانند کلسیم و فسفر می‌باشد (Saudy, Eb-Samad, El-Temsah, & El-Gabry, 2022). این گیاه به‌طور معمول به عنوان یک گیاه مناطق خشک و نیمه خشک و مقاوم به کم‌آبی کشت می‌شود، با این حال گزارش‌هایی مبنی بر تأثیر معنی‌دار آبیاری محدود، بر عملکرد کنگد و کاهش تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد کل تحت تأثیر تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل گزارش شده است (Ayobizadeh, Laei, Amini Dehghani, Sinaki, & Rezvan, 2020). گیاهان تحت شرایط طبیعی و زراعی به‌طور مداوم در معرض تنش‌های

کنجد با نام علمی *Sesamum indicum* L. از تیره کنگدیان^۴، یکی از قدیمی‌ترین و پرطرفدارترین دانه‌های روغنی شناخته شده دنیا

۱- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

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

۳- پژوهشکده گیاهان و مواد اولیه دارویی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

*- نویسنده مسئول:

(Email: amiri@gonabad.ac.ir, mb.amiri@um.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.86586.1304>

4- Pedaliaceae

از تنش خشکی در گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) (Soheili- Movahhed, Khomari, Sheikhzadeh, & Shokri, 2020) (Alizadeh, 2020)، خیار (*Cucumis sativus* L.) (Hoooshmand, Golabi, Alemzade, & Struve 2022) و گندم (*Triticum aestivum* L.) (Rajaie, 2022) نیز گزارش شده است. اسید سالیسیلیک یکی از تنظیم‌کننده‌های گیاهی است که در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌هایی هم‌چون خشکی مؤثر بوده و در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه دارای نقش اساسی می‌باشد. افزایش جوانه‌زنی، القاء گل‌دهی، بهبود رشدونمو، افزایش میزان محصول و عملکرد میوه، بازدارندگی سنتز اتیلن و تأثیر در فعالیت‌های گیاهی از جمله باز و بسته شدن روزنه‌ها، روابط آبی، پایداری غشاء، جذب عناصر غذایی و فعال شدن عامل ایجاد مقاومت به بیماری از مواردی است که به کاربرد اسید سالیسیلیک نسبت داده می‌شود (Hafeez et al., 2017; Ghassemi, Ghassemi-Golezani, & Zehtab Salami, 2019). اسید سالیسیلیک با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی، از آسیب به سلول‌ها در شرایط تنش خشکی جلوگیری می‌کند (Khan, Fatma, Per, 2015). این اسید با تأثیر بر کانال‌های یونی و پمپ‌های پروتونی در سلول‌های محافظ روزنه و کلر در شرایط تنش خشکی باعث تغییر در پتانسیل غشاء سلولی و خروج یون‌های پتاسیم از سلول‌های محافظ روزنه شده و در نهایت باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌گردد (Miura & Tada, 2014). در یک پژوهش، کاربرد ۲۰۰ پی‌پی‌ام اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی منجر به تولید بیشترین عملکرد دانه در کنجد شد (Ahmed & Ali, 2024). در پژوهشی دیگر، در شرایط تنش خشکی بهره‌وری آب آبیاری تحت تأثیر کاربرد یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، ۳۶ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (Jahan, Javadi, Hesami, & Amiri, 2021). کاربرد ۲۵ میلی‌گرم در لیتر اسید سالیسیلیک افزایش معنی‌دار تعداد کپسول در بوته، وزن خشک کپسول، وزن هزار دانه و عملکرد دانه کنجد را در مقایسه با شاهد در پی داشت (Alizadeh, Balouchi, & Yadavi, 2016). بهبود عملکرد دانه با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در سویا (*Glycine max* L.) (Daneshian, & Jahanbakhsh, 2017) و آفتابگردان (*Helianthus annuus*) (Hussain et al., 2009) گزارش شده است.

از آنجایی که کنجد عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با محدودیت منابع آبی روبه‌رو هستند کشت می‌شود و به‌منظور ارزیابی مقاومت گیاه به کم‌آبی در مراحل حساس رشد (گل‌دهی و کپسول‌دهی)، این پژوهش با هدف بررسی محلول‌پاشی آهن و اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های رشدی و عملکرد کنجد در شرایط کم‌آبیاری انجام شد.

مختلف قرار می‌گیرند و در این بین، تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد گیاهان زراعی در بسیاری از نقاط جهان می‌باشد (Arvin, Vafabakhsh, & Mazaheri, 2018). مطابق با گزارش سالانه واردات روغن نباتی گمرک جمهوری اسلامی ایران، میزان واردات روغن نباتی کشور در سال ۱۴۰۱ حدود ۱/۲ میلیون تن برآورد شده که مؤید این مطلب است که قسمت اعظم روغن مورد نیاز کشور از خارج وارد می‌شود (IRICA, 2021) و با توجه به محدودیت منابع آب، توسعه کشت دانه‌های روغنی مقاوم به کمبود آب ضروری به نظر می‌رسد (Kazemi, Khajehosseini, Nezami, & Eskandari, 2016).

یکی از اثرات مهم تنش خشکی، برهم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاه (از طریق کاهش حلالیت و کاهش جذب عناصر) است (Heidari, Gelich, Gorbani, & Baradaran Firozabadi, 2016). با کاربرد عناصر غذایی کم‌مصرف از طریق محلول‌پاشی می‌توان وضعیت رشد گیاه را در شرایط تنش بهبود بخشید (Rezaeichiane, Khoramdel, Molodi, & Rahimi, 2017). در بین عناصر کم‌مصرف، آهن برای انجام بسیاری از فعالیت‌های سوخت‌وسازی گیاهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ بنابراین گیاهان برای ادامه رشد خود نیاز به میزان کافی از این عنصر دارند. کمبود آهن بسته به عامل‌های پرشمار خاکی، محیطی و ژنتیکی گیاهان، سبب کاهش قابل ملاحظه عملکرد و کیفیت محصول می‌شود و تأمین کافی آهن از طریق بهبود فرآیندهای متابولیکی و افزایش کارایی فتوسنتز و سیستم آنتی‌اکسیدانی، تحمل گیاه به شرایط خشکی را افزایش می‌دهد (Pandey, Sanjay, & Yadav, 2010; Heidari et al., 2016). آهن در تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها مؤثر است؛ در شرایط تنش خشکی، گیاه برای کاهش از دست دادن آب، روزنه‌ها را می‌بندد، ولی بسته ماندن طولانی‌مدت روزنه‌ها، جذب دی‌اکسید کربن و در نتیجه فتوسنتز را کاهش می‌دهد و محلول‌پاشی آهن، هدایت روزنه‌ای را بهبود بخشیده و منجر به افزایش جذب دی‌اکسید کربن می‌شود (Mahmoodi Sourestani, Moghadam, & Farrokhi Firoozi, 2016). ایوب زاده و همکاران (Ayoubzadeh et al., 2020) بیان داشتند که بیشترین تعداد کپسول، تعداد دانه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد کل کنجد در تیمار محلول‌پاشی نانو کلات آهن به همراه اسید فولیک حاصل شد. در پژوهشی دیگر، محلول‌پاشی ۰/۱۵ درصد نانو‌اکسید آهن تعداد کپسول در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد کل و شاخص برداشت کنجد را تحت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید (Karamian Hasan Abadi, Eisvand, Danehvar, & Akbarpour, 2021). حیدری و همکاران (Heidari et al., 2016) اظهار داشتند که با کاربرد نانو اکسید آهن، عملکرد دانه در کنجد افزایش یافت. اثرات مثبت محلول‌پاشی آهن در کاهش خسارات ناشی

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر محلول پاشی اسید سالیسیلیک و آهن بر بعضی خصوصیات رشدی و عملکرد کنگد در شرایط کم آبیاری، آزمایشی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه آموزشی تحقیقاتی مجتمع آموزش عالی گناباد با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۶۰ متر از سطح دریا، به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. سه سطح مختلف آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و از مرحله کپسول‌دهی تا انتهای فصل رشد) در کرت‌های اصلی و کاربرد و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک (یک میلی‌مولار) (Jahan & Amiri, 2018)

و ریزمغذی آهن (پنج در هزار) (Ahmadi, Seyfi, & Amini, 2013) به صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. ابعاد کرت‌های اصلی ۸×۲ متر، ابعاد کرت‌های فرعی ۲×۲ متر، فاصله بین کرت‌ها ۰/۵ متر و فاصله بین بلوک‌ها یک متر در نظر گرفته شد. به منظور حفظ پایداری خاک، جهت آماده‌سازی زمین، تنها عملیات دیسک‌زنی با تأکید بر خاک‌ورزی حداقل مدنظر قرار گرفت و کلیه مراحل بعدی توسط کارگر و با بیل دستی انجام شد. قبل از شروع آزمایشات مزرعه‌ای، به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام گرفت (جدول ۱). اطلاعات هواشناسی منطقه مورد پژوهش در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Physiochemical properties of experimental soil

بافت Texture	نیتروژن کل Total nitrogen (%)	فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹)	پتاسیم Potassium (mg kg ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon (%)	اسیدیته pH	شوری EC (dS m ⁻¹)
شنی لومی Loam-sand	0.018	8	101	22.3	8.1	4.5

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی منطقه مورد پژوهش

Table 2- Meteorological information of research area

	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September
بارندگی Rainfall (mm)	0	49.5	0.5	0.5	0	0
متوسط دما ماهیانه Mean temperature in month (°C)	19.2	23.5	30.5	30.9	29.7	26.8
حداکثر دمای ماهیانه Maximum temperature in month (°C)	26.4	36.5	42.4	42.8	39.7	38.8
حداقل دمای ماهیانه Minimum temperature in month (°C)	3.3	13	18.9	17.2	16.7	15.4
میزان تبخیر و تعرق Evaporation and transpiration (mm)	259.4	282.1	460.3	434.2	404.2	348.1

کپسول‌دهی تا انتهای فصل رشد به ترتیب به مدت ۶۰ و ۳۰ روز در شرایطی اعمال گردید که براساس جدول اطلاعات هواشناسی (جدول ۲)، هیچ‌گونه بارندگی طی این مدت رخ نداد و خاک محل آزمایش از رطوبت چندانی برخوردار نبود. محلول پاشی اسید سالیسیلیک و آهن در مرحله شش تا هفت برگی (حدود ۳۰ روز پس از کاشت) (Jahan & Amiri, 2018) انجام شد. برای رسیدن به تراکم مناسب، پس از رسیدن گیاه به مرحله چهار برگی، عملیات تنک کردن صورت گرفت. به منظور مهار علف‌های هرز، چندین نوبت وچین دستی (به ترتیب ۱۵،

بذرهای کنگد با منشأ توده محلی از مزارع شهرستان گناباد تهیه و ۲۰ اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۰ در ردیف‌هایی به فاصله ۵۰ سانتی‌متر و با فاصله روی ردیف پنج سانتی‌متر (تراکم کاشت ۴۰ بوته در مترمربع) از یکدیگر کشت شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت به روش نشتی انجام شد و آبیاری‌های بعدی به فاصله هر هفت روز یک‌بار تا آخر فصل رشد بسته به تیمارهای آبیاری اعمال گردید. گل‌دهی و کپسول‌دهی در کنگد به ترتیب در تاریخ‌های ۲۰ تیرماه و ۲۰ مردادماه سال ۱۴۰۰ به وقوع پیوست و قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و

۳۰ و ۴۵ روز پس از کاشت) انجام شد. برای آماده‌سازی زمین و در طول دوره رشد (حدود ۱۲۰ روز)، هیچ‌گونه علف‌کش، آفت‌کش و قارچ‌کش شیمیایی استفاده نشد.

در اواخر فصل رشد (۲۰ شهریورماه ۱۴۰۰)، با آغاز مرحله رسیدگی دانه‌ها و خشک شدن اندام هوایی گیاه، بوته‌های ۰/۱ مترمربع از هر کرت آزمایشی به‌طور تصادفی انتخاب و صفاتی نظیر ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، تعداد دانه در بوته، وزن دانه در بوته و وزن هزار دانه اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن خشک اندام هوایی، بوته‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و سپس وزن آن‌ها برآورد شد و وزن دانه در بوته و وزن هزار دانه نیز تعیین گردید. جهت تعیین عملکرد دانه، عملکرد کل و شاخص برداشت، پس از حذف اثر حاشیه‌ای، بوته‌های تمام سطح کرت‌های آزمایشی برداشت و وزن کل و دانه آن‌ها تعیین گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها (ANOVA) و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS Ver. 9.4 و MS Excel Ver. 11 و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته و وزن خشک بوته

ارتفاع بوته در تیمارهای قطع آبیاری و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن به‌طور معنی‌داری با تیمار آبیاری کامل در شرایط کاربرد و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن تفاوت داشت (جدول ۳)؛ بیشترین ارتفاع بوته در شرایط کاربرد همزمان اسید سالیسیلیک و آهن در آبیاری کامل (سانتی‌متر ۸۲/۶۶) و کمترین ارتفاع بوته در شرایط عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن و تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (سانتی‌متر ۴۲/۶۶) به دست آمد (جدول ۴). در هر دو شرایط قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و کپسول‌دهی، کمترین مقدار ارتفاع بوته در شرایط عدم استفاده از محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن مشاهده شد (جدول ۴). کاربرد عنصر ریزمغذی آهن به‌طور معنی‌داری باعث افزایش ۱۴ درصدی وزن خشک بوته نسبت به تیمار عدم استفاده از این عنصر شد (جدول ۵). وزن خشک بوته در تیمار قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی تحت تأثیر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک قرار گرفت و محلول‌پاشی باعث افزایش ۳۰ درصدی وزن خشک بوته نسبت به عدم کاربرد آن شد (جدول ۶).

تنش خشکی باعث ایجاد رقابت بیش از حد بین بوته‌ها برای به دست آوردن آب می‌شود که این امر در نهایت منجر به کاهش تخصیص مواد فتوسنتزی به ساقه و کوتاهی گیاه می‌شود (Kalantari, Armin, & Marvi, 2021). احتمالاً محلول‌پاشی اسید

سالیسیلیک از طریق تأثیر بر آنزیم‌های کاتالاز و پروکسیداز (این آنزیم‌ها گونه‌های فعال اکسیژن را به آب و اکسیژن تجزیه نموده و مانع تجمع پراکسید هیدروژن می‌شوند و تنش اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی را کاهش می‌دهند) و سایر تنظیم‌کننده‌های اسمزی نظیر پرولین، گلیسین و بتائین (این ترکیبات به‌عنوان اسمولیت عمل نموده و منجر به حفظ ساختار پروتئین‌ها و غشاهای سلولی در شرایط خشکی شده و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهند) آثار ناشی از تنش خشکی را کاهش داده (Azhdar Afshari, Shekari, Afsahi, & Azikhani, 2016) و در نهایت منجر به افزایش ارتفاع بوته و وزن خشک در کنگد شد. به نظر می‌رسد که افزایش ارتفاع بوته و وزن خشک بوته در تیمارهای قطع آبیاری با محلول‌پاشی آهن احتمالاً به‌دلیل نقش اصلی آهن در متابولیسم کلرفیل باشد. آهن به‌عنوان کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌های دخیل در فعالیت‌های سلولی از قبیل فتوسنتز، تنفس و تمایز سلولی شرکت دارد و کارایی اندامک‌های فتوسنتزی را افزایش می‌دهد (Bybordi & Mamedov, 2010). هایل و همکاران (Hailu, Urga, Sori, Borona, & Tufa, 2018) نیز نشان دادند که کاهش میزان آب آبیاری بعد از گل‌دهی در کنگد سبب کاهش ارتفاع بوته شد. نتایج پالاوی و همکاران (Pallavi, Reena, Surabhi, & Sahu, 2022) نشان داد که کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط کم‌آبی باعث افزایش خصوصیات ریخت‌شناختی مانند ارتفاع بوته، تعداد شاخه در بوته، وزن برگ تر و تعداد کل برگ در نخود سبز (*Pisum sativum* L.) شد.

تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول

تعداد کپسول در بوته، تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن قرار گرفت (جدول ۳). تیمارهای قطع آبیاری به‌طور معنی‌داری باعث کاهش تعداد کپسول در بوته نسبت به آبیاری کامل شد. میانگین تعداد کپسول در قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی ۳۶/۸۸ عدد و میانگین تعداد کپسول در قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی ۳۰/۶۳ عدد نسبت به میانگین تعداد کپسول در آبیاری کامل کاهش نشان داد (جدول ۵). با وجود کاهش تعداد کپسول در تیمارهای قطع آبیاری (جدول ۵)، با کاربرد اسید سالیسیلیک تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد کپسول در بوته در تیمارهای مختلف آبیاری مشاهده نشد (جدول ۶).

پس از بررسی اثر متقابل محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عنصر ریزمغذی آهن با تیمار آبیاری مشخص شد که بیشترین تعداد دانه در کپسول در تیمار کاربرد همزمان محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن در تیمار قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی (۵۶/۶۶) و کمترین مقدار این صفت در شرایط عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن و تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (۲۲/۷۷) دانه در کپسول) به دست آمد

(جدول ۴)

جدول ۳- تجزیه واریانس برخی از خصوصیات رشدی و عملکرد کنگد تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و محلول پاشی آهن و اسید سالیسیلیک
 Table 3- Analysis of variance of some growth characteristics and yield in sesame effected by irrigation treatments and Fe and salicylic acid spraying

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	وزن خشک بوته Plant dry weight	تعداد کپسول در بوته Number of capsule per Plant	تعداد دانه در کپسول Number of seed in per capsule	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد کل Total yield	شاخص برداشت Harvest index
بلوک Block	2	48.68 ^{ns}	128.36 ^{ns}	125.79 ^{ns}	45.66 ^{ns}	96773.01 ^{ns}	1785132.78 ^{ns}	0.29 ^{ns}
آبیاری Irrigation	2	521.99 ^{**}	3885.36 ^{**}	4673.36 ^{**}	247.89 [*]	3600789.13 ^{**}	17263124.74 ^{**}	319.53 ^{**}
خطای اصلی Main error	4	104.94	30.69	56.89	55.51	194194.10	3391967.24	0.05
اسید سالیسیلیک Salicylic acid	1	718.53 ^{**}	367.36 ^{**}	840.96 ^{**}	1238.64 ^{**}	296552.85 ^{ns}	3357140.12 ^{ns}	15.08 ^{**}
آهن Fe	1	1429.26 ^{**}	684.69 ^{**}	1768.62 ^{**}	116.76 ^{ns}	498388.93 [*]	3351516.60 ^{ns}	16.40 ^{**}
آبیاری×اسید سالیسیلیک Irrigation×salicylic acid	2	133.12 ^{**}	216.19 [*]	214.18 ^{ns}	168.09 ^{ns}	72366.15 ^{ns}	868450.14 ^{ns}	2.98 ^{**}
آبیاری×آهن Irrigation × Fe	2	40.07 ^{ns}	71.02 ^{ns}	52.63 ^{ns}	125.64 ^{ns}	291375.28 [*]	3621879.34 ^{ns}	0.65 ^{**}
اسید سالیسیلیک×آهن Salicylic acid ×Fe	1	140.68 [*]	8.02 ^{ns}	143.98 ^{ns}	31.79 ^{ns}	101963.13 ^{ns}	3931560.89 ^{ns}	2.10 ^{**}
آبیاری×اسید سالیسیلیک×آهن Irrigation×salicylic acid×Fe	2	177.63 ^{**}	7.52 ^{ns}	27.64 ^{ns}	252.83 [*]	43958.02 ^{ns}	949640.06 ^{ns}	0.01 ^{ns}
خطای فرعی Sub error	18	25.158	38.95	93.84	55.73	86568.56	1204939.19	0.09
ضریب تغییرات CV (%)	-	7.4	14.0	25.8	16.1	24.2	21.7	1.3

*, **, ns: به ترتیب اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم اختلاف معنی دار
 * are **, ns: are significant at the probability levels of 5 and 1% and non-significant, respectively

رشدونمو، کاهش محتوای کلروفیل و پراکسیداز لیپیدها در غشاء سلولها می شود (Pallavi et al., 2022). نقش اصلی اسید سالیسیلیک در بهبود خصوصیات رشدی ممکن است به دلیل افزایش فعالیت آنزیمهای آنتی اکسیدانی که گیاه را از خسارت تنش اکسیداتیو حفظ می کند (Pallavi et al., 2022) یا کاهش سطوح (ROS) و پراکسیداسیون چربیها مثل نشت یون (Nazar, Iqbal, Syeed, & Khan, 2011) باشد. ایوبی زاده و همکاران (Ayobizadeh et al., 2017) گزارش کردند که کاربرد نانوکلات آهن موجب افزایش تعداد کپسول در بوته کنگد شد. همچنین گزارش شده است که نانواکسید آهن تعداد کپسول در بوته کنگد را ۳۵/۰۷ درصد نسبت به شاهد

کاهش تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در بوته با اعمال تنش خشکی با یافته های کرمیان حسن آبادی و همکاران (Karamian Hasan Abadi et al., 2021) مطابقت داشت که دلیل آن را به نقش تنش خشکی در کاهش تولید مواد فتوسنتزی، کاهش رشد رویشی و تولید شاخه های اصلی و فرعی و افزایش ریزش کپسول بوته مرتبط دانستند. اعمال تیمارهای تنش خشکی روی گیاه، موجب کاهش هدایت روزنه ای و به تبع آن کاهش تثبیت دی اکسید کربن و سرعت فتوسنتز می گردد. این عوامل باعث کاهش مشخصه های رشدی می شوند که ممکن است به دلیل کاهش جریان آب در آوندهای چوبی رخ داده و در نهایت منجر به کاهش تقسیم سلولی،

کپسول بنا شده (Kalantari *et al.*, 2021) و در نهایت تعداد دانه در بوته کاهش یافته است. حیدری و همکاران (Heidari *et al.*, 2016) اظهار داشتند که با کاربرد نانواکسید آهن، عملکرد دانه در کنجد افزایش یافت. افزایش تعداد دانه در بوته می‌تواند به نقش ریزمغذی آهن در بهبود صفات وابسته به عملکرد همچون تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول مرتبط باشد (Ayobizadeh *et al.*, 2017). کاربرد اسید سالیسیلیک موجب بهبود کلیه صفات مورد بررسی نه‌تنها در شرایط آبیاری کامل که در تنش‌های آبیاری شد. اسید سالیسیلیک به کاهش خسارت ناشی از تنش‌های غیرزیستی در گیاه کمک می‌کند (Ayobizadeh *et al.*, 2017; Pallavi *et al.*, 2022).

افزایش داد (Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021). به نظر می‌رسد که دلیل افزایش تعداد دانه در کپسول به نقش آهن در بهبود رشدونمو، ارتفاع بوته و فراهمی مواد فتوسنتزی مرتبط باشد (Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021; Ayobizadeh *et al.*, 2017). تعداد دانه در کپسول تحت تأثیر زمان قطع آبیاری قرار گرفت، به‌طوری‌که قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی به‌میزان بیشتری باعث کاهش تعداد دانه در کپسول شد. به نظر می‌رسد که کم بودن تعداد دانه در بوته در مرحله گل‌دهی به‌دلیل کاهش تعداد کپسول‌ها در بوته تحت تأثیر تیمار اعمال تنش باشد و با قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی، چون گیاه از ابتدای رشد زایشی با تنش کم‌آبی مواجه شده، احتمالاً سازوکار خودتنظیمی گیاه بر پایه تعداد محدودی دانه در

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن بر بعضی از خصوصیات کمی کنجد

Table 4- Mean comparison of interaction effect of irrigation and salicylic acid spraying and Fe spraying on some quantitative characteristics of sesame

		ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد دانه در کپسول Seed number per capsule
آبیاری کامل Full irrigation	آهن Fe	82.66 ^{a*}	52.77 ^{ab}
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	68.00 ^{bc}	48.50 ^{ab}
	عدم آهن Non Fe		
	آهن Fe	76.50 ^{ab}	39.22 ^b
	عدم اسید سالیسیلیک Non salicylic acid	71.66 ^{abc}	51.22 ^{ab}
	عدم آهن Non Fe		
قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی Cut-off irrigation at the flowering stage	آهن Fe	72.44 ^{abc}	49.77 ^{ab}
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	63.66 ^c	52.66 ^{ab}
	عدم آهن Non Fe		
	آهن Fe	67.33 ^{bc}	39.66 ^b
	عدم اسید سالیسیلیک Non salicylic acid	42.66 ^d	22.77 ^c
	عدم آهن Non Fe		
قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی Cut-off irrigation at the podding stage	آهن Fe	75.16 ^{abc}	56.66 ^a
	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	72.66 ^{abc}	52.88 ^{ab}
	عدم آهن Non Fe		
	آهن Fe	71.50 ^{bc}	50.77 ^{ab}
	عدم اسید سالیسیلیک Non salicylic acid	51.33 ^d	39.22 ^b
	عدم آهن Non Fe		

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند

* In each column, means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level

در تیمار آبیاری کامل (۶۳۸۹/۲۴) کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقدار آن در تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (۴۰۵۴/۴۰) کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (جدول ۵). محلول‌پاشی آهن و تیمارهای آبیاری به‌طور معنی‌داری بر عملکرد دانه تأثیر داشتند (جدول ۳)، به‌طوری‌که

عملکرد کل و عملکرد دانه

با توجه به جدول تجزیه واریانس، عملکرد کل تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین عملکرد کل

در پژوهش‌های دیگری، کاهش عملکرد کل (Mehrabi & Ehsanzade, 2011) و دانه (Gholinezhad & Darvishzadeh, 2015) تحت شرایط تنش خشکی گزارش شد. در یک پژوهش، کاربرد نانوکلات آهن و نانوآکسید آهن باعث بهبود معنی‌دار عملکرد کل و عملکرد دانه شد (Karamian Hasan Abadi et al., 2021) و علت این اثرات مثبت به نقش عنصر آهن در فعالیت فتوسنتزی، افزایش شاخه‌های فرعی، افزایش تعداد کپسول، تعداد دانه در بوته و متعاقب آن افزایش وزن خشک بوته ارتباط داده شد.

تأثیر اسید سالیسیلیک به عنوان یک ماده ضدتعرق، منجر به بهبود شاخص‌های تحمل به تنش شد. اسید سالیسیلیک با ممانعت از باز شدن روزنه‌ها، مقاومت گیاه را نسبت به تنش خشکی افزایش می‌دهد و این ماده احتمالاً از طریق تأثیر بر آنزیم‌های کاتالاز و پروکسیداز، آثار ناشی از تنش خشکی را کاهش داده (Bayat, Sepehri Zare, Abyaneh, & Abdollahi, 2010; Jahan & Amiri, 2019)، لذا بهبود شاخص‌های تحمل به تنش در شرایط استفاده از این نهاده مورد انتظار است. افزایش عملکرد دانه با محلول پاشی اسید سالیسیلیک در سویا (Razmi, Ebadi, Daneshian, & Jahanbakhsh, 2017)، ارزن (Kolupaev et al., 2011) و آفتابگردان (Hussain et al., 2009) گزارش شده است.

با قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی و گل‌دهی، عملکرد دانه به ترتیب ۳۹ و ۵۵ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش یافت (جدول ۵). محلول پاشی آهن باعث افزایش عملکرد دانه به میزان ۱۸ درصد نسبت به عدم مصرف آهن شد (جدول ۵). همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری کامل و کاربرد اسید سالیسیلیک (۱۸۱۵/۱۹ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقدار آن در تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک (۶۲۵/۵۷ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد. کاربرد عنصر ریزمغذی آهن نیز در شرایط آبیاری کامل، عملکرد دانه را نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۲).

در شرایط تنش خشکی، عملکرد دانه و عملکرد کل کاهش یافت. فرح‌بخش و فرح‌بخش (Farahbakhsh & Farahbakhsh, 2015) گزارش کردند که تنش خشکی در مرحله گل‌دهی و کپسول‌دهی کنگد به ترتیب باعث کاهش ۵۶ و ۴۵ درصدی عملکرد دانه نسبت به آبیاری کامل شد و کاهش عملکرد کل تحت تنش خشکی نیز در پژوهش اسکندری و همکاران (Eskandari, Zehtab Salmasi, & Ghasemi-Golezani, 2010) گزارش شد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آبیاری، محلول پاشی آهن و اسید سالیسیلیک بر بعضی از خصوصیات کمی کنگد
Table 5- Mean comparison of effect of irrigation treatments, Fe and salicylic acid spraying on some quantitative characteristics of sesame

عملکرد کل	تعداد کپسول در بوته	وزن خشک بوته
Total yield (kg.h ⁻¹)	Capsule number per plant	Plant dry weight (g)
آبیاری		
Irrigation		
آبیاری کامل	60.08 ^a	64.16 ^{a*}
Full irrigation		
قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی	23.20 ^b	28.83 ^c
Cut-off irrigation at the flowering stage		
قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی	29.45 ^b	40.58 ^b
Cut-off irrigation at the podding stage		
اسید سالیسیلیک		
Salicylic acid		
کاربرد	42.41 ^a	47.72 ^a
Application		
عدم کاربرد	32.75 ^b	41.33 ^b
Non-application		
آهن		
Fe		
کاربرد	44.59 ^a	48.88 ^a
Application		
عدم کاربرد	30.57 ^b	40.16 ^b
Non-application		

* در هر ستون و برای هر اثر ساده، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند

* In each column and for each simple effect, means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری و محلول پاشی اسید سالیسیلیک (قسمت بالا) و آبیاری و محلول پاشی آهن (قسمت پایین) بر بعضی از خصوصیات کمی کنگد

Table 6- Mean comparison of interaction effect of irrigation and salicylic acid spraying (up part) and irrigation and Fe spraying (down part) on some quantitative characteristics of sesame

شاخص برداشت Harvest Index	وزن خشک بوته Plant dry weight (g)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	
28.30a	62.83a	75.33a*	کاربرد اسید سالیسیلیک Application of salicylic acid
28.08a	65.50a	74.38ab	عدم کاربرد اسید سالیسیلیک Non- application of salicylic acid
18.61e	32.66c	68.05ab	کاربرد اسید سالیسیلیک Application of salicylic acid
17.33f	25.00c	55.00c	عدم کاربرد اسید سالیسیلیک Non- application of salicylic acid
24.36c	47.66b	73.91ab	کاربرد اسید سالیسیلیک Application of salicylic acid
22.18d	33.50c	61.41bc	عدم کاربرد اسید سالیسیلیک Non- application of salicylic acid
28.70a	71.33a	79.58a	کاربرد آهن Application of Fe
27.68a	57.00b	69.83ab	عدم کاربرد آهن Non- application of Fe
18.45d	31.66df	69.88ab	کاربرد آهن Application of Fe
17.30e	26.00f	53.16c	عدم کاربرد آهن Non- application of Fe
24.21b	43.66c	73.33ab	کاربرد آهن Application of Fe
22.33c	37.50cd	62.00bc	عدم کاربرد آهن Non- application of Fe

* در هر ستون و برای هر قسمت (بالا و پایین)، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند

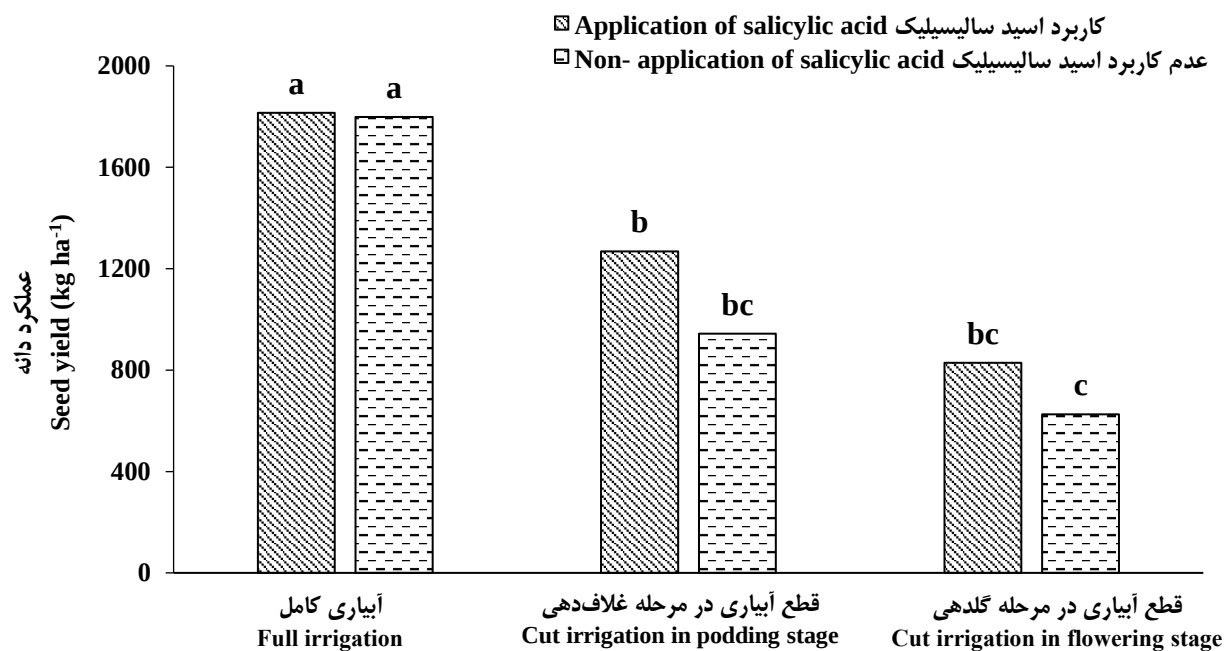
* In each column and for each part (up and down), means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level

شاخص برداشت

کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری کامل تأثیر چندانی در بهبود شاخص برداشت نداشت، ولی در هر یک از شرایط تنش خشکی، قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی و گل‌دهی، شاخص برداشت تحت تأثیر اسید سالیسیلیک به ترتیب ۸ و ۷ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۶). در شرایط تنش خشکی، کاربرد محلول پاشی آهن سبب افزایش معنی‌دار شاخص برداشت نسبت به عدم کاربرد آهن شد، به‌طوری‌که در تیمارهای قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی و گل‌دهی، محلول پاشی آهن سبب افزایش هشت و

شش درصدی شاخص برداشت نسبت به عدم کاربرد آهن در تیمارهای مذکور شد (جدول ۶).

نتایج نشان داد که تنش خشکی منجر به کاهش شاخص برداشت کنگد شد که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Ayobizadeh et al., 2017)؛ اما در چنین شرایطی، کاربرد نانواکسید آهن به‌طور متوسط ۳/۸۶ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد (Karamian Hasan Abadi et al., 2021). به نظر می‌رسد که علت کاهش شاخص برداشت در شرایط تنش خشکی احتمالاً به‌دلیل تأثیر بیشتر کمبود رطوبت بر فرایندهای زیستی در مقایسه رشد رویشی باشد (Ayobizadeh et al., 2017).

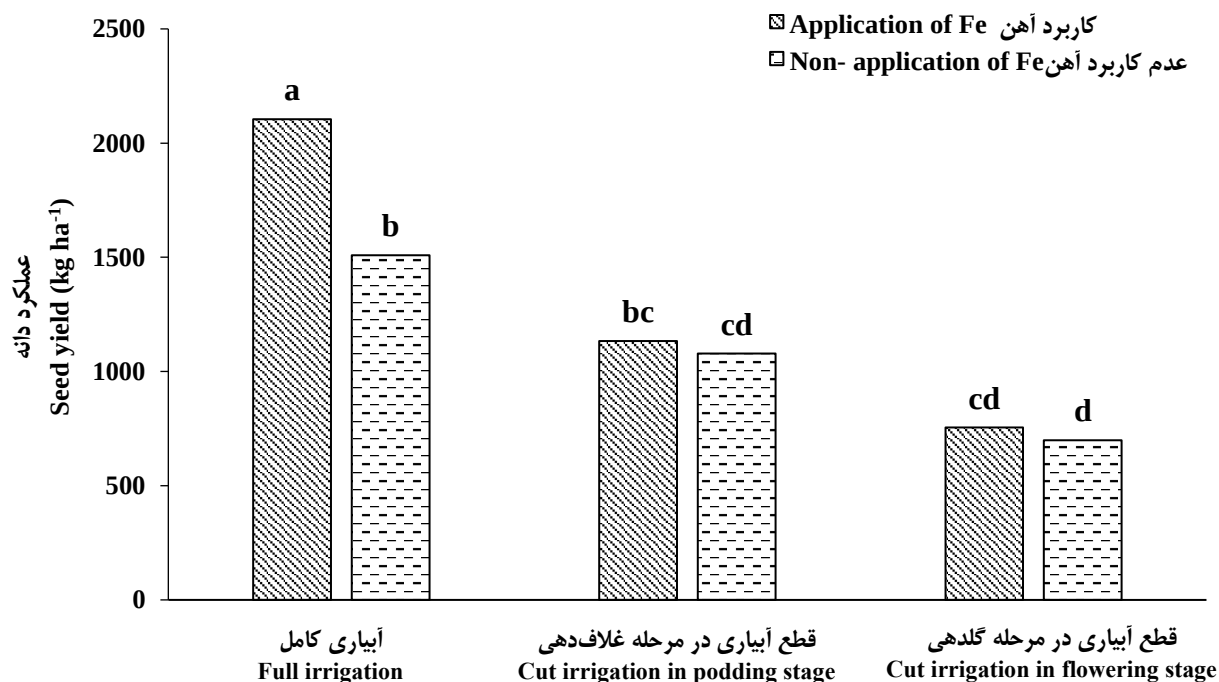


شکل ۱- اثرات متقابل آبیاری و محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه کنگد

Figure 1- Interaction effect of irrigation and salicylic acid spraying on seed yield of sesame

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

Means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level



شکل ۲- اثرات متقابل آبیاری و محلول پاشی آهن بر عملکرد دانه کنگد

Figure 2- Interaction effect of irrigation and Fe spraying on seed yield of sesame

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

Means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level

صفات اقتصادی کنگد شد. با وجود خسارات وارده به گیاه با قطع آبیاری در مرحله کپسول دهی با کاربرد آهن و اسید سالیسیلیک به صورت مجزا و همزمان اکثر صفات بهبود یافت. با توجه به نتایج، عنصر ریزمغذی آهن باعث بهبود اکثر صفات مورد بررسی در شرایط قطع آبیاری شد، به طوری که اکثر صفات با محلول پاشی آهن تحت شرایط خشکی با آبیاری کامل از نظر آماری تفاوت معنی داری نداشتند. کاربرد اسید سالیسیلیک نیز علاوه بر تأثیر مثبت بر صفات اقتصادی کنگد در شرایط آبیاری کامل باعث بهبود صفات در شرایط قطع آبیاری شد. علاوه بر اثر مثبت اسید سالیسیلیک و آهن به صورت جداگانه روی خصوصیات مورفولوژیک کنگد، کاربرد همزمان آنها در کلیه تیمارهای قطع آبیاری سبب افزایش چشمگیری در اکثر صفات شد. با توجه به تأثیر مثبت اسید سالیسیلیک و آهن بر صفاتی چون ارتفاع بوته، تعداد کپسول در گیاه، تعداد دانه در کپسول، عملکرد دانه، عملکرد کل و شاخص برداشت کنگد در شرایط قطع آبیاری در مرحله کپسول دهی و گل دهی، به نظر می رسد که در اقلیم خشک و نیمه خشک ایران می توان با کاهش میزان آبیاری در کنار محلول پاشی با عناصر ریزمغذی همچون آهن و اسید سالیسیلیک علاوه بر صرفه جویی در مصرف آب کشاورزی از ضرر اقتصادی ناشی از تنش خشکی جلوگیری کرد و میزان تولید این محصول ارزشمند را بهبود بخشید.

عنصر ریزمغذی آهن به یک میزان بر عملکرد دانه و کل مؤثر نبود، به طوری که با کاربرد آهن، افزایش بیشتری در عملکرد دانه (۱۷ درصد) نسبت به عملکرد کل (۱۱ درصد) مشاهده شد و نقش به سزایی در افزایش شاخص برداشت کنگد داشت که با نتایج کریمیان و همکاران (Karamian Hasan Abadi et al., 2021) و بحرانی و پوررضا (Bahrani & Pourreza, 2015) مطابقت داشت. با توجه به نقش اسید سالیسیلیک در بهبود ویژگی های رشدی گیاه احتمالاً میزان فتوسنتز و به تبع آن شیره پروده گیاه و توان تولید متابولیت های ثانویه گیاه افزایش پیدا کرده (Heydarnejadiyan, Maleki, & Babaei, 2021) و در نتیجه خصوصیات رشدی و عملکرد کنگد بهبود یافته است. تأثیر بیشتر تیمار محلول پاشی همزمان اسید سالیسیلیک و آهن بر صفت شاخص برداشت ممکن است به اثرات مثبت اسید سالیسیلیک بر جذب عناصر غذایی (Heydarnejadiyan et al., 2021) مرتبط باشد.

نتیجه گیری

کاربرد آهن و اسید سالیسیلیک سبب افزایش ارتفاع بوته، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در بوته، عملکرد کل، عملکرد دانه و شاخص برداشت در شرایط قطع آبیاری شدند. قطع آبیاری در مرحله گل دهی، خسارت شدیدی به گیاه وارد کرد که منجر به کاهش در

References

- Ahmadi, J., Seyfi, M. M., & Amini, M. (2013). Effect of spraying micronutrients Fe, Zn and Ca on grain and oil yield of sesame (*Sesemum indicum* L.) varieties. *Crop Production*, 5(3), 115-130. (in Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008739.1391.5.3.7.0>
- Ahmed, N. J., & Ali, K. A. (2024). Influence of salicylic acid under different levels of drought stress on growth, yield, and chemical content in sesame crop. *Passer Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(2), 344-350. <https://doi.org/10.24271/psr.2024.448491.1537>
- Alizadeh, M., Balouchi, H. R., & Yadavi, A. (2016). The effect of priming and irrigation water quality on seed and oil yield and yield components of two sesames (*Sesamum indicum* L.). *Plant Productions*, 39(2), 115-125. <https://doi.org/10.22055/ppd.2016.12051>
- Arvin, P., Vafabakhsh, J., & Mazaheri, D. (2018). Study of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and drought on physiological traits and ultimate yield of cultivars of oilseed rape (*Brassica* spp.). *Journal of Agroecology*, 9(4), 1208-1226. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v9i4.61808>
- Ayoubzadeh, N., Laei, G., Amini Dehaghi, M., Masood Sinaki, J., & Bidokhti, S. R. (2017). Effect of nanoFe and folic acid foliar application on yield and yield components of sesame varieties after wheat cultivation under drought stress conditions. *Journal of Crop Production Research*, 9, 283-312. (in Persian with English abstract)
- Ayoubzadeh, N., Laei, G., Amini Dehaghi, M., Masoud Sinaki, J., & Rezvan Bidokhti, S. (2020). Effect of drought stress and foliar nutrition of Fe nano-chelate and fulvic acid on grain yield and fatty acids composition in seed oil of two sesame cultivars. *Journal of Crops Improvement*, 22(2), 231-243. (in Persian) <https://doi.org/10.22059/jci.2020.281730.2220>
- Azhdar Afshari, M. A., Shekari, F., Afsahi, K., & Azimkhani, R. (2016). Effect of floral applied salicylic acid on dry weight, harvest index, yield and yield components of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) under water deficit stress. *EnvFemental Stresses in Crop Sciences*, 9(1), 51-58. (in Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2016.299>
- Bahrani, A., & Pourreza, J. (2015). Effect of some micro and macro nutrients on seed yield and oil content of rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Chemical, EnvFemental and Biological Sciences*, 3(1), 71-74.
- Bayat, S., Sepehri Zare, A., Abyaneh, H., & Abdollahi, M. R. (2010). Effect of salicylic acid and paclobutrazol on

- some growth characteristics and yield of maize in conditions of drought stress. *Journal of Crops Ecophysiology*, 2, 34-41. (in Persian).
10. Bybordi, A., & Mamedov, G. (2010). Evaluation of application methods efficiency of zinc and Fe for canola (*Brassica napus* L.). *Notulae Scientia Biologicae*, 2(1), 94-103. <http://dx.doi.org/10.15835/nsb213531>
 11. Eskandari, H., Zehtab Salmasi, S., & Ghasemi-Golezani, K. (2010). Evaluation of water use efficiency and grain yield of sesame cultivars as a second crop under different irrigation regimes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 20(1), 39-51. (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24764310.1389.20.1.4.5>
 12. Farahbakhsh, S., & Farahbakhsh, H. (2015). Effect of drought stress on yield and yield components of sesame cultivars under Kerman conditions (*Sesamum indicum* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4), 776-783. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v12i4.24390>
 13. Ghassemi, S., Ghassemi-Golezani, K., & Zehtab Salmasi, S. (2019). Changes in antioxidant enzymes activities and physiological traits of ajowan in response to water stress and hormonal application. *Scientia Horticulturae*, 246, 957-964. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.086>
 14. Gholinezhad, E., & Darvishzadeh, R. (2015). Effect of mycorrhizal fungi on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) landraces under different irrigation levels. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25(3), 119-135. (in Persian)
 15. Hafeez, Y., Iqbal, S., Jabeen, K., Shahzad, S., Jahan, S., & Rasul, F. (2017). Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* (L.) Merr. under drought stress. *Pakistan Journal of Botany*, 49(51), 7-13.
 16. Hailu, E. K., Urga, Y. D., Sori, N. A., Borona, F. R., & Tufa, K. N. (2018). Sesame yield response to deficit irrigation and water application techniques in irrigated agriculture, Ethiopia. *International Journal of Agronomy*, 2018(1), 5084056. <https://doi.org/10.1155/2018/5084056>
 17. Heidari, M., Goleg, M., Ghorbani, H., & Baradarn Firozabad, M. (2016). Effect of drought stress and foliar application of Fe oxide nanoparticles on grain yield, ion content and photosynthetic pigments in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 46(4), 619-628. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2015.56811>
 18. Heydarnejadiyan, H., Maleki, A., & Babaei, F. (2021). Effects of zinc nanofertilizer and salicylic acid on yield and yield components of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 37(1), 145-161. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.351603.2853>
 19. Hussain, M. A. M. M., Malik, M. A., Farooq, M., Khan, M. B., Akram, M., & Saleem, M. F. (2009). Exogenous glycinebetaine and salicylic acid application improves water relations, allometry and quality of hybrid sunflower under water deficit conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(2), 98-109. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00354.x>
 20. IRICA. (2021). Annual statistics. <https://irica.ir/index.php>
 21. Jahan, M., & Amiri, M. B. (2018). Effective factors on water use efficiency in sesame, maize and common bean in response to salicylic acid under deficit irrigation condition. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 28(1), 249-266. (in Persian)
 22. Jahan, M., & Amiri, M. B. (2019). Effect of water superabsorbent levels, nutrition management and salicylic acid on soil characteristics, water use efficiency and morphological characteristics and yield of bean (*Phaseolous vulgaris* L.) in drought stress. *Journal of Crop Production*, 12(3), 1-20. (in Persian). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2019.14761.2108>
 23. Jahan, M., Javadi, M., Hesami, E., & Amiri, M. B. (2021). Nutritional management improved sesame performance and soil properties: A function-based study on sesame as affected by deficit irrigation, water superabsorbent, and salicylic acid. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4), 2702-2717. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00557-2>
 24. Kalantari, E., Armin, M., & Marvi, H. (2021). Effects of irrigation cut-off in different stages on yield and yield components of sesame cultivars. *Crop Science Research in Arid Regions*, 3(1), 151-162. (in Persian). <https://doi.org/10.22034/csrar.2021.262665.1073>
 25. Karamian Hasan Abadi, Z., Eisvand, H. R., Daneshvar, M., & Akbarpour, O. (2021). Study the effect of drought stress and Fe oxide nanoparticle foliar application on quantitative and qualitative traits of sesame (*Sesamum indicum* L.). *EnvFemental Stresses in Crop Sciences*, 14(2), 375-386. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2019.2645.1687>
 26. Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 462. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462>
 27. Kazemi, K., Khajehosseini, M., Nezami, A., & Eskandari, H. (2016). The effect of seed priming on germination, yield and the quality of sesame gains under deficit irrigation. *Agricultural Crop Management*, 18(2), 373-388. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2016.56575>

28. Kolupaev, Y., Yastreb, T. O., & Miroshnichenko, N. N. (2011). Influence of salicylic and succinic acids on antioxidant enzymes activity, heat resistance and productivity of *Panicum miliaceum* L. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 7(2), 154-163.
29. Mahmoodi Sourestani, M., Moghadam, E., & Firoozi, A. F. (2016). The effect of foliar application of iron on some biochemical and photosynthetic characteristics of holy basil (*Ocimum sanctum*). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 47(3), 543-552. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2016.59816>
30. Mehrabi, Z., & Ehsanzade, P. (2011). A study on physiological attributes and grain yield of sesame cultivars under different soil moisture regimes. *Journal of Crops Improvement*, 13(2), 75-88. (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.83372008.1390.13.2.7.3>
31. Miura, K., & Tada, Y. (2014). Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, 5, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00004>
32. Nazar, R., Iqbal, N., Syeed, S., & Khan, N. A. (2011). Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing nitrogen and sulfur assimilation and antioxidant metabolism differentially in two mungbean cultivars. *Journal of Plant Physiology*, 168(8), 807-815. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.11.001>
33. Pallavi, S., Reena, N., Surabhi, J., & Sahu, R. K. (2022). Morphological responses of pea (*Pisum sativum* L. Var. Kashi Nandni) to exogenous application of salicylic acid under water deficit stress condition. *Biological Forum-An International Journal*, 14(1), 1384-1388.
34. Pandey, A. C., Sanjay, S. S., & Yadav, R. S. (2010). Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental Nanoscience*, 5(6), 488-497. <https://doi.org/10.1080/17458081003649648>
35. Rajaie, M. (2022). Improving yield, yield components and the absorption of nutrients of wheat by growth stimulants under normal irrigation and drought stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 20, 147-162. (in Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22067/jcsc.2022.72226.1083>
36. Razmi, N., Ebadi, A., Daneshian, J., & Jahanbakhsh, S. (2017). Salicylic acid induced changes on antioxidant capacity, pigments and grain yield of soybean genotypes in water deficit condition. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 457-464. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1392623>
37. Rezaeichiane, A., Khorramdel, S., Movludi, A., & Rahimi, A. (2017). Effects of nano chelated zinc and mycorrhizal fungi inoculation on some agronomic and physiological characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(1), 168-184. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jsc.v15i1.49876>
38. Saady, H. S., El-Samad, G. A. A., El-Temsah, M. E., & El-Gabry, Y. A. E. G. (2022). Effect of iron, zinc, and manganese nano-form mixture on the micronutrient recovery efficiency and seed yield response index of sesame genotypes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00681-z>
39. Shokri, S., Hooshmand, A., Golabi, M., Alemzade Ansari, N., & Struve, D. (2022). Effect of silica nanoparticles on yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in Ahvaz region. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(1), 279-292. (in Persian). <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44312.2624>
40. Soheili Movahhed, S., Khomari, S., Sheikhzadeh, P., & Alizadeh, B. (2020). Effects of drought stress and foliar application of boron and zinc on yield and some agronomic and morphological traits of spring type safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Agroecology*, 11(4), 1275-1291. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jag.v11i4.72028>
41. Wei, X., Liu, K., Zhang, Y., Feng, Q., Wang, L., Zhao, Y., Li, D., Zhao, Q., Zhu, X., Zhu, X., & Li, W. (2015). Genetic discovery for oil production and quality in sesame. *Nature communications*, 6(1), 8609. <https://doi.org/10.1038/ncomms9609>

Contents

Research Articles

- Comparison of Yield and Quality of Forage in the Intercropping of Rye (*Secale cereale* L.) and Vetch (*Vicia villosa* Roth.) under Different Tillage Systems** 109
T. Salavati, Gh. Heidari, M. Majidi, Sh. Khalesro
- Improving the Nutrient Absorption and Yield of Chickpeas (*Cicer arietinum*) and Barley (*Hordeum vulgare*) under Row Inter-cropping with Foliar Application of Plant Growth Regulators in Saline Soil Conditions** 131
A. Talebi, M. R. Owji, F. Mohajeri, M. R. Baziar
- Drought Risk Assessment by Applying Drought Hazard and Vulnerability Indices for Rainfed Wheat (*Triticum aestivum* L.) (Case study: North Khorasan and Razavi Khorasan)** 149
H. Latifi, S. Khorramdel, A. Koocheki, M. Bannayan Aval, M. R. Farzaneh Belgredi
- Effect of Waterlogging Duration at Different Growth Stages on Some Photosynthetic Characteristics, Antioxidant Activity, and Yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.)** 171
F. Askari Foroshani, A. Rahnema, M. Meskarbashee, I. Kamranfar
- The Effect of Foliar Application of Zinc and Iron at Different Developmental Phases on the Quantitative and Qualitative Characteristics of Two Cultivars of Dryland Wheat (*Triticum aestivum* L.)** 187
Sh. Ajam, A. Biabani, R. Mohammadi, A. Rahemi Karizaki, H. Ghorbani Vaghei
- 24-Epibrasinolid and Cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) Extract Effect on Grain Yield and Some Morphophysiological Characteristics of the Sensitive and Tolerant Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Cultivars** 201
R. Sohrabi, A. Pirzad, M. Niazkhani, T. MirMahmoodi
- The Effect of Foliar Applications of Fe and Salicylic Acid on Sesame (*Sesamum indicum* L.). under Water Deficit Conditions** 227
M. B. Amiri, M. Sepehri Bimorgh, A. Mirzaeian

Iranian Journal of Field Crops Research

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

Vol. 23

No. 2

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>



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol.23 No.2

2025

Iranian Journal of Field Crops Research

ISSN:2008-1472

Contents

Research Articles

- Comparison of Yield and Quality of Forage in the Intercropping of Rye (*Secale cereale* L.) and Vetch (*Vicia villosa* Roth.) under Different Tillage Systems 109**
T. Salavati, Gh. Heidari, M. Majidi, Sh. Khalesro

- Improving the Nutrient Absorption and Yield of Chickpeas (*Cicer arietinum*) and Barley (*Hordeum vulgare*) under Row Inter-cropping with Foliar Application of Plant Growth Regulators in Saline Soil Conditions 131**
A. Talebi, M. R. Owji, F. Mohajeri, M. R. Baziar

- Drought Risk Assessment by Applying Drought Hazard and Vulnerability Indices for Rainfed Wheat (*Triticum aestivum* L.) (Case study: North Khorasan and Razavi Khorasan) 149**
H. Latifi, S. Khorramdel, A. Koocheki, M. Bannayan Aval, M. R. Farzaneh Belgredi

- Effect of Waterlogging Duration at Different Growth Stages on Some Photosynthetic Characteristics, Antioxidant Activity, and Yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.)..... 171**
F. Askari Foroshani, A. Rahn timer, M. Meskarbashee, I. Kamranfar

- The Effect of Foliar Application of Zinc and Iron at Different Developmental Phases on the Quantitative and Qualitative Characteristics of Two Cultivars of Dryland Wheat (*Triticum aestivum* L.) 187**
Sh. Ajam, A. Biabani, R. Mohammadi, A. Rahemi Karizaki, H. Ghorbani Vaghei

- 24-Epibrasinolid and Cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) Extract Effect on Grain Yield and Some Morphophysiological Characteristics of the Sensitive and Tolerant Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Cultivars 201**
R. Sohrabi, A. Pirzad, M. Niazkhani, T. MirMahmoodi

- The Effect of Foliar Applications of Fe and Salicylic Acid on Sesame (*Sesamum indicum* L.) under Water Deficit Conditions..... 227**
M. B. Amiri, M. Sepehri Bimorghi, A. Mirzaeian