



شماره ۱

جلد ۲۱

سال ۱۴۰۲

(شماره پیاپی: ۶۹)

نشریه علمی

پژوهشهای زراعی ایران

شاپا: ۱۴۷۲-۲۰۰۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- واکنش اکوتیپ‌های زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی
تحت شرایط دمای پایین ۳
الهه برومند رضازاده، احمد نظامی، زینب خراسانی، محمد خواجه حسینی
- تأثیر زمان‌های مختلف کم‌آبیاری بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و کارایی مصرف آب چای ترش
(*Hibiscus sabdariffa* L.) در دو روش کشت ۱۳
فاطمه مشهدی، حمیدرضا خزاعی، محمد رضا رمضانی مقدم
- بررسی خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکردی گیاه کینوا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته ۳۱
مسلم مصطفائی، مجید جامی الاحمدی، معصومه صالحی، علی شهیدی
- شبیه‌سازی نمو فنولوژیک کینوا بر اساس داده‌های مزرعه‌ای ۴۹
شهاب اقبالی شاه آباد، مهدی نصیری محلاتی، محسن جهان، معصومه صالحی
- مطالعه متابولیسم فتوسنتزی و سیستم آنتی اکسیدانی سنبله و برگ پرچمی گندم نان تحت تنش خشکی ۶۳
سعید نواب‌پور، ساسان گل چشمه، ابوالفضل مازندرانی، حسین احمدی اوچ‌تپه
- تأثیر کم‌آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی بر صفات اگرومورفولوژیک، غلظت نیتروژن و کربن برگ
و عملکرد دانه کینوا در شرایط اردبیل ۷۷
محمد جباری اورنج، حسین مقدم، محمد رضا جهانسوز، علی احمدی، بابک متشرع زاده
- اثرات نانو سیلیس و سالیسیلیک اسید بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد در کشت مخلوط ذرت
(*Zea mays* L.) و ماش سبز (*Vigna radiata* L.) در شرایط تنش خشکی ۹۳
سحر افضلی، سید محمدباقر حسینی، لیلا مأمونی، علی احمدی
- بررسی خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) تحت تأثیر تنش
کم‌آبی و کود سیلیس ۱۱۵
احسان رضایی، حمیدرضا لاریجانی، پورنگ کسرائی، حمیدرضا توحیدی مقدم، فرشاد قوشچی

نشریه پژوهشهای زراعی ایران

«نشریه علمی قطب علمی گیاهان زراعی ویژه»

با شماره ثبت 124/7857 از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی و

82/5/27

درجه علمی - پژوهشی شماره 3/11/74509 از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

89/10/21

"بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال 1398، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند."

سال 1402

شماره 1

جلد 21

صاحب امتیاز:

دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

پرویز رضوانی مقدم

سرمدیر:

حمیدرضا خزاعی

استاد - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - اکروکولوژی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

مجید آقاعلیخانی

استاد - اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی و علف های هرز (دانشگاه تربیت مدرس، تهران)

پرویز احسان زاده

استاد - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه صنعتی اصفهان)

یحیی امام

استاد - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه شیراز)

عبدالرضا باقری

استاد - ژنتیک و اصلاح نباتات (دانشگاه فردوسی مشهد)

محمدعلی بهدانی

استاد - اکولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه بیرجند)

محمد بنایان اول

استاد - مدل سازی سیستم های کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

مجید جامی الاحمدی

دانشیار - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه بیرجند)

یعقوب راعی

استاد - اکولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه تبریز)

حمیدرضا خزاعی

استاد - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه فردوسی مشهد)

حمید رحیمیان مشهدی

استاد - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه تهران)

غلامرضا زمانی

دانشیار - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه بیرجند)

احمد زارع فیض آبادی

استاد - اکولوژی گیاهان زراعی (مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی)

فرج اله شهریاری احمدی

استاد - ژنتیک و اصلاح نباتات (دانشگاه فردوسی مشهد)

محمد کافی

استاد - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه فردوسی مشهد)

احمد نظامی

استاد - فیزیولوژی گیاهان زراعی (دانشگاه فردوسی مشهد)

احسان عیشی رضایی

مدلسازی گیاهی (مرکز مطالعات کشاورزی بنیاد لابنیتز (زالف)، آلمان)

اعظم لشکری

فیزیولوژی گیاهی محیطی (مرکز تحقیقات سیمیت، دانشگاه کشاورزی هنان، چین)

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، دبیرخانه نشریات علمی، نشریه پژوهشهای زراعی ایران صندوق پستی 91775-1163

پست الکترونیک: cesc@um.ac.ir

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

این نشریه در پایگاه های زیر نمایه می شود:

پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC) پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

مقالات پژوهشی

- 3 واکنش اکوتیپ‌های زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی تحت شرایط دمای پایین
الهه برومند رضازاده، احمد نظامی، زینب خراسانی، محمد خواجه حسینی
- 13 تأثیر زمان‌های مختلف کم‌آبیاری بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و کارایی مصرف آب چای ترش (*Hibiscus sabdariffa* L.)
در دو روش کشت
فاطمه مشهدی، حمیدرضا خزاعی، محمدرضا رمضانی مقدم
- 31 بررسی خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکردی گیاه کینوا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته
مسلم مصطفائی، مجید جامی الاحمدی، معصومه صالحی، علی شهیدی
- 49 شبیه‌سازی نمو فنولوژیک کینوا بر اساس داده‌های مزرعه‌ای
شهاب اقبالی شاه آباد، مهدی نصیری محلاتی، محسن جهان، معصومه صالحی
- 63 مطالعه متابولیسم فتوسنتزی و سیستم آنتی‌اکسیدانی سنبله و برگ پرچی گندم نان تحت تنش خشکی
سعید نواب‌پور، ساسان گل‌چشمه، ابوالفضل مازندرانی، حسین احمدی‌اوج‌تپه
- 77 تأثیر کم‌آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی بر صفات اگرومورفولوژیک، غلظت نیتروژن و کربن برگ و عملکرد دانه
کینوا در شرایط اردبیل
محمد جباری اورنج، حسین مقدم، محمدرضا جهانسوز، علی احمدی، بابک متشرع زاده
- 93 اثرات نانو سیلیس و سالیسیلیک اسید بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد در کشت مخلوط ذرت (*Zea mays* L.) و ماش سبز
(*Vigna radiata* L.) در شرایط تنش خشکی
سحر افضل‌ی، سید محمدباقر حسینی، لیلا مأمی، علی احمدی
- 115 بررسی خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) تحت تأثیر تنش کم‌آبی و کود سیلیس
احسان رضایی، حمیدرضا لاریجانی، پورنگ کسرائی، حمیدرضا توحیدی مقدم، فرشاد قوشچی



Response of Cumin (*Cuminum cyminum* L.) Ecotypes to Drought Stress during Germination Stage at Low Temperature

E. Boroumand Rezazadeh¹, A. Nezami^{2*}, Z. Khorasani³, M. Khajeh Hosseini⁴

Received: 11-06-2017
Revised: 27-06-2018
Accepted: 02-07-2018

How to cite this article:

Boroumand Rezazadeh, E., Nezami, A., Khorasani, Z., & Khajeh Hosseini, M. (2023). Response of Cumin (*Cuminum cyminum* L.) Ecotypes to Drought Stress during Germination Stage at Low Temperature. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 1-10. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcesc.2020.38273>

Introduction

Cumin is one of the most important medicinal plants in Iran and is widely used in food, health and beauty industries due to its antioxidant and antibacterial properties. Yield of some crops are higher in autumn planting compared to spring. However, low temperature and inappropriate distribution of precipitation are of factors affecting seedling emergence and establishment. So it seems that seeds with higher germination also have better emergence and establishment producing more vigorous seedlings in further growth stages. So, to success in autumn-planting of cumin, it is necessary to have ecotypes with appropriate and even emergence in low temperature and water restricted conditions. Since water is of high paramount importance in germination and lower water potentials lead to lower accessibility of water to seeds, the aim of this experiment was to study seed germination response of different cumin ecotypes to low water potentials.

Materials and Methods

This study was conducted to determine the germination of six cumin ecotypes under drought stress and low temperature conditions. Treatments comprised of six cumin ecotypes (Torbat-e-Heydarieh, Khaf, Sabzevar, Qaen, Quchan and RZ19) and seven water potentials (0, -1, -2, -3, -4, -5 and -6 bar) induced by PEG6000 solution according to Michel B. E. and Kaufmann (1973). Distilled water was used for control. Seeds were disinfected by sodium hypochlorite (10%) and fungicide and were rinsed with distilled water. 25 seeds were placed in each petri dish and were incubated in 13°C after PEG solution or distilled water was added. Germinated seeds were recorded daily and germination percentage and rate, plumule and radicle length was determined at the end of the incubation. Ecotype ranking was also performed to determine the most tolerant ecotypes to drought stress. Statistical analysis was done using MSTAT-C and LSD test was used for mean comparison.

Results and Discussion

This study results indicated that water potentials was significantly affected all studied traits ($p < 0.05$) in a way that germination percentage and rate and plumule and radicle length decreased as water potential decreased to -6 bar. Maximum germination percentages (61%) was obtained in control. Significant differences were also found among cumin ecotypes for all traits. Khaf and Torbat-e-Heydarieh had the highest germination percentage (25% and 23%, respectively). Decreasing water potential from 0 to the -2 bar, caused 69% decrease in germination percentage of Quchan ecotype whereas reduction of 43% and 57% was found in Qaen and Sabzevar ecotypes, respectively. Difference in germination percentage among genotypes may be due to the different water absorption by them. Ecotypes had different germination rate in water potentials ($P \leq 0.01$). Although germination

1- PhD. in Crop Ecology, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

3- MSc. in Agronomy, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: nezami@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2020.38273>

rate was negatively affected by decreasing water potential, percentage of reduction was different among ecotypes in a way that Torbat-e-Heydarieh and Khaf showed the lowest (61 and 67%) and Quchan and RZ19 the highest reduction of germination rate (86%) in -4 bar compared to control (0 bar). Plumule and radical length were decreased as drought stress was increased. Decreasing water potential from 0 to -4 bar caused a 76% reduction in radical length. Significant difference was found among ecotypes according to radical length in a way that Khaf and Quchan had the highest and lowest radical length, respectively.

Conclusion

On the basis of ecotypes ranking for evaluated traits, Khaf and Torbat-e-Heydarieh indicated more tolerance to drought stress whereas Quchan was found as a sensitive ecotype.

Keywords: Autumn planting, Cold, Plumule, Radicle

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص ۱۰-۱

واکنش اکوتیپ‌های زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی تحت شرایط دمای پایین

اله برومند رضازاده^۱، احمد نظامی^{۲*}، زینب خراسانی^۳، محمد خواجه حسینی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

چکیده

نوسان در ریزش نزولات جوی و کاهش دما، جوانه‌زنی بذر زیره سبز را در کاشت پاییزه تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف از این تحقیق، بررسی جوانه‌زنی شش اکوتیپ زیره سبز در شرایط تنش خشکی در دمای کم بود. تیمارها شامل شش نمونه زیره سبز (پنج اکوتیپ تربت حیدریه، خواف، سبزوار، قائن، قوچان و رقم RZ19 هندی) و هفت سطح پتانسیل آب (صفر، -۱، -۲، -۳، -۴، -۵ و -۶ بار) بود. بذرها در داخل پتری‌دیش و تحت شرایط دمایی ۱۳ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سطوح خشکی با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ ایجاد شد. صفات اندازه‌گیری شده شامل درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه بود. نتایج نشان داد که اثر پتانسیل آب بر همه صفات مورد مطالعه معنی‌دار ($P \leq 0.05$) بود و بیشترین و کمترین درصد جوانه‌زنی به ترتیب در پتانسیل‌های صفر و -۶ بار مشاهده شد. اکوتیپ‌های زیره سبز در تمام صفات مورد بررسی با هم تفاوت معنی‌داری ($P \leq 0.05$) داشتند و بیشترین درصد جوانه‌زنی در اکوتیپ‌های خواف و تربت حیدریه مشاهده شد. در اکوتیپ قوچان کاهش پتانسیل آب از صفر به -۲ بار باعث کاهش ۶۹ درصدی جوانه‌زنی شد، در حالی که در دو اکوتیپ قائن و سبزوار این کاهش به ترتیب حدود ۴۳ و ۵۷ درصد بود. کاهش پتانسیل آب همچنین تأثیر معنی‌داری بر طول ریشه‌چه و ساقه‌چه اکوتیپ‌های زیره داشت. با توجه به رتبه‌بندی اکوتیپ‌ها بر اساس صفات مورد بررسی، اکوتیپ‌های خواف و تربت حیدریه بهترین امتیاز را به خود اختصاص دادند و اکوتیپ قوچان در پایین‌ترین رتبه قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: ریشه‌چه، ساقه‌چه، سرما، کاشت پاییزه

مقدمه

صادرکنندگان زیره سبز بوده و بخش عمده‌ای از تولید این گیاه در استان خراسان صورت می‌گیرد (Kafi et al., 2006).

تحقیقات نشان داده است که تولید و عملکرد برخی گیاهان در کشت پاییزه بیشتر از کاشت بهاره است، با این وجود، کاهش دما و همین‌طور پراکنش نامناسب نزولات جوی از جمله عواملی هستند که سبز شدن و استقرار گیاه را در این شرایط تحت تأثیر قرار می‌دهند (Nezami et al., 2010). از این‌رو جهت موفقیت در کاشت پاییزه زیره سبز، وجود اکوتیپ‌هایی که بتوانند سبز خوب و یکنواختی را در شرایط کمبود آب و کاهش دما در پاییز داشته باشند ضروری است.

اولین مرحله‌ای که در کشت پاییزه زیره سبز ممکن است با تنش کمبود آب (به دلیل نوسان در ریزش نزولات جوی) و حتی در اغلب موارد با کاهش دما مواجه شود، مرحله جوانه‌زنی است (Kafi et al., 2006). لذا به نظر می‌رسد بذرهایی که در این شرایط جوانه‌زنی بهتری داشته باشند در مراحل بعدی، استقرار و درصد سبز مناسب‌تری خواهند داشت و نیز گیاهچه‌هایی با بنیه بهتر و سیستم ریشه‌ای قوی‌تری تولید خواهند کرد (Jefferies, 1994).

زیره سبز گیاهی است متعلق به تیره چتریان^۵ که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی اهلی در کشور ما شناخته شده است. این گیاه علاوه بر داشتن خواص دارویی، دارای اسانسی روغنی با خاصیت آنتی‌اکسیدانی و ضد باکتریایی است که در صنایع غذایی، بهداشتی و آرایشی کاربردهای فراوانی دارد. ایران یکی از بزرگ‌ترین

۱- دکتری زراعت- اکولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- استاد گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

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

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2020.38273>

5- Apiaceae=Umbelliferae

(Abdi et al., 1995) و همکاران (Bukhtiar & Shaykra, 2015) با بررسی سطوح تنش خشکی ناشی از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی بذر ارقام و لاین‌های مختلف گندم (*Triticum aestivum* L.) مشاهده کردند که درصد و سرعت جوانه‌زنی و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه با افزایش شدت تنش خشکی کاهش یافت. در آزمایش ایشان در شرایط تنش، طول ساقه‌چه بسیار بیشتر از طول ریشه‌چه تحت تأثیر قرار گرفت و لذا این پژوهشگران اظهار داشتند که طول ریشه‌چه می‌تواند به‌عنوان یک صفت قابل اطمینان در برنامه‌های اصلاحی به‌کار برده شود.

قجری و زینلی (Ghajari & Zeinali, 2003) با اعمال پتانسیل‌های ۰، -۱، -۲، -۴، -۶، -۸ و -۱۰ بار بر روی دو رقم پنبه (*Gossypium herbaceum*) مشاهده کردند که با افزایش تنش خشکی، درصد جوانه‌زنی کاهش یافت. در پتانسیل -۱۰ بار به علت شدت تنش هیچ‌یک از بذرهای قادر به جوانه‌زنی نبودند و در پتانسیل -۸ بار هیچ‌یک از بذرهای جوانه‌زده قادر به رشد نبوده و نتوانستند به گیاهچه تبدیل شوند. با افزایش تنش خشکی، سرعت جوانه‌زنی نیز کاهش یافت. نتایج بررسی جوانه‌زنی بذور حقیقی سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) نیز حاکی از تأخیر در جوانه‌زنی بذرهای در نتیجه کاهش پتانسیل آب بود (Alvarado & Bradford, 2002).

اغلب آزمایش‌های انجام شده بر روی جوانه‌زنی در شرایط کنترل‌شده و شرایط دمایی مناسب انجام گرفته‌اند، در صورتی که در کشت پاییزه علاوه بر پراکنش نامناسب نزولات جوی، کاهش دما نیز ممکن است بر جوانه‌زنی بذر گیاه تأثیر داشته باشد، لذا این آزمایش با هدف مطالعه اثر پتانسیل آب بر جوانه‌زنی تعدادی از اکوتیپ‌های زیره سبز در شرایط دمای پایین اجرا شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین اثر سطوح مختلف خشکی بر روی جوانه‌زنی بذور زیره سبز، آزمایشی در دو مرحله به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. در مرحله اول بذر شش نمونه زیره سبز (شامل پنج اکوتیپ خواف، قاین، تربت حیدریه، سبزوار و قوچان و رقم RZ19 هندی) در معرض پتانسیل‌های صفر، -۳، -۶، -۹، -۱۲ و -۱۵ بار قرار گرفتند. با توجه به این که در این مرحله بذور تنها تا سطح -۳ بار جوانه‌زنی داشتند و در سایر پتانسیل‌ها جوانه‌زنی مشاهده نشد، لذا در مرحله بعدی بذور مذکور در معرض هفت پتانسیل آب (۰، -۱، -۲، -۳، -۴، -۵، -۶ بار) قرار داده شدند و بنابراین فقط داده‌های مرحله دوم در این گزارش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پتانسیل‌های آب با استفاده از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ طبق دستورالعمل میچل و کافمن (Michel & Kaufmann, 1973) ایجاد

آب یکی از عوامل مهم در شروع جوانه‌زنی بوده و کاهش پتانسیل اسمزی و ماتریک سبب کاهش میزان دسترسی بذر به آب می‌گردد (Willenborg et al., 2005). لذا پتانسیل آب خاک تأثیر مستقیمی بر سرعت جذب آب و جوانه‌زنی بذر داشته و کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی و نیز کاهش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه تحت تأثیر پتانسیل‌های منفی حاصل از اعمال تنش خشکی با مواد مختلف، در آزمایشات متعدد نشان داده شده است (Boroumand Rezazadeh & Koocheki, 2005; Ghavami et al., 2004; Mut & Akay, 2010). در مطالعات مربوط به اثر تنش خشکی بر جوانه‌زنی در شرایط کنترل‌شده، استفاده از پلی اتیلن گلیکول به دلیل عدم سمیت و نفوذ در بافت گیاه و نیز ایجاد محلولی دارای شرایط مشابه طبیعی بیشترین کاربرد را پیدا کرده است (Jajarmi, 2012). مطالعات نشان داده است که درصد جوانه‌زنی بذرهای در محلول پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ با درصد جوانه‌زنی در خاک با همان پتانسیل آب تقریباً برابر بوده است (Emmerich & Hardgree, 1990).

کبیری و همکاران (Kabiri et al., 2012) در آزمایش خود روی سیاهدانه (*Nigella sativa*) مشاهده کردند که در اثر تنش خشکی به دلیل کاهش جذب آب توسط بذر، کلیه شاخص‌های جوانه‌زنی کاهش یافت. برومند رضازاده و کوچکی (Boroumand Rezazadeh & Koocheki, 2005) در آزمایشی با استفاده از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ روی گیاهان زنیان (*Trachyspermum ammi*)، رازیانه (*Foeniculum vulgare*) و شوید (*Anethum graveolens*) مشاهده کردند که با افزایش شدت تنش، سرعت و درصد جوانه‌زنی و نیز طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاهان کاهش یافت. نتایج اعمال سه تیمار خشکی روی شش رقم کلزا (*Brassica napus*) نیز نشان داد که با افزایش تنش، سرعت و درصد جوانه‌زنی کاهش پیدا کرد (Andalibi et al., 2005). همچنین بررسی جوانه‌زنی بذر ژنوتیپ‌های مختلف یولاف (*Avena sativa* L.) با اندازه متفاوت در شرایط خشکی نشان داد که کاهش پتانسیل اسمزی سبب کاهش درصد نهایی جوانه‌زنی گردید (Mut & Akay, 2010).

در آزمایشی با استفاده از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰، سطوح پتانسیل ۰، -۴، -۸، -۱۲ و -۱۶ بار بر روی ارقام دانه درشت و دانه ریز عدس (*Lens culinaris* Medik.) اعمال و مشاهده شد که با کاهش پتانسیل اسمزی، میزان جذب آب توسط بذر، درصد کل جوانه‌زنی و میزان رشد ریشه‌چه کاهش معنی‌داری یافت. نتایج همچنین حاکی از آن بود که در تمام سطوح پتانسیل، عدس‌های دانه ریز، جوانه‌زنی بهتری از عدس‌های دانه درشت داشتند و جوانه‌زنی هر دو رقم عدس در سطح -۱۶ بار شدیداً کاهش یافت. در این بررسی پتانسیل -۱۲ بار بهترین سطح برای شبیه‌سازی خشکی در ارقام عدس و تفکیک تحمل به تنش آن‌ها بود و طول ریشه‌چه بهترین شاخص برای مقایسه تحمل ارقام به تنش خشکی ذکر شد

ژنوتیپ نشان‌دهنده تحمل بیشتر به شرایط خشکی است (Kafi et al., 2005).

محاسبات آماری و رسم نمودار به‌ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای MSTAT-C و Excel انجام شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی: اثر پتانسیل آب بر درصد جوانه‌زنی معنی‌دار ($P \leq 0/01$) بود (جدول ۱) و با کاهش پتانسیل آب کاهش یافت (جدول ۲). بیشترین درصد جوانه‌زنی در پتانسیل صفر و کمترین آن در ۶- بار مشاهده گردید. درصد جوانه‌زنی تا پتانسیل ۳- بار روندی خطی داشت و با شیب ۱۷/۷ درصد به‌ازای افزایش هر واحد پتانسیل آب کاهش یافت، در صورتی‌که در پتانسیل‌های کمتر از ۳- بار کاهش درصد جوانه‌زنی، حدود ۲/۷ درصد به‌ازای هر واحد کاهش پتانسیل آب بود (شکل ۱). اکوتیپ‌ها از نظر درصد جوانه‌زنی با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ($P \leq 0/01$) داشتند (جدول ۱)، به‌طوری‌که اکوتیپ‌های خواف و تربت حیدریه بیشترین و قوچان کمترین درصد جوانه‌زنی را دارا بودند (جدول ۳). اثرات متقابل پتانسیل آب و ژنوتیپ بر درصد جوانه‌زنی نیز معنی‌دار ($P \leq 0/01$) بود. کاهش پتانسیل آب از صفر به ۲- بار در اکوتیپ قوچان باعث کاهش ۶۹ درصدی جوانه‌زنی شد، در حالی‌که در دو اکوتیپ قائن و سبزوار، این کاهش در محدوده پتانسیل ذکر شده به‌ترتیب حدود ۴۳ و ۵۷ درصد بود (جدول ۴).

شد. برای پتانسیل صفر از آب مقطر استفاده شد. بذره‌های مورد آزمایش که از محصول زیره تولیدی همان سال آزمایش تهیه شده بود، به‌ترتیب با هیپوکلریت سدیم (وایتکس ۰/۵ درصد) و قارچ‌کش بنلیت دو در هزار، هر کدام به مدت ۳۰ ثانیه ضدعفونی و سپس با آب مقطر آب‌شویی شدند. تعداد ۲۵ عدد بذر هر اکوتیپ در داخل پتری‌دیش با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر قرار گرفت. به هر پتری‌دیش حدود دو سی‌سی از محلول حاوی پلی‌اتیلن گلایکول ۶۰۰۰ بر اساس پتانسیل مورد نظر اضافه شد و سپس به مدت ۲۱ روز در ژرمیناتور در درجه حرارت 13 ± 2 درجه سانتی‌گراد (بر اساس میانگین دمای هوای پاییز در مشهد) قرار داده شد. در دوره آزمایش، تعداد بذره‌های جوانه‌زده به‌طور روزانه ثبت و درصد جوانه‌زنی در انتهای روز بیست و یکم محاسبه گردید. برای محاسبه درصد جوانه‌زنی، بذوری جوانه زده تلقی شدند که حداقل دارای سه میلی‌متر ریشه‌چه باشد. در انتهای آزمایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاهچه‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. برای محاسبه درصد و سرعت جوانه‌زنی از روابط ۱ و ۲ استفاده شد.

(۱) $100 \times (\text{تعداد کل بذور} / \text{تعداد بذر جوانه زده تا روز } i) = \text{درصد جوانه‌زنی}$

(۲) (روز تا اولین شمارش / تعداد بذر جوانه‌زده) = سرعت جوانه‌زنی
(روز تا آخرین شمارش / تعداد بذر جوانه‌زده) + +

رتبه‌بندی اکوتیپ‌ها به این صورت انجام شد که به گروهی از میانگین‌ها که در آزمون دانکن حرف a قرار می‌گیرند رتبه ۱، به گروه ab رتبه ۱/۵، به گروه abc رتبه ۱/۶۶، به گروه abcd رتبه ۱/۷۵ و به گروه b رتبه ۲ و ... تعلق گرفته، سپس رتبه‌ها با یکدیگر جمع و در نهایت رتبه نهایی هر ژنوتیپ محاسبه می‌شود، پایین‌تر بودن رتبه یک

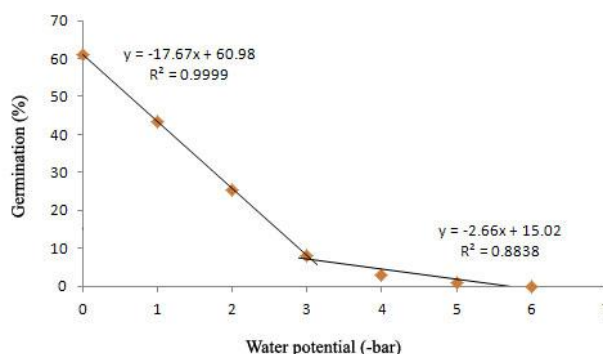
جدول ۱- منبع تغییرات، درجه آزادی و میانگین مربعات (MS) صفات مرتبط با جوانه‌زنی اکوتیپ‌های زیره سبز

Table 1- Source of variations, degrees of freedom and mean squares of seed germination criteria in cumin

منبع تغییرات	درجه آزادی	درصد جوانه‌زنی	سرعت جوانه‌زنی	طول ساقه‌چه	طول ریشه‌چه
S.O.V.	d.f	Germination percentage	Germination rate	Plumule length	Radicle length
اکوتیپ	5	268.14**	0.91**	1.44**	2.98**
Ecotype					
پتانسیل	6	13756.28**	81.04**	43.58**	99.52**
Potential					
اکوتیپ × پتانسیل	30	68.90**	1.25**	0.55**	0.72**
Ecotype × Potential					
خطا	126	0.379	0.11	0.01	0.01
Error					
ضریب تغییرات	-	3.0	15.8	4.8	3.1
CV (%)					

** معنی‌دار در سطح یک درصد

** Significant at 1% level of probability



شکل ۱- اثر پتانسیل آب بر درصد جوانه‌زنی زیره سبز

Figure 1- Effects of water potential on seed germination percentage in cumin

جدول ۲- اثر پتانسیل آب بر سرعت جوانه‌زنی و طول ساقچه و ریشه‌چه اکوتیپ‌های زیره سبز

Table 2- Seed germination rate, plumule and radicle length in cumin ecotypes as affected by water potential

پتانسیل (بار) Potential (bar)	سرعت جوانه‌زنی Germination rate (number.day ⁻¹)	طول ساقچه Plumule length (cm)	طول ریشه‌چه Radicle length (cm)
0	5.0	3.4	5.4
-1	3.7	2.8	4.3
-2	2.6	2.2	3.0
-3	2.0	1.5	2.3
-4	1.1	0.8	1.5
-5	0.2	0.0	0.1
-6	0.0	0.0	0.0
LSD (0.05)	0.2	0.04	0.04

۶- بار نسبت به حالت عدم تنش به‌ترتیب حدود ۶۲ و ۱۰۰ درصد بود. اکوتیپ‌ها نیز از نظر سرعت جوانه‌زنی تفاوت معنی‌داری ($P \leq 0.01$) داشتند (جدول ۳) و بیشترین سرعت جوانه‌زنی در اکوتیپ تربت حیدریه مشاهده شد. اثر متقابل پتانسیل آب و ژنوتیپ بر سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود. با وجود کاهش سرعت جوانه‌زنی تحت تأثیر کاهش پتانسیل آب، درصد کاهش این صفت بسته به اکوتیپ‌ها متفاوت بود، به نحوی که در پتانسیل ۴- بار اکوتیپ تربت حیدریه و خواف کمترین کاهش (به‌ترتیب ۶۱ و ۶۷ درصد) و اکوتیپ قوچان و رقم RZ19 بیشترین کاهش (حدود ۸۶ درصد) سرعت جوانه‌زنی را نسبت به پتانسیل صفر داشتند (جدول ۵). سرعت جوانه‌زنی یکی از شاخص‌های ارزیابی تحمل به خشکی گیاهان در مرحله جوانه‌زنی است به‌طوری‌که ارقام دارای سرعت جوانه‌زنی بیشتر در شرایط تنش از شانس بیشتری برای سبز شدن

عکس‌العمل متفاوت درصد جوانه‌زنی اکوتیپ‌ها نسبت به تنش خشکی، احتمالاً مربوط به تنوع ژنتیکی اکوتیپ‌ها از نظر جذب آب بوده است. در شرایط محدودیت آب، سرعت و میزان جذب آب و در نتیجه هیدرولیز و انتقال کربوهیدرات‌ها و به دنبال آن درصد جوانه‌زنی کاهش می‌یابد (Lobato et al., 2008). تفاوت درصد جوانه‌زنی بین ژنوتیپ‌های مختلف در مطالعات دیگر نیز نشان داده شده است (Jafarnezhad et al., 2009; Andalibi, 2005; Jajarmi, 2012).

سرعت جوانه‌زنی: اثر سطوح مختلف پتانسیل آب بر سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۱) و با کاهش پتانسیل آب، سرعت جوانه‌زنی نیز کاهش یافت به نحوی که در پتانسیل صفر بیشترین و در پتانسیل‌های ۵- و ۶- بار کمترین سرعت جوانه‌زنی مشاهده شد (جدول ۲). کاهش سرعت جوانه‌زنی در پتانسیل ۳- و

برخوردارند. به نظر می‌رسد کاهش سرعت جوانه‌زنی بذر در شرایط تنش رطوبتی بالاتر، ناشی از کندتر شدن فعالیت‌های متابولیکی درون بذر و متعاقب آن افزایش مدت زمان خروج ریشه‌چه از بذر و در نتیجه کاهش سرعت جوانه‌زنی است (Ganjali et al., 2017).

جدول ۳- درصد و سرعت جوانه‌زنی و طول ساقه‌چه ریشه‌چه اکوتیپ‌های زیره سبز

Table 3- Germination percentage and rate and plumule and radicle length in cumin ecotypes

اکوتیپ Ecotype	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate (number.day ⁻¹)	طول ساقه‌چه Plumule length (cm)	طول ریشه‌چه Radicle length (cm)
Quchan	17.7	2.0	1.2	1.9
Sabzevar	17.8	2.2	1.3	2.4
Khaf	25.0	1.9	1.8	2.8
Qaen	17.6	1.9	1.7	2.4
Torbat-e-Heydarieh	22.6	2.4	1.7	2.6
RZ19	20.9	2.1	1.4	2.2
LSD (0.05)	0.3	0.2	0.04	0.04

جدول ۴- درصد جوانه‌زنی اکوتیپ‌های زیره سبز در پتانسیل‌های مختلف آب

Table 4- Germination percentage of cumin ecotypes as affected by different water potentials

اکوتیپ Ecotype	سطوح پتانسیل آب Potential (bar)						
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
Quchan	59.0	40.2	18.0	5.7	1.0	0.0	0.0
Sabzevar	54.0	37.0	22.8	7.0	2.5	1.0	0.0
Khaf	75.0	53.3	31.5	10.0	3.8	1.3	0.0
Qaen	47.5	35.0	27.0	9.0	3.5	1.0	0.0
Torbat-e-Heydarieh	68.0	48.3	26.8	9.3	3.8	2.0	0.0
RZ19	63.0	45.0	25.8	8.3	3.3	1.0	0.0
LSD (0.05)= 0.9							

جدول ۵- سرعت جوانه‌زنی اکوتیپ‌های زیره سبز در پتانسیل‌های مختلف آب

Table 5- Germination rate of cumin ecotypes as affected by different water potentials

اکوتیپ Ecotype	سطوح پتانسیل آب Potential (bar)						
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
Quchan	5.1	4.5	2.6	1.4	0.7	0.0	0.0
Sabzevar	6.2	4.2	2.3	1.6	1.1	0.1	0.0
Khaf	4.3	3.4	2.4	1.8	1.4	0.5	0.0
Qaen	4.0	3.2	2.4	2.2	1.1	0.3	0.0
Torbat-e-Heydarieh	5.1	3.5	3.3	3.2	2.0	0.1	0.0
RZ19	5.4	4.1	3.0	1.5	0.8	0.1	0.0
LSD (0.05)= 0.5							

قائن در شرایط مشابه حدود ۵۸ درصد بود (جدول ۶). گزارش شده است که در شرایط تنش خشکی، تجمع ماده خشک در بافت ساقه‌چه افزایش یافته و رابطه مستقیمی بین میزان تجمع ماده خشک و رشد ساقه‌چه گیاهان متحمل وجود دارد. ارقامی که بتوانند در شرایط تنش خشکی طول ساقه‌چه خود را نسبت به سایر ارقام بیشتر افزایش دهند یا افت طول ساقه‌چه در آن‌ها با افزایش تنش خشکی کمتر باشد، گیاهچه‌های مقاوم نسبت به تنش خشکی به حساب می‌آیند (Emmerich & Hardgree, 1990). در شرایط تنش، مقدار آن گروه از پروتئین‌های دیواره سلولی که در طول شدن و رشد سلول نقش

طول ساقه‌چه: با افزایش تنش خشکی طول ساقه‌چه به‌طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) کاهش یافت، به نحوی که با کاهش پتانسیل آب از صفر به ۳- و ۶- بار به ترتیب ۵۹ و ۱۰۰ درصد کاهش در طول ساقه‌چه ایجاد شد (جدول ۲). با افزایش تنش خشکی، طول ساقه‌چه کلیه اکوتیپ‌ها کاهش یافت (جدول ۶)، دو اکوتیپ خواف و تربت‌حیدریه در شرایط عدم تنش طول ساقه‌چه بیشتری نسبت به سایر اکوتیپ‌ها داشتند، ولی کاهش پتانسیل آب به ۴- بار سبب کاهش طول ساقه‌چه اکوتیپ‌های مذکور به میزان ۸۰ درصد نسبت به پتانسیل صفر شد، در حالی که کاهش طول ساقه‌چه در اکوتیپ

ریشه‌چه و ساقه‌چه می‌گردد (Ganjali et al., 2017). در مجموع به نظر می‌رسد که اکوتیپ قائن از نظر این صفت نسبت به سایر اکوتیپ‌ها برتری داشته است.

دارند کاهش و در عوض برخی از ترکیبات پکتینی که موجب نرم شدن دیواره سلول می‌شود، افزایش می‌یابند (Marchner, 1995). به‌علاوه در شرایط تنش خشکی کاهش ترشح هورمون‌ها و فعالیت آنزیم‌ها در نتیجه جذب کمتر آب توسط بذر سبب کاهش رشد

جدول ۶- طول ساقه‌چه (سانتی‌متر) اکوتیپ‌های زیره سبز در پتانسیل‌های مختلف آب
Table 6- Plumule length (cm) of cumin ecotypes as affected by different water potentials

اکوتیپ Ecotype	سطوح پتانسیل آب Potential (bar)						
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
Quchan	3.3	2.2	1.4	1.1	0.5	0.0	0.0
Sabzevar	2.3	2.5	2.2	1.8	0.5	0.0	0.0
Khaf	4.4	3.6	2.6	1.2	0.9	0.0	0.0
Qaen	3.1	2.8	2.4	2.1	1.3	0.0	0.0
Torbat-e-Heydarieh	4.1	2.9	2.5	1.5	0.8	0.0	0.0
RZ19	3.3	2.8	2.3	1.1	0.7	0.0	0.0
LSD (0.05)= 0.1							

۷۸ درصد بود، در حالی که کاهش این صفت در اکوتیپ‌های قائن و RZ19 در شرایط مشابه حدود ۵۷ و ۶۰ درصد بوده است (جدول ۷). به نظر می‌رسد با افزایش تنش و کاهش آب قابل دسترس بذر جهت جوانه‌زنی، سرعت فعالیت‌های متابولیکی داخل بذر جهت جوانه‌زنی و به دنبال آن رشد ریشه‌چه کاهش می‌یابد. کاهش طول ریشه‌چه در اثر تنش خشکی توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Abdi et al., 2014; Kafi et al., 2006). ضمن این که تجمع ماده خشک در بافت‌های ذخیره‌ای ریشه‌چه اکوتیپ‌های متحمل در شرایط تنش بیشتر ذکر شده است (Emmerich & Hardgree, 1990).

طول ریشه‌چه: تأثیر پتانسیل آب بر طول ریشه‌چه اکوتیپ‌های زیره سبز معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۱) و با افزایش تنش خشکی طول ریشه‌چه کاهش یافت، به نحوی که با کاهش پتانسیل آب از صفر به ۴- بار، میانگین طول ریشه‌چه ۷۳ درصد کاهش داشت (جدول ۲). تفاوت اکوتیپ‌ها نیز از نظر طول ریشه‌چه معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود و اکوتیپ‌های خواف و قوچان به‌ترتیب بیشترین و کمترین طول ریشه‌چه را داشتند (جدول ۳). هرچند با افزایش تنش خشکی طول ریشه‌چه در کلیه اکوتیپ‌ها به‌طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) کاهش یافت، اما کاهش طول ریشه‌چه در اکوتیپ‌های قوچان و سبزوار در پتانسیل ۴- بار نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب حدود ۸۰ و

جدول ۷- طول ریشه‌چه (سانتی‌متر) اکوتیپ‌های زیره سبز در پتانسیل‌های مختلف آب
Table 7- Radicle length (cm) of cumin ecotypes as affected by different water potentials

اکوتیپ Ecotype	سطوح پتانسیل آب Potential (bar)						
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
Quchan	4.6	3.9	2.8	1.1	0.9	0.0	0.0
Sabzevar	5.9	4.3	3.1	2.5	1.3	0.0	0.0
Khaf	6.3	5.4	3.1	2.8	1.7	0.7	0.0
Qaen	4.9	4.7	2.7	2.5	2.1	0.0	0.0
Torbat-e-Heydarieh	6.1	4.2	3.3	2.9	1.5	0.0	0.0
RZ19	4.5	3.4	3.2	2.2	1.8	0.0	0.0
LSD (0.05)= 0.1							

نشان داد. در بررسی نظامی و همکاران (Nezami et al., 2010) بر روی ارزیابی تحمل به خشکی ژنوتیپ‌های متحمل به سرمای عدس در مرحله جوانه‌زنی نیز مشاهده شد که ژنوتیپ‌های MLC20 و MLC7 به‌ترتیب بالاترین و کمترین رتبه را به خود اختصاص دادند. تحمل به خشکی در طول مراحل رشد گیاه یکسان نیست، ولی آن دسته از اکوتیپ‌هایی که قادرند در پتانسیل‌های آب کم، بهتر آب

رتبه‌بندی اکوتیپ‌ها: رتبه‌بندی اکوتیپ‌ها نشان داد که در مجموع صفات مورد مطالعه، اکوتیپ‌های خواف و تربت حیدریه بهترین امتیاز را به خود اختصاص داد و اکوتیپ قوچان در پایین‌ترین رتبه قرار گرفت (جدول ۸). مطالعه کافی و همکاران (Kafi et al., 2005) بر روی جوانه‌زنی ۱۲ ژنوتیپ عدس نیز نشان داد که اکوتیپ محلی رباط واکنش مطلوب‌تری را در مقابله با تنش خشکی از خود

جذب کرده و به‌طور مناسبی جوانه‌زنی داشته باشند احتمالاً درصد سبز و استقرار مناسبی نیز خواهند داشت. ضمن این‌که در شرایط کاشت پاییزه تحمل به دماهای پایین نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین به نظر می‌رسد که در شرایط کمبود رطوبت و دمای پایین ابتدای فصل پاییز، اکوتیپ‌های خواف و تربت حیدریه جوانه‌زنی بهتری داشته باشند. با وجود این بررسی سبز اکوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی و دمای کم، اطلاعات ما را از چگونگی ارتباط بین جوانه‌زنی و سبز مزرعه‌ای اکوتیپ‌های زیره سبز بهبود خواهد بخشید.

جدول ۸- رتبه‌بندی اکوتیپ‌های زیره سبز بر اساس صفات مختلف مورد مطالعه

Table 8- Ecotypes ranking based on studied traits

اکوتیپ Ecotype	سطوح پتانسیل آب Potential (bar)				
	رتبه درصد جوانه‌زنی Rank of germination percentage	رتبه سرعت جوانه‌زنی Rank of germination rate	رتبه طول ساقچه‌چه Rank of plumule length	رتبه طول ریشه‌چه Rank of radicle length	رتبه نهایی Final rank
Quchan	4	2.5	5	5	16.5
Sabzevar	4	2.0	3	4	13.0
Khaf	1	3.0	1	1	6.0
Qaen	4	3.0	3	2	12.0
Torbat-e-Heydarieh	2	1.0	2	2	7.0
RZ19	3	2.0	4	3	12.0
LSD (0.05)= 0.1					

References

- Abdi, H., Bihamta, M. R., Aziz Ov, E., & Chogan, R. (2014). Investigation effect of drought stress level of PEG 6000 on seed germination principle and its relation with drought tolerance index in promising lines and cultivars of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4), 582-596. <https://doi.org/10.29252/jcb.9.21.139>
- Alvarado, V., & Bradford, K. (2002). A hydrothermal time model explains the cardinal temperature for seed germination. *Plant, Cell and Environment*, 25, 1061-1069. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00894.x>
- Amirnia, R., & Ghiyasi, M. (2016). Reducing drought stress effects in germination and establishment stage of cumin (*Cuminum Cyminum* L.) by seed priming. *Journal of Applied Biological Sciences*, 10(3), 24-26.
- Andalibi, B., Zangani, E., & Hagh Nazari. (2005). Effects of water stress on germination indices in six rapeseed cultivars (*Brassica napus* L.). *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 36(2), 457-463.
- Boroumand Rezazadeh, Z., & Koocheki, A. (2005). Germination response of ajowan, fennel and dill to osmotic potential of sodium chloride and polyethylene glycol 6000 in different temperature regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 3(2), 207-218. <https://doi.org/10.22067/gsc.v3i2.1304>
- Bukhtiar, B., & Shaykra, A. (1995). Drought tolerance in lentil. Differential genotypic response to drought. *Journal of Agricultural Research (lahore)*, 28, 117-126.
- Emmerich, W. E., & Hardgree, S. P. (1990). Polyethylene glycol solution contact effect on seed germination. *Agronomy Journal*, 82, 1103-1107. <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200060015x>
- Ganjali, A. R., Ajorlo, M., & Khaksafidi, A. (2017). The Effect of Drought and Salinity Stress on Seed Germination of (*Alyssum Homalocarpum*). *Journal of Crop Breeding*, 9(21), 139-146. <https://doi.org/10.29252/jcb.9.21.139>
- Ghajari, A. Gh., & Zeinali, E. (2003). Effects of salinity and drought stresses on germination and seedling growth of two cotton cultivars. *Seed and Plant*, 18(4), 506-509. <https://doi.org/10.22092/spij.2017.110760>
- Ghavami, F., Malboobi, M. A., Ghannadha, M. R., Yazdi samadi, B., Mozaffari, J., & Jafar aghaei, M. (2004). An Evaluation of Salt Tolerance in Iranian Wheat Cultivars at Germination and Seedling Stages. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 35(2), 453-464.
- Jafarnezhad, A., Taheri, G., & Rahchamanie, A. A. (2009). Study of drought tolerance in four wheat genotypes, at germination stage. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 2(1), 73-85. <https://doi.org/10.22077/escs.2009.54>
- Jajarmi, V. (2012). Effect of drought stress on germination indices in seven wheat cultivars (*T. aestivum* L.). *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 8(4), 183-192.
- Jefferies, R. A. (1994). *Physiology of crop response to drought*. In: Haverkort A.J. and MacKerron D.K.L. (Eds.), Potato ecology and modeling of crop under conditions limiting growth. Kluwer Academic Press. pp. 61-74.
- Kabiri, R., Farahbakhsh, H., & Nasibi, F. (2012). Effect of drought stress and its interaction with salicylic acid on black cumin (*Nigella sativa*) germination and seedling growth. *World Applied Sciences Journal*, 18(4), 520-527. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.04.878>

15. Kafi, M., Nezami, A., Hosaini, H., & Masomi A. (2005). Physiological effects of drought stress by polyethylene glycol on germination of lentil (*Lens culinaris* Medik.) genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 3(1), 69-80. <https://doi.org/10.22067/gsc.v3i1.1293>
16. Kafi, M., Rashed Mohassel, M. H., Koocheki, A., & Nassiri, M. (2006). *Cumin (Cuminum cyminum): Production and Processing*. CRC Press.
17. Lobato, A. K. S., Oliveira Neto, C. F., Costa, R. C. L., Santos Filho, B. G., F. Silva, K. S., Cruz, F. J. R., Abboud, A. C. S., & Laughinghouse, H. D. (2008). Germination of sorghum under the influences of water restriction and temperature. *Agricultural Journal*, 3(3), 220-224.
18. Marchner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
19. Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51, 914-916. <https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914>
20. Mut, Z., & Akay, H. (2010). Effect of seed size and drought stress on germination and seedling growth of naked oat (*Avena sativa* L.). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 16, 459-467.
21. Nezami, A.; Khamadi, N., Khajeh hosseini, M., & Bagheri, A. (2010). Evaluation of Drought Tolerance in Cold Hardy Lentils (*Lens culinaris* medik.) at Germination Stage. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8(1), 138-146. <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i1.7404>
22. Willenborg, C. J., Wildeman, J. C., Miller, A. K., Rossnagel, B. G., & Shirliff, S. J. (2005). Oat germination characteristics differ among genotypes, seed size and osmotic potentials. *Crop Science*, 45, 2023-2029. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0722>



Effect of Deficit Irrigation at Different Stages on Physiological Traits and Water Use Efficiency of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) under Two Planting Methods

F. Mashhadi¹, H. R. Khazaei^{2*}, M. R. Ramazani Moghaddam³

Received: 17-06-2020

Revised: 02-08-2020

Accepted: 31-08-2020

How to cite this article:

Mashhadi, F., Khazaei, H. R., & Ramazani Moghaddam, M. R. (2023). Effect of Deficit Irrigation at Different Stages on Physiological Traits and Water Use Efficiency of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) under Two Planting Methods. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 11-28. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsc.v0i0.87296>

Introduction

The increasing demand for medicinal plants in traditional medicine as well as the pharmaceutical industry has created the need for some plants to be grown commercially, but the lack of soil moisture poses a serious threat to their production. Planting method can affect the emergence and growth rate of crop and lead to decrease water consumption and increase irrigation water efficiency as yield increases. Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) is one of the drought tolerant plants. Saving water consumption by cultivating drought tolerant plants has been proposed as a strategy to combat drought. It should be noted, however, that irrigation without proper planning can reduce the growth and production of crops. In this regard, determining time of deficit irrigation with minimum damage is an appropriate solution that achieves optimum yield while saving water consumption. The aim of this study was to investigate the effect of different irrigation regimes and planting method on some physiological traits, yield and water use efficiency of Roselle plant.

Materials and Methods

The experiment was conducted as split plot based on randomized complete blocks design with three replications at the Research Farm of Kashmar Agricultural and Natural Resources Research Station, during two growth seasons 2016 and 2017. Irrigation (in seven levels i.e. I100: 100% crop water requirement (CWR), I₁₈₀: 80% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₂₈₀: 80% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I₃₈₀: 80% CWR from beginning to end of flowering, I₁₆₀: 60% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₂₆₀: 60% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I₃₆₀: 60% CWR from beginning to end of flowering) and planting method (in two levels i.e. direct and indirect) were in main plots and sub plots, respectively. In the transplanting method, the seeds were sown in the transplant tray on March 10, 2016 and 2017 and transplanted to the farm in four-leaf stage. Direct cultivation was also carried out in April, in 2.5 × 7 meter plots at a depth of 1.5 cm.

In order to measure physiological traits, sampling from the youngest leaves of plants under stress and control conditions was carried out at the maximum flowering stage. Physiological traits including chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid, leaf relative water content and proline content were measured using these leaves. At the harvest time, two square meters of each plot were harvested. Then, seed and calyx yield were measured and using the measured amount of water consumed, water use efficiency based on seed and calyx were calculated.

Data were analyzed with SAS software; obtained averages compared with using Tukey's Studentized Range (HSD) Test at the 5% probability level.

1- Ph.D. Student in crop physiology, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

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

3- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email :h.khazaie@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jsc.v0i0.87296>

Results and Discussion

The results showed leaf relative water content was affected only by irrigation and planting method and seed and calyx yields were affected only by irrigation. The leaf relative water content in seedling planting method was higher than direct planting. The highest relative leaf water content (84.66%), seed (667.54 kg ha⁻¹) and calyx yield (392.73 kg ha⁻¹) were obtained in I100 treatment that for yield had no significant difference with I801 treatment. The lowest these traits were also obtained in I₃60 treatment.

The interaction effect between irrigation and planting method was significant on chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids, leaf proline content, seed and calyx water use efficiency. In most irrigation levels, transplanting improved these traits compared to direct sowing. I100 and transplanting treatment had the highest chlorophyll a (0.31 μmol g⁻¹ fw), chlorophyll b (0.16 μmol g⁻¹ fw) and carotenoids (0.56 μmol g⁻¹ fw) and I₃60 and transplanting treatment had the highest leaf proline content (7.95 μmol g⁻¹ fw). The highest seed (0.15 kg m⁻³) and calyx (0.08 kg m⁻³) water use efficiency were obtained in I₁60 and transplanting treatment and I₁80 and transplanting treatment was located in the second level. I₃60 and direct planting method had the lowest seed (0.06 kg m⁻³) and calyx (0.03 kg m⁻³) water use efficiency.

Conclusion

The results of this study revealed that deficit irrigation at 80% of the crop water requirement from 8-leaf stage to the end of flowering along with transplanting method was more effective in saving irrigation water with a good yield of the Roselle plant compare to treatment of 100% of the crop water requirement.

Keywords: Carotenoid, Drought stress, Leaf relative water content, Transplanting

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص ۱۱-۲۸

تأثیر زمان‌های مختلف کم‌آبیاری بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و کارایی مصرف آب چای ترش (*Hibiscus sabdariffa* L.) در دو روش کشت

فاطمه مشهدی^۱، حمیدرضا خزاعی^{۲*}، محمدرضا رضائی مقدم^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰

چکیده

به منظور بررسی تأثیر کم‌آبیاری در زمان‌های مختلف بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و کارایی مصرف آب گیاه چای ترش در دو روش کاشت، آزمایشی مزرعه‌ای به صورت اسپلیت پلات یا کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کاشمر در دو سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵ انجام شد. تیمارهای آبیاری به عنوان کرت اصلی در هفت سطح (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی (I100)، ۸۰ درصد نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی (I180)، ۸۰ درصد نیاز آبی از هشت برگ تا اوایل گلدهی (I280)، ۸۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی (I380)، ۶۰ درصد نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی (I160)، ۶۰ درصد نیاز آبی از هشت برگ تا اوایل گلدهی (I260)، ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی (I360) و روش کاشت به عنوان کرت فرعی در دو سطح (نشاء کاری و کشت مستقیم) بودند. نتایج نشان داد که محتوای نسبی آب برگ تنها تحت تأثیر کم‌آبیاری و روش کاشت و عملکرد دانه تنها تحت تأثیر کم‌آبیاری قرار گرفت. محتوای نسبی آب برگ در روش کاشت نشائی بیشتر از کاشت مستقیم بود. بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۸۴/۶۶ درصد)، عملکرد دانه (۶۶۷/۵۴ کیلوگرم در هکتار) و کاسبرگ (۳۹۲/۷۳ کیلوگرم در هکتار) در تیمار I100 حاصل شد که برای عملکرد دانه و کاسبرگ اختلاف معنی داری با تیمار I180 مشاهده نشد. اثر متقابل یا برهمکنش کم‌آبیاری و روش کاشت نشان داد که نشاء کاری توانست سبب بهبود میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، پرولین، عملکرد کاسبرگ و کارایی مصرف آب دانه و کاسبرگ در اکثر سطوح آبیاری گردد. بیشترین میزان کارایی مصرف آب دانه (۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و کاسبرگ (۰/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمار I160 و روش کاشت نشائی حاصل شد و تیمار I180 و روش کاشت نشائی در جایگاه بعدی قرار داشت. با توجه به نتایج حاصله، آبیاری به میزان ۸۰ درصد نیاز آبی از مرحله هشت برگ تا اواخر گلدهی و کشت نشائی به عنوان شیوه مدیریت مناسب جهت دستیابی به عملکرد مطلوب و حفظ منابع آب در منطقه مورد مطالعه مناسب به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب برگ، نشاء کاری

مقدمه

چای ترش با نام علمی *Hibiscus sabdariffa* L. گیاهی

دارویی متعلق به خانواده Malvaceae می‌باشد که در ایران به نام‌های چای ترش، چای قرمز و چای مکه یا مکی شناخته می‌شود (Torabi, 2004). این گیاه یک‌ساله و بومی آفریقا بوده و به سرما و یخبندان بسیار حساس است (Seghatoleslami et al., 2013). برگ، کاسبرگ و دانه چای ترش در تغذیه انسان و دام مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیبر آن نیز منبع مهمی در صنعت نساجی و کاغذ است (Sepahrom & Moosavi, 2016; Parsa Motlagh et al., 2018). کشت چای ترش در سراسر جهان به دلیل کاربردهای دارویی آن در حال توسعه است (Ahmadpoor Dehkordi et al., 2019). میوه این گیاه دارای ویتامین C و کاسبرگ‌ها حاوی گوسیتین، آنتوسیانین، گلوکوزید هیبیسین هستند که اثرات کاهنده ویسکوزیته خون، فشار خون، تحریک کننده روده و ادرارآور دارند (Perry, 1980).

۱- دانشجوی دکتری، فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

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

۳- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: h.khazaie@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/gsc.v0i0.87296>

داد که اثر تنش خشکی بر وزن خشک کاسبرگ و کل گیاه معنی‌دار بود. باباتونده و موفوکه (Babatunde & Mofoke, 2006) در بررسی تأثیر پنج دور آبیاری شامل ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ روز در چای ترش نشان دادند که بیشترین عملکرد کاسبرگ خشک با میانگین ۶۸۲ کیلوگرم در هکتار از تیمار آبیاری هر ۷ روز یکبار حاصل شد. سپهرم و موسوی (Sepahrom & Moosavi, 2016) در مطالعه خود نشان دادند که افزایش دور آبیاری از ۶۰ به ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی در چای ترش عملکرد تر و خشک کاسبرگ و عملکرد بیولوژیک را کاهش داد.

روش کاشت می‌تواند بر نحوه سبز شدن و میزان رشد گیاه زراعی تأثیرگذار باشد و به کاهش مصرف آب و افزایش بازده آب آبیاری همراه با افزایش عملکرد منجر شود (Griffith et al., 1990). تولید نشاء در گلخانه و انتقال آن به مزرعه، زودرسی محصول را مضاعف می‌کند، به طوری که با استفاده از نشاء، دوره رشد محصول جلو انداخته می‌شود (Mohamad Zadeh et al., 2018). به طور کلی استفاده از نشاء گیاهان برای رشد سریع‌تر و استقرار بهتر بوته قبل از این که درجه حرارت محیط برای جوانه‌زنی و رشد گیاه مناسب شود مورد توجه می‌باشد (Monks et al., 1998). مطالعات اندکی در زمینه واکنش گیاه چای ترش به روش‌های مختلف کاشت در دسترس است. در مطالعه‌ای، فلاحی و همکاران (Fallahi et al., 2017) اثر دو روش کاشت مستقیم و نشائی را بر ویژگی‌های کمی و کیفی چای ترش مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش کاشت نشائی سبب بهبود اسیدیته کل، فنل کل، ویتامین C، عملکرد کاسبرگ و کارایی مصرف آب چای ترش شد.

چای ترش یکی از گیاهان کم نیاز و مقاوم به خشکی است (Akbarinia et al., 2004). صرفه‌جویی در مصرف آب با کاشت گیاهان مقاوم به خشکی به عنوان راهکاری برای مقابله با خشکی مطرح شده است. اما باید توجه داشت که اعمال کم‌آبیاری بدون برنامه‌ریزی دقیق می‌تواند منجر به کاهش رشد و تولید محصولات زراعی گردد. در این راستا تعیین زمان کم‌آبیاری که همراه با حداقل خسارت باشد راهکاری مناسب است که ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، سبب دستیابی به محصول بهینه می‌گردد، از این رو هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری و روش کشت بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک، عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه چای ترش بود.

مواد و روش‌ها

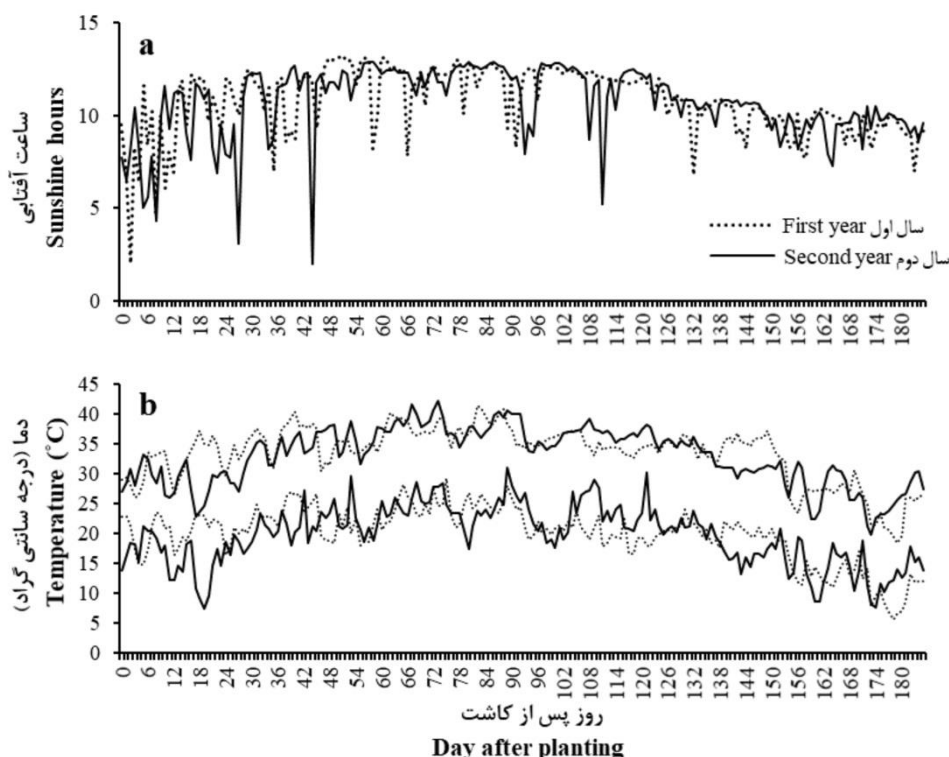
به‌منظور بررسی تأثیر تنش خشکی در زمان‌های مختلف و روش کاشت بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکرد چای ترش، آزمایشی مزرعه‌ای در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی

مصرف چای ترش سبب جلوگیری از بروز سرطان، بهبود کارایی دستگاه گوارش و کاهش فشار خون می‌گردد (Prasongwatana et al., 2008).

افزایش تقاضای گیاهان دارویی در پزشکی سنتی و همچنین صنعت داروسازی این نیاز را به‌وجود آورده است که برخی گیاهان در سطح تجاری کشت شوند، اما کمبود رطوبت خاک تهدیدی جدی برای تولید این گیاهان به شمار می‌آید (Abdul Jaleel et al., 2007). کمبود آب مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان زراعی، باغی و دارویی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا است (Heidari et al., 2006). کاهش محتوای آب در بافت‌های گیاهان در شرایط تنش خشکی باعث محدود شدن رشد و برخی تغییرات فیزیولوژیکی و متابولیکی در آن‌ها می‌شود (Good & Zaplachinski, 1994). کمبود آب سبب کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی به‌ویژه آنزیم رویسکو می‌شود (Burse, 1991). محتوای نسبی آب برگ شاخصی مهم در شناسایی پاسخ گیاهان به تنش خشکی است. زیاد بودن محتوای نسبی آب برگ و کم بودن سرعت از دست رفتن آب نشان‌دهنده سازگاری گیاهان به خشکی است (Munne et al., 1999). از سازوکارهای دیگری که گیاه در شرایط کمبود آب از آن بهره می‌گیرد، تنظیم اسمزی است. تجمع اسمولیت‌های سازگار نظیر پرولین و قندهای محلول از مهم‌ترین اسمولیت‌های سهیم در تنظیم اسمزی برای غالب شدن بر آثار سوء تنش خشکی است (Sanjari Mijani et al., 2018). مقدار پرولین آزاد در گیاهان در شرایط بدون تنش خشکی بسیار کم و در حدود ۰/۳ تا ۰/۶ میلی‌گرم در گرم ماده خشک است. مقدار این ماده پس از کاهش آب بافت‌ها تا ۴۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در هر گرم ماده خشک افزایش می‌یابد (Rajinder, 1987). مطالعات مختلفی در زمینه تأثیر تنش خشکی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکرد گیاهان صورت گرفته است. سنجرى و همکاران (Sanjari Mijani et al., 2018) در مطالعه‌ای روی گیاه چای ترش نشان دادند که آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشک A نسبت به آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشک A، کلروفیل a، کلروفیل b و پروتئین را کاهش و میزان پرولین را افزایش داد. میرشکاری و همکاران (Mirshekari et al., 2017) در مطالعه‌ای بیان داشتند میزان رشد ریشه و بخش‌های هوایی، محتوای نسبی آب برگ و میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی چای ترش در شرایط تنش خشکی به شدت کاهش یافت. در مطالعه هاشمی فدکی و همکاران (Hashemi Fadaki et al., 2018) کمترین میزان محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، عملکرد تر و خشک کاسبرگ و بیشترین میزان پرولین گیاه چای ترش در تیمار تنش خشکی به میزان ۳۰ درصد آب در دسترس گیاه به‌دست آمد. نتایج آزمایش رهبریان و همکاران (Rahbarian et al., 2011) نشان

طول فصل رشد چای ترش (اردیبهشت تا آبان ماه) در دو سال زراعی مورد مطالعه برای ایستگاه هواشناسی کاشمر در شکل ۱ نشان داده شده است. میانگین دمای روزانه در طول فصل رشد چای ترش در سال اول و دوم به ترتیب در دامنه بین ۱۲/۵۰ تا ۳۳/۸۰ و ۱۳/۹۵ تا ۳۵/۸۵ درجه سانتی‌گراد قرار داشت و میزان بارندگی نیز در طول فصل رشد چای ترش در سال اول و دوم به ترتیب ۲۱/۱۲ و ۶/۵۴ میلی‌متر بود.

کاشمر، واقع در ۲۳۰ کیلومتری جنوب غرب مشهد با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۸ درجه شرقی و ارتفاع ۱۰۵۳ متر از سطح دریا در دو سال زراعی ۱۳۹۴-۹۵ و ۱۳۹۵-۹۶ انجام شد. متوسط بارندگی سالانه ۱۹۳ میلی‌متر و حداکثر و حداقل دمای مطلق سالانه در این منطقه به ترتیب ۳۷/۴ و ۰/۷- درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Sabzevari et al., 2010). آب و هوای منطقه بر اساس طبقه‌بندی متزگر و همکاران (Metzger et al., 2012) گرم و خشک است. داده‌های هواشناسی محل آزمایش در



شکل ۱- (a) ساعت آفتابی و (b) دمای حداکثر و حداقل روزانه ایستگاه هواشناسی کاشمر در طول فصل رشد چای ترش طی سال‌های زراعی ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶

Figure 1- a) Sunshine hours and b) daily maximum and minimum temperature of Kashmar meteorological station during the growing season in 2016 and 2017

در روش کشت نشائی بذرها در ۲۰ اسفند ماه در هر دو سال داخل سینی نشاء تحت شرایط گلخانه‌ای کشت و در مرحله چهار برگی به زمین منتقل شد. کشت مستقیم نیز هم‌زمان با انتقال نشاء در ۱۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۵ و ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۶، در کرت‌هایی با ابعاد ۲/۵ در ۷ متر در عمق ۱/۵ سانتی‌متری انجام گرفت. عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک و لودر در اوایل فروردین ماه انجام شد و سپس با استفاده از تراکتور زمین به‌صورت جوی و پشته با عرض ۵۰ سانتی‌متر آماده و نقشه طرح اجرا شد، که هر کرت شامل ۵ خط کاشت به طول ۷ متر با فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر و روی

آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات (کرت‌های خرد شده) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری به‌عنوان کرت اصلی در هفت سطح (۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۸۰ درصد نیاز آبی از مرحله هشت برگی تا اواخر گلدهی، ۸۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، ۶۰ درصد نیاز آبی از مرحله هشت برگی تا اواخر گلدهی، ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی) و روش کاشت به‌عنوان کرت فرعی در دو سطح (نشاءکاری و کشت مستقیم) بودند.

مزرعه نمونه برداری به صورت تصادفی انجام و به آزمایشگاه منتقل شد که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

ردیف ۲۰ سانتی متر بود. فاصله بین کرت ها یک متر و بین بلوک ها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. قبل از انجام آزمایش به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی در دو سال آزمایش

Table 1- Physical and chemical particular of research station soil in two experimental year

سال آزمایش Experimental year	کلاس بافت خاک Soil texture class	پتاسیم Potassium (%)	فسفر Phosphorus (%)	نیتروژن Nitrogen (%)	ماده آلی Organic matter (%)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع EC (dS m ⁻¹)	اسیدیته pH
2016	لوم_رس_شن	2.1	0.12	0.04	0.36	2.5	7.9
2017	لوم	2	0.11	0.04	0.39	2.4	8

استفاده از برگ های فوق اندازه گیری شد.

جهت اندازه گیری میزان کلروفیل و کاروتنوئید از روش آرنون (Arnon, 1949) و محتوای نسبی آب برگ از روش لوییت (Levitt, 1980) استفاده شد. میزان پرولین برگ نیز طبق روش بیتس (Bates et al., 1973) محاسبه گردید.

پس از پایان دوره رشد گیاه در اواسط مهر ماه، دو متر مربع از هر کرت برداشت گردید. سپس عملکرد کاسبرگ و دانه مورد اندازه گیری قرار گرفت. اولین گلدهی در ۹۵ روز پس از کاشت اتفاق افتاد و پایان گلدهی ۱۲۲ روز پس از کاشت بود.

میزان کارایی مصرف آب براساس عملکرد اقتصادی کاسبرگ و دانه به صورت مجزا بر حسب گرم بر متر مکعب آب مصرفی (آب آبیاری + بارندگی) طبق رابطه (۲) محاسبه گردید:

$$WUE = D / Wp + Wi \quad (2)$$

در این رابطه، D عملکرد اقتصادی، Wp آب بارندگی و Wi آب آبیاری است.

تجزیه و تحلیل آماری داده ها با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۳ و مقایسه میانگین ویژگی های مورد مطالعه بر مبنای آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

رنگدانه های فتوسنتزی

نتایج تجزیه مرکب داده ها نشان داد که بین دو سال آزمایش تفاوت معنی داری در سطح احتمال یک درصد از نظر میزان کلروفیل a وجود داشت (جدول ۲)، به طوری که میزان کلروفیل a در سال دوم آزمایش بیشتر از سال اول بود (شکل ۲). با توجه به این که دمای مطلوب برای رشد گیاه چای ترش در محدوده ۱۶ تا ۳۲ درجه سانتی گراد قرار دارد (Mohammad Zadeh, 2015) احتمالاً شرایط دمایی مطلوب تر در سال دوم آزمایش (شکل ۱) سبب شده است میزان کلروفیل a در این سال بیشتر از سال اول باشد.

میزان تبخیر و تعرق با استفاده از روش پنمن مانیتث و با استفاده از آمار روزانه ایستگاه سینوپتیک کاشمر، محاسبه شد. تبخیر و تعرق گیاه از حاصل ضرب ضریب گیاهی (Kc) به دست آمده در منطقه مورد مطالعه در تبخیر و تعرق پتانسیل حاصل شد. از آن جا که نیازها و ضرایب گیاهی چای ترش در دسترس نمی باشد، با توجه به تشابه چای ترش و گیاه پنبه از نقطه نظر تعلق به خانواده مشترک و داشتن خصوصیات رشدی مشابه، Kc مربوط به پنبه در معادلات وارد شد. سپس تبخیر و تعرق روزانه گیاه (Td) با در نظر گرفتن درصد سایه انداز با استفاده از رابطه (۱) برآورد گردید.

$$Td = ETp \times (0.1 \times Ps \times 0.5) \quad (1)$$

در این معادله، ETp تبخیر و تعرق گیاه بدون ملاحظه درصد سایه انداز و Ps درصد سایه انداز گیاه است. با اعمال ضرایب ۰/۸، ۰/۶ و ۱/۰۰ و همچنین راندمان آبیاری ۹۰ درصد میزان نیاز آبی روزانه محاسبه و با توجه به دور آبیاری و نیز مساحت هر کرت حجم آب آبیاری مورد نیاز هر تیمار محاسبه و از طریق تنظیم با کنتور و شیر فلکه در هر بار آبیاری در اختیار گیاه قرار گرفت. آبیاری با استفاده از لوله های تیپ با ضخامت جدار لوله ۳۰۰ میکرون، خروجی هایی با فاصله ۲۰ سانتی متر و آبدی ۴ لیتر در ساعت در واحد متر صورت گرفت. اعمال تیمارهای آبیاری در زمان استقرار کامل گیاهچه ها و از مرحله ۸ برگی آغاز شد.

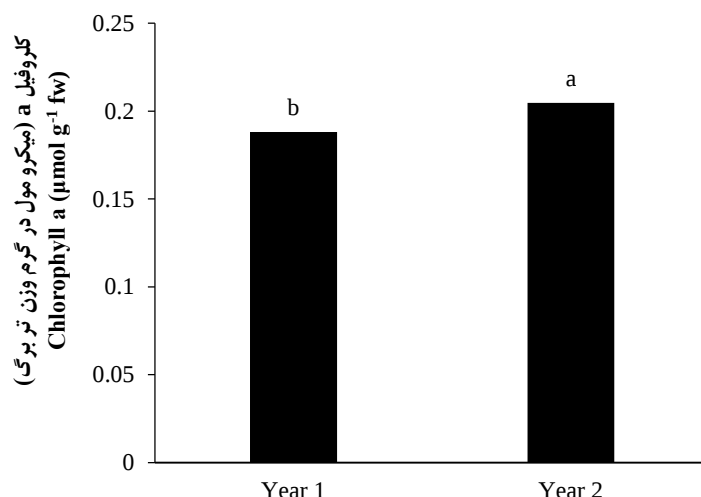
به منظور تأمین نیاز کودی گیاه، با توجه به نتایج آنالیز خاک، کودهای سوپر فسفات تریپل (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار)، سولفات پتاسیم (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و کود اوره (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) در ۲ نوبت همزمان با آبیاری در مزرعه اعمال شد. همچنین از هیچ گونه علف کش و آفت کشی در طول دوره رشد گیاه استفاده نشد و وجین علف های هرز به صورت دستی صورت گرفت.

به منظور اندازه گیری ویژگی های فیزیولوژیک نمونه گیری از جوان ترین برگ های توسعه یافته گیاهان در مرحله حداکثر گلدهی انجام و ویژگی های فیزیولوژیک شامل کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب برگ و میزان پرولین به شرح زیر با

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر آبیاری و روش کاشت بر ویژگی‌های فیزیولوژیک چای ترش
Table 2- Analysis of variance for effects of irrigation and planting method on physiological traits of Roselle

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات (MS)				
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoids	محتوای نسبی آب برگ Leaf relative water content	میزان پرولین برگ Leaf proline content
سال Year	1	0.00585**	0.006616 ^{ns}	0.001563 ^{ns}	40.331215**	0.582267 ^{ns}
سال × تکرار Year × Replication	4	0.00112	0.000234	0.000408	10.254869	0.894335
آبیاری Irrigation	6	0.02131**	0.013511**	0.039196**	1663.267482**	38.508694**
سال × آبیاری Year × Irrigation	6	0.00007	0.000001	1.9492E-07	0.288299	0.000146
خطای a Error a	24	0.00034	0.000511	0.002481	4.948989	0.102444
روش کاشت Planting method	1	0.01131**	0.010638**	0.033752**	50.320836**	2.541653**
سال × روش کاشت Year × Planting method	1	0.00003	0.000001	1.9048E-09	0.023836	0.000517
آبیاری × روش کاشت Irrigation × Planting method	6	0.01505**	0.003290**	0.011215**	5.848474 ^{ns}	1.380060**
سال × آبیاری × روش کاشت Year × Irrigation × Planting method	6	0.00006	0.000001	1.7357E-07	0.212251	0.000144
خطای b Error b	28	0.00075	0.000542	0.004002	4.342269	0.582267
ضرب تغییرات (%) C. V	-	14.0	24.2	15.9	3.1	6.7

* و ** به ترتیب معنی‌داری سطوح احتمال پنج و یک درصد، ns غیر معنی‌دار
***, are significant at 5 and 1% probability levels, ns: Non-significant



شکل ۲- اثر سال بر میزان کلروفیل a چای ترش

Figure 2- Effect of year on chlorophyll a content of Roselle

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means followed by similar letter(S) are not significantly different at 5% probability level using Tukey's Studentized Range (HSD) Test.

احتمالاً سازگار شدن گیاه با شرایط ایجاد شده سبب شد که کاهش حجم آبیاری نتواند تأثیری بر محتوای کلروفیل b و کاروتنوئید داشته باشد. کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی با افزایش شدت خشکی می‌تواند به دلیل افزایش تولید رادیکال‌های آزاد در اثر تنش خشکی باشد که موجب پراکسیداسیون شده و در نتیجه به تخریب و تجزیه این رنگدانه‌ها می‌انجامد (Wise & Naylor, 1987; Schutz & Fangmeir, 2001). همچنین تنش خشکی با اختلال در فرآیندهای شیمیایی مسیر فتوسنتزی می‌تواند مانع انتقال الکترون در فتوسیستم II شود و کارایی فتوسنتز را کاهش دهد (Lashkari, 2013). محققان دیگری نیز کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی را با ایجاد تنش خشکی در چای ترش گزارش نمودند (Hashemi Fadaki et al., 2018; Sanjari Mijani et al., 2018). نتایج نشان داد که تنها در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری به میزان ۸۰ درصد از اوایل تا اواخر گلدهی کشت نشائی توانست به ترتیب سبب افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل a و کلروفیل b نسبت به کشت مستقیم گردد. در تمام سطوح آبیاری، کشت نشائی سبب افزایش میزان کاروتنوئید گردید اما در هیچ از موارد این افزایش معنی‌دار نبود (جدول ۳). با توجه به این که نشاءکاری بر طول مراحل فنولوژیک مؤثر است و سبب جابه‌جایی زمان وقوع مراحل فنولوژیک نسبت به کشت مستقیم می‌گردد (Aghaee Okhchlar et al., 2012) احتمالاً شرایط مناسب‌تر جهت رشد چای ترش در کشت نشائی سبب افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی نسبت به کشت مستقیم آن شده است.

اثر کم‌آبیاری و روش کاشت و اثر متقابل آن‌ها بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل کم‌آبیاری و روش کاشت نشان داد بیشترین میزان کلروفیل a (۰/۳۱ میکرو مول در گرم وزن تر برگ)، کلروفیل b (۰/۱۶ میکرو مول در گرم وزن تر برگ) و کاروتنوئید (۰/۵۶ میکرو مول در گرم وزن تر برگ) در تیمار آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی و روش کاشت نشائی به‌دست آمد (جدول ۳). کمترین میزان کلروفیل a (۰/۱۴ میکرو مول در گرم وزن تر برگ) در تیمارهای آبیاری به میزان ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی و روش کاشت مستقیم، کلروفیل b (۰/۰۴ میکرو مول در گرم وزن تر برگ) در تیمارهای آبیاری به میزان ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی و روش کاشت مستقیم و کاروتنوئید (۰/۳۱ میکرو مول در گرم وزن تر برگ) در تیمار آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی و روش کاشت مستقیم به‌دست آمد (جدول ۳). چای ترش گیاهی مقاوم به خشکی است و آبیاری زیاد آن با تأثیر بر رنگدانه‌های فتوسنتزی موجب کاهش آن‌ها و در نتیجه سبزی برگ‌ها می‌شود (Hashemi Fadaki et al., 2018). لذا به نظر می‌رسد آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی با در نظر گرفتن شرایط محیطی حاکم در طول دوره رشد چای ترش با تأثیر منفی بر کلروفیل a موجب شده است تا میزان آن کاهش یابد. با توجه به این که در تیمارهای آبیاری کامل، آبیاری به میزان ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی از هشت برگی تا اواخر گلدهی، کم‌آبیاری از مرحله هشت برگی تا اواخر گلدهی اعمال شده بود

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و روش کاشت بر ویژگی‌های فیزیولوژیک چای ترش

Table 3- Mean comparison for interaction effect between irrigation and planting method on physiological traits of Roselle					
تیمار	Transplanting	Direct	نشاءکاری مستقیم	نشاءکاری مستقیم	تیمار
Treatment	Transplanting	Direct	نشاءکاری مستقیم	نشاءکاری مستقیم	Treatment
Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoids	Proline	Chlorophyll a	Chlorophyll b
($\mu\text{mol g}^{-1} \text{fw}$)	($\mu\text{mol g}^{-1} \text{fw}$)	($\mu\text{mol g}^{-1} \text{fw}$)	($\mu\text{mol g}^{-1} \text{fw}$)	($\mu\text{mol g}^{-1} \text{fw}$)	($\mu\text{mol g}^{-1} \text{fw}$)
1100	0.31 ^a	0.16 ^a	0.56 ^a	2.48 ^e	2.86 ^{de}
I ₁ 80	0.22 ^{bcd}	0.13 ^{abc}	0.45 ^{ab}	3.18 ^{de}	3.74 ^d
I ₂ 80	0.23 ^{bc}	0.14 ^{ab}	0.40 ^{ab}	4.71 ^e	4.73 ^e
I ₃ 80	0.15 ^{de}	0.10 ^{abcde}	0.39 ^{ab}	6.32 ^b	6.01 ^b
I ₁ 60	0.19 ^{cde}	0.09 ^{bcde}	0.32 ^b	3.48 ^{de}	5.18 ^e
I ₂ 60	0.15 ^{de}	0.11 ^{abcd}	0.43 ^{ab}	6.07 ^b	6.38 ^b
I ₃ 60	0.14 ^e	0.04 ^e	0.31 ^b	7.95 ^a	7.73 ^a

1100: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی، ۱۸۰٪ آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، ۱۸۰٪ آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی تا ابتدای گلدهی، ۱۸۰٪ آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، ۱۸۰٪ آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از ابتدای گلدهی تا اواخر گلدهی، ۱۸۰٪ آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از ابتدای گلدهی تا اواخر گلدهی، ۱۸۰٪ آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از ابتدای گلدهی تا اواخر گلدهی.

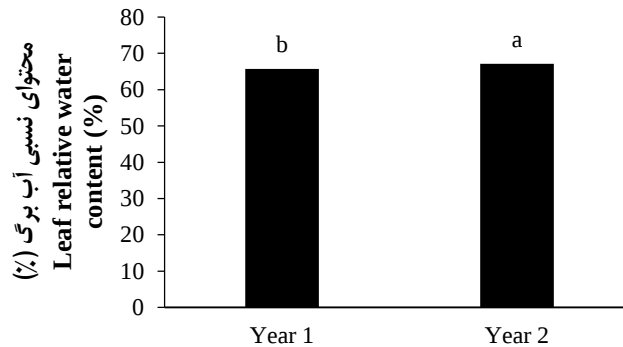
در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

1100: 100% crop water requirement (CWR), I₁80: 80% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₂80: 80% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₃80: 80% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₁60: 60% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₂60: 60% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₃60: 60% CWR from 8-leaf stage to end of flowering.

Means in each column followed by similar letter(S) are not significantly different at 5% probability level using Tukey's Studentized Range (HSD) Test.

محتوای نسبی آب برگ

نتایج نشان داد که بین دو سال آزمایش اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد از نظر محتوای نسبی آب برگ وجود داشت



شکل ۳- اثر سال بر محتوای نسبی آب برگ چای ترش

Figure 3- Effect of year on leaf relative water content of Roselle

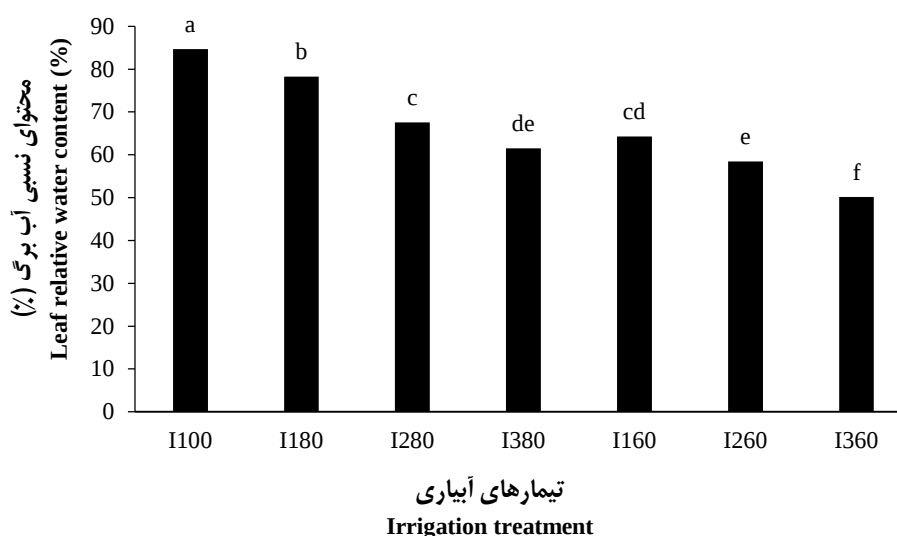
میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means followed by similar letter(S) are not significantly different at 5% probability level using Tukey's Studentized Range (HSD) Test.

پرویلین برگ

نتایج نشان داد تأثیر کم‌آبیاری و روش کاشت و اثر متقابل آن‌ها بر میزان پرویلین برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد که بیشترین میزان پرویلین برگ در تیمارهای آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی و روش کاشت نشائی و مستقیم (به‌ترتیب ۷/۷۳ و ۷/۹۵ میکرو مول بر گرم وزن تر) حاصل شد و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد و روش کاشت نشائی (۲/۴۸ میکرو مول بر گرم وزن تر) به‌دست آمد (جدول ۳). زمانی که گیاهان در شرایط تنش قرار می‌گیرند، غلظت آسیمولیت‌هایشان را افزایش می‌دهند تا جذب آب در شرایط تنش ادامه یابد. در بین آسیمولیت‌ها پرویلین فراوان‌ترین ماده حل شده سازگار است که تجمع می‌یابد (Kuznetsov & Shevykova, 1999). نتایج مشابهی توسط سایر محققین گزارش شده است (Ahmadian et al., 2010; Babaei et al., 2010). نتایج همبستگی‌های ویژگی‌های مورد مطالعه نیز تأییدکننده نتیجه حاصله می‌باشد (جدول ۴). بین پرویلین با کلروفیل‌های a, b و کاروتنوئید ارتباط منفی و معنی‌داری (به‌ترتیب $r = -0.43^{**}$ ، $r = -0.66^{**}$ و $r = -0.60^{**}$) وجود داشت (جدول ۴)، چرا که در شرایط بدون تنش که مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی در حداکثر مقدار خود قرار داشت، پرویلین بسیار اندک تولید شد (جدول ۳).

تأثیر کم‌آبیاری و روش کاشت بر محتوای نسبی آب برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین و کمترین میزان محتوای نسبی آب برگ بین روش‌های مختلف آبیاری به‌ترتیب در شرایط بدون تنش و آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی حاصل شد (شکل ۴). تنش خشکی سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل کل آب و در نهایت کاهش رشد گیاهان می‌شود (Sanjari Mijani et al., 2015). سازوکار تنظیم اسمزی در گیاهان متحمل به خشکی، سبب حفظ و بالا نگه داشتن محتوای نسبی آب در گیاه می‌شود. چنانچه محتوای نسبی آب برگ در محدوده ۳۵-۷۰ درصد باشد، ظرفیت فتوسنتزی کاهش یافته که علت اصلی آن می‌تواند ممانعت نوری باشد (Kafi & Damghani, 2000). سنجری میجانی و همکاران (Sanjari Mijani et al., 2015) و عباس‌زاده و همکاران (Abbaszadeh et al., 2008) نیز کاهش محتوای نسبی آب برگ را با ایجاد تنش خشکی بر روی گیاهان دارویی چای ترش و بادرنجبویه گزارش نمودند. مقایسات میانگین در روش‌های مختلف کاشت نیز نشان داد که محتوای نسبی آب برگ در روش کاشت نشائی بیشتر بود (شکل ۵). احتمالاً شرایط مطلوب‌تر آب و هوایی در طی رشد رویشی در روش نشاءکاری نسبت به کاشت مستقیم بذر سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ شده است.

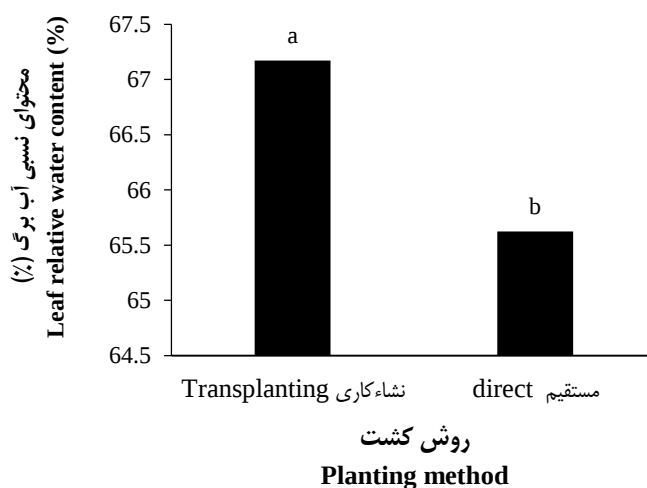


شکل ۴- اثر آبیاری بر محتوای نسبی آب برگ چای ترش

Figure 4- Effect of irrigation on relative leaf water content of Roselle

I100: آبیاری به میزان ۱۰۰٪ نیاز آبی، I180: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، I280: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا ابتدای گلدهی، I380: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، I160: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، I260: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا ابتدای گلدهی، I360: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی. میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

I100: 100% crop water requirement (CWR), I180: 80% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I280: 80% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I380: 80% CWR from beginning to end of flowering, I160: 60% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I260: 60% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I360: 60% CWR from beginning to end of flowering. Means followed by similar letter(S) are not significantly different at 5% probability level using Tukey's Studentized Range (HSD) Test.



شکل ۵- اثر روش کاشت بر محتوای نسبی آب برگ چای ترش

Figure 5- Effect of planting method on relative leaf water content of Roselle

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means followed by similar letter(S) are not significantly different at 5% probability level using Tukey's Studentized Range (HSD) Test.

برخورد زمان گلدهی با شرایط دمایی گرم در کشت مستقیم سبب ایجاد تنش در گیاه و افزایش میزان پرولین شده است. همچنین با توجه به این که هرچه میزان محتوای نسبی آب برگ بیشتر باشد امکان تولید پرولین کاهش می‌یابد (Abbaszadeh et al., 2008)، احتمالاً کمتر بودن میزان محتوای نسبی آب برگ در روش کاشت مستقیم سبب افزایش میزان تولید پرولین در این تیمار گردیده است (جدول ۳). ارتباط منفی و معنی‌دار ($r = -0.92^{**}$) پرولین با محتوای رطوبت نسبی برگ نیز مؤید این امر می‌باشد (جدول ۴).

در سطوح مختلف تنش مقادیر پرولین در روش کاشت مستقیم بیشتر از نشائی بود با این وجود تنها در تیمار آبیاری به میزان ۶۰ درصد از هشت برگگی تا اواخر گلدهی بین دو روش کاشت اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۳). این امر نشان‌دهنده این است که تنها در شرایط اعمال کم‌آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از هشت برگگی تا اواخر گلدهی نشاءکاری توانسته است از کاهش میزان پرولین برگ در نتیجه برخورد با دماهای بالاجلوگیری نماید و همچنین سبب تخفیف اثر تنش ایجاد شده ناشی از کاهش حجم آبیاری شود. احتمالاً

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های مورد مطالعه
Table 4- Correlation coefficients between studied traits

ویژگی‌ها Triats	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoids	محتوای نسبی آب برگ Leaf relative water content	پرولین Proline	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد کاسبرگ Calyx yield	کارایی مصرف آب دانه WUE _{seed}	کارایی مصرف آب کاسبرگ WUE _{calyx}
کلروفیل a Chlorophyll a	1								
کلروفیل b Chlorophyll b	0.27*	1							
کاروتنوئید Carotenoids	0.55**	0.39**	1						
محتوای نسبی آب برگ Leaf relative water content	0.65**	0.68**	0.52**	1					
پرولین Proline	-0.43**	-0.66**	-0.60**	-0.92**	1				
عملکرد دانه Seed yield	0.39**	0.65**	0.52**	0.92**	-0.89**	1			
عملکرد کاسبرگ yield Calyx	0.42**	0.65**	0.57**	0.94**	-0.89**	0.98**	1		
کارایی مصرف آب دانه WUE _{seed}	0.58**	0.50**	0.49**	0.54**	-0.73**	0.62**	0.61**	1	
کارایی مصرف آب کاسبرگ WUE _{calyx}	0.59**	0.49**	0.51**	0.54**	-0.79**	0.61**	0.62**	0.99**	1

* و ** به ترتیب معنی‌داری سطوح احتمال پنج و یک درصد.

*** are significant at 5 and 1% probability levels.

آب برگ و پرولین آن نزدیک به تیمار آبیاری کامل قرار داشت (جدول ۳). تیمار آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی نیز کمترین عملکرد دانه (۳۹۵/۲۸ کیلوگرم در هکتار) را به خود اختصاص داد (شکل ۶). به‌طور کلی می‌توان گفت میزان تأثیر تنش خشکی بستگی به مرحله نمو دارد و بیشترین کاهش عملکرد زمانی است که تنش خشکی در فاصله گلدهی تا پر شدن دانه اتفاق می‌افتد (Skoric, 2009). سری‌والی و همکاران (Sreevalli et al., 2001) بیان داشتند کاهش عملکرد گیاه در شرایط خشکی می‌تواند به علت کاهش سطح فتوسنتزکننده، کاهش تولید کلروفیل، افزایش انرژی مصرفی گیاه جهت بالا بردن غلظت شیره سلولی و تغییر در مسیرهای تنفسی باشد. در این مطالعه نیز کاهش رنگدانه‌های

عملکرد دانه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، تنها اثر اصلی کم‌آبیاری بر عملکرد دانه چای ترش در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر کم‌آبیاری نشان داد که بیشترین عملکرد دانه (۶۶۷/۵۴ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری کامل به‌دست آمد که با تیمار آبیاری به میزان ۸۰ درصد نیاز آبی از هشت برگگی تا اواخر گلدهی اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۶). در تیمار آبیاری به میزان ۸۰ درصد نیاز آبی از هشت برگگی تا اواخر گلدهی به دلیل سازگار شدن گیاه به شرایط ایجاد شده، کم‌آبیاری نتوانست باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه گردد. چرا که رنگدانه‌های فتوسنتزی این تیمار در بالاترین سطح و محتوای نسبی

کاسبرگ (جدول ۴) روند تغییر کاهش عملکرد کاسبرگ با اعمال تنش خشکی مشابه روند تغییر عملکرد دانه به‌دست آمد به‌گونه‌ای که بیشترین عملکرد کاسبرگ (۳۹۲/۷۳ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری کامل حاصل شد که اختلاف معنی‌داری با تیمار آبیاری به میزان ۸۰ درصد نیاز آبی از هشت برگی تا اواخر گلدهی نداشت و کمترین میزان عملکرد کاسبرگ (۲۳۲/۹۳ کیلوگرم در هکتار) نیز در تیمار آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی حاصل شد (شکل ۷). هاشمی فدکی و همکاران (Hashemi Fadaki et al., 2018) نیز با بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد چای ترش به این نتیجه رسیدند که بیشترین و کمترین عملکرد کاسبرگ به‌ترتیب مربوط به تیمارهای تنش خشکی به میزان ۷۰ درصد رطوبت در دسترس و تنش خشکی به میزان ۳۰ درصد رطوبت در دسترس بود.

فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ، افزایش میزان پرولین و بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه اختلال در ساخت مواد فتوسنتزی به علت تنش خشکی سبب کاهش عملکرد گردیده است. همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد دانه با رنگدانه‌های فتوسنتزی ($r = 0.39^{**}$) برای کلروفیل a، $r = 0.65^{**}$ برای کلروفیل b و $r = 0.52^{**}$ برای کاروتنوئید و محتوای نسبی آب برگ ($r = 0.92^{**}$) و همبستگی منفی و معنی‌دار آن با میزان پرولین ($r = -0.89^{**}$) تأییدکننده این امر می‌باشد (جدول ۴).

عملکرد کاسبرگ

نتایج نشان داد که عملکرد کاسبرگ تنها تحت تأثیر کم‌آبیاری در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۵). با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار ($r = 0.98^{**}$) عملکرد دانه با عملکرد

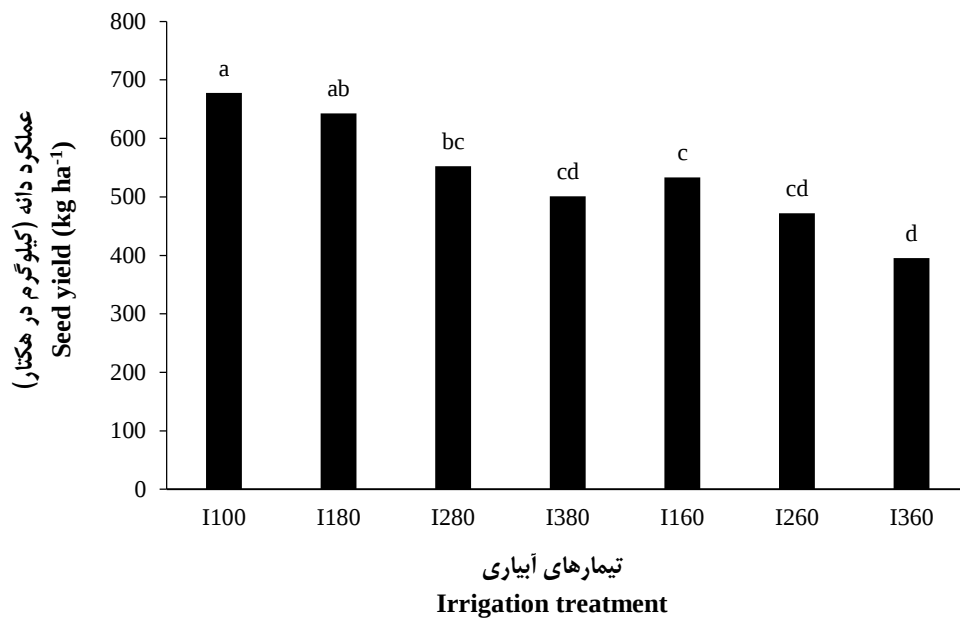
جدول ۵- تجزیه واریانس اثر آبیاری و روش کاشت بر عملکرد و کارایی مصرف آب چای ترش

Table 5- Analysis of variance for effects of irrigation and planting method on yield and water use efficiency of Roselle

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات (MS)			
		عملکرد دانه Seed yield	عملکرد کاسبرگ yield Calyx	کارایی مصرف آب دانه WUE _{seed}	کارایی مصرف آب کاسبرگ WUE _{calyx}
سال Year	1	112.68 ^{ns}	478.97 ^{ns}	0.000003 ^{ns}	0.000013 ^{ns}
سال × تکرار Year × Replication	4	11163.74	1000.53	0.000073	0.000024
آبیاری Irrigation	6	681161.82 ^{**}	37452.68 ^{**}	0.008914 ^{**}	0.00298 ^{**}
سال × آبیاری Year × Irrigation	6	6503.90	318.97	0.000021	0.000001
خطای a Error a	24	31503.77	359.75	0.000027	0.000001
روش کاشت Planting method	1	6444.36 ^{ns}	2982.86 ^{ns}	0.001633 ^{ns}	0.000585 ^{ns}
سال × روش کاشت Year × Planting method	1	1066.07	284.21	0.000020	0.000006
آبیاری × روش کاشت Irrigation × Planting method	6	6826.19 ^{ns}	372.68 ^{ns}	0.000352 ^{**}	0.000107 ^{**}
سال × آبیاری × روش کاشت Year × Irrigation × Planting method	6	6641.07	327.25	0.000020	0.000005
خطای b Error b	28	1876.72	412.16	0.000037	0.000008
ضریب تغییرات (%) C.V	-	8.0	6.5	6.7	5.6

* و ** به‌ترتیب معنی‌داری سطوح احتمال پنج و یک درصد، ns غیر معنی‌دار

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



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر اصلی آبیاری بر عملکرد دانه چای ترش

Figure 6- Mean comparison for effect of irrigation on seed yield of Roselle

I100: آبیاری به میزان ۱۰۰٪ نیاز آبی، I₁80: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، I₂80: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا ابتدای گلدهی، I₃80: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، I₁60: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، I₂60: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، I₃60: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی.

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

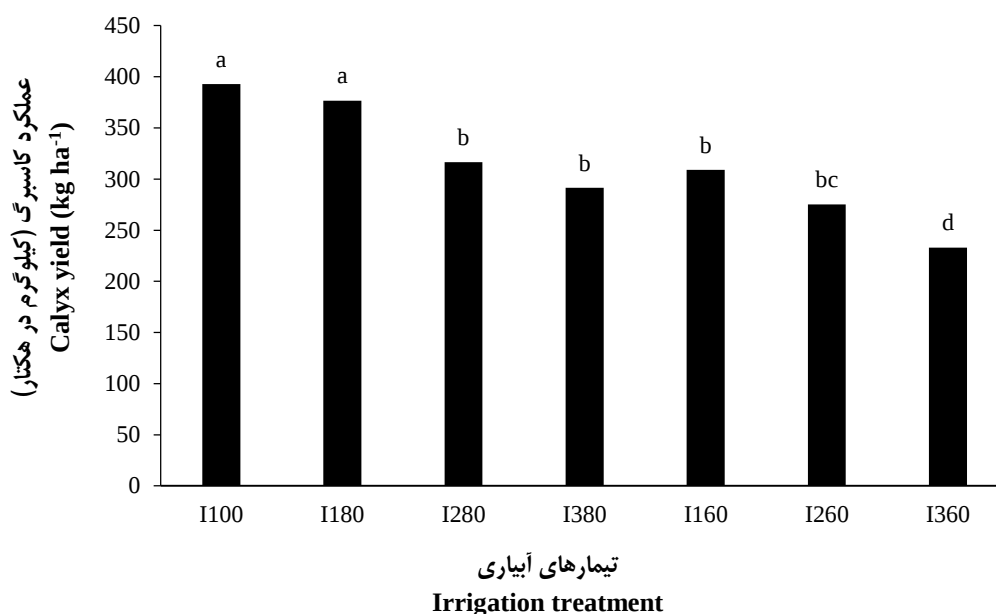
I100: 100% crop water requirement (CWR), I₁80: 80% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₂80: 80% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I₃80: 80% CWR from beginning to end of flowering, I₁60: 60% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₂60: 60% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I₃60: 60% CWR from beginning to end of flowering.

Means followed by similar letter(S) are not significantly different at 5% probability level using Tukey's Studentized Range (HSD) Test.

با این حال روش کاشت نشانی تنها توانست در سطح آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از مرحله هشت برگ تا انتهای گلدهی سبب افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب دانه و کاسبرگ و در سطح آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از هشت برگ تا ابتدای گلدهی سبب افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب کاسبرگ گردد (شکل ۸). این امر می‌تواند به علت عملکرد بالاتر در روش کاشت نشانی نسبت به روش کاشت مستقیم، علی‌رغم معنی‌دار نبودن اثر روش کاشت بر عملکرد دانه و کاسبرگ، باشد. چرا که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین کارایی مصرف آب دانه و کاسبرگ به‌ترتیب با عملکرد دانه ($r = 0.62^{**}$) و کاسبرگ ($r = 0.62^{**}$) حاصل شد (جدول ۴). فلاحی و همکاران (Fallahi et al., 2017) نیز بیان داشتند که روش کاشت نشانی چای ترش سبب بهبود کارایی مصرف آب این گیاه می‌گردد.

کارایی مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کم‌آبیاری و اثر متقابل کم‌آبیاری و روش کاشت بر کارایی مصرف آب دانه و کاسبرگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و روش کاشت نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب دانه (۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و کاسبرگ (۰/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمار آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی از مرحله هشت برگ تا اواخر گلدهی و روش کاشت نشانی حاصل شد (شکل ۸). تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی و روش کاشت مستقیم نیز کمترین میزان کارایی مصرف آب دانه (۰/۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب) و کاسبرگ (۰/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب) را به خود اختصاص داد (شکل ۸). در تمام سطوح آبیاری روش کاشت غیرمستقیم کارایی مصرف آب بالاتری نسبت به روش مستقیم داشت.



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر اصلی آبیاری بر عملکرد کاسبرگ چای ترش

Figure 7- Mean comparison for effect of irrigation on calyx yield of Roselle

I100: آبیاری به میزان ۱۰۰٪ نیاز آبی، I₁₈₀: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، I₂₈₀: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا ابتدای گلدهی، I₃₈₀: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، I₁₆₀: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، I₂₆₀: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، I₃₆₀: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی.

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

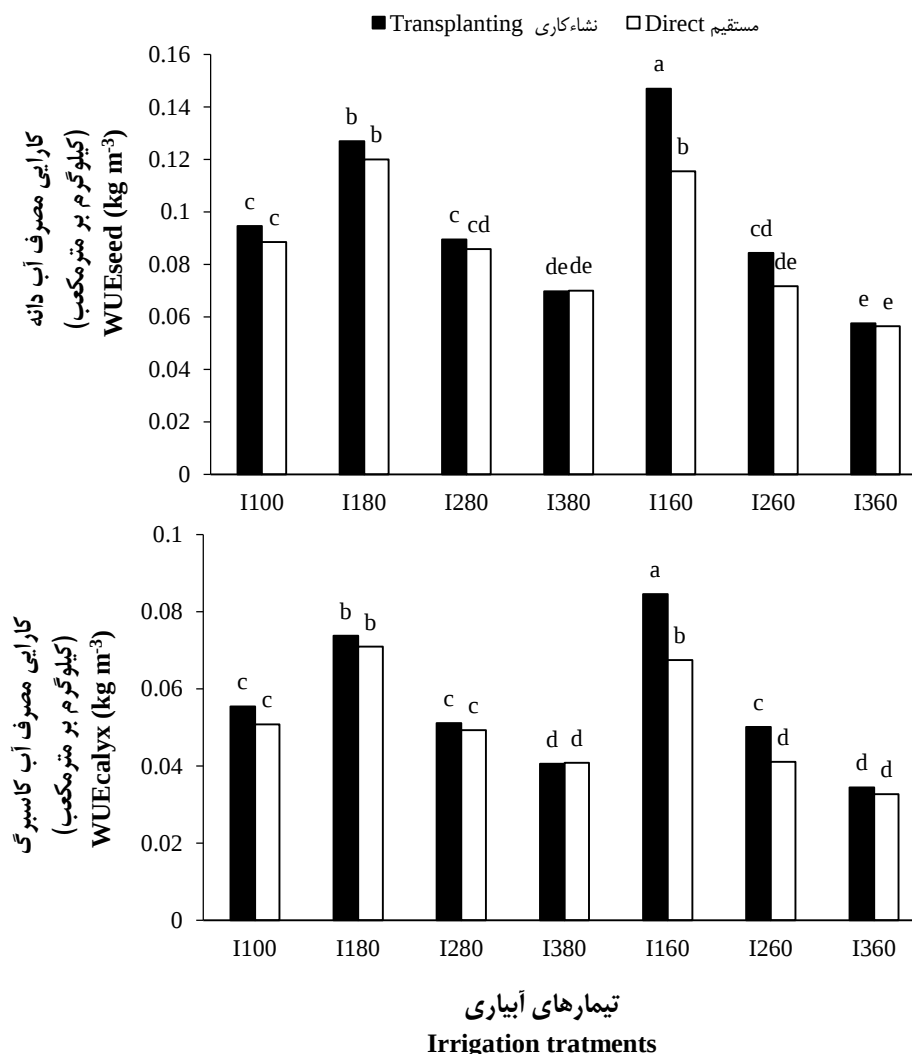
I100: 100% crop water requirement (CWR), I₁₈₀: 80% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₂₈₀: 80% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I₃₈₀: 80% CWR from beginning to end of flowering, I₁₆₀: 60% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I₂₆₀: 60% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I₃₆₀: 60% CWR from beginning to end of flowering.

Means followed by similar letter(S) are not significantly different at 5% probability level using Tukey's Studentized Range (HSD) Test.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این آزمایش نشان داد که علی‌رغم مقاوم بودن چای ترش به تنش خشکی، آبیاری کمتر از نیاز آبی این گیاه سبب تأثیر منفی بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب برگ، پرولین برگ، عملکرد دانه و کاسبرگ این گیاه گردید. میزان این تأثیر بسته به مرحله رشدی گیاه متفاوت بود و بیشترین تأثیر منفی در زمان اعمال کم‌آبیاری در مرحله حساس رشدی گیاه یعنی اوایل تا اواخر گلدهی حاصل شد. با این وجود کم‌آبیاری در طول دوره رشد یعنی از مرحله هشت برگ تا اواخر گلدهی، به دلیل سازگار شدن گیاه به شرایط ایجاد شده، نتوانست تأثیر معنی‌داری بر اکثر ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکرد دانه و کاسبرگ گیاه داشته باشد. نشاءکاری نسبت به کشت مستقیم

توانست سبب بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک در زمان اعمال کم‌آبیاری گردد اما بین این دو روش کاشت، تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد دانه و کاسبرگ در سطوح مختلف تنش ایجاد نشد. با این وجود با توجه به آب مصرفی کمتر در روش کشت نشائی، این روش کاشت توانست سبب بهبود کارایی مصرف آب دانه و کاسبرگ گردد. لذا به نظر می‌رسد که کاشت نشائی یک استراتژی مناسب برای تولید چای ترش در مناطقی است که با ریسک خشکی همراه هستند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، آبیاری به میزان ۸۰ درصد نیاز آبی از مرحله هشت برگ تا اواخر گلدهی همراه با روش کشت نشائی به‌عنوان شیوه مدیریت مناسب جهت دستیابی به عملکرد مطلوب و افزایش کارایی مصرف آب و در نتیجه حفظ منابع آب در منطقه مورد مطالعه مناسب به نظر می‌رسد.



شکل ۸- اثر متقابل آبیاری و روش کاشت بر کارایی مصرف آب دانه و کاسبرگ چای ترش

Figure 8- Interaction effect between irrigation and planting method on seed and calyx water use efficiency of Roselle

I100: آبیاری به میزان ۱۰۰٪ نیاز آبی، I180: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، I280: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا ابتدای گلدهی، I380: آبیاری به میزان ۸۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، I160: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از هشت برگ تا اواخر گلدهی، I260: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی، I360: آبیاری به میزان ۶۰٪ نیاز آبی از اوایل تا اواخر گلدهی.

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

I100: 100% crop water requirement (CWR), I180: 80% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I280: 80% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I380: 80% CWR from beginning to end of flowering, I160: 60% CWR from 8-leaf stage to end of flowering, I260: 60% CWR from 8-leaf stage to beginning of flowering, I360: 60% CWR from beginning to end of flowering.

Means followed by similar letter(S) are not significantly different at 5% probability level using Tukey's Studentized Range (HSD) Test.

References

1. Abbaszadeh, B., Sharifi, A. E., Lebaschi, M. H., Naderi, H. B. M., & Moghadami, F. (2008). The effect of drought stress on proline contents, soluble sugars, chlorophyll and relative water contents of balm (*Melissa officinalis* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 23(4), 504-513. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ij.mapr.2008.10090>
2. Abdul Jaleel, C., Manirannan, P., Sankar, B., Kishorekumar, A., & Gopi, R. (2007). Water deficit stress mitigation by calcium chloride in catharanthus rose us: Effects on oxidative stress, proline metabolism and indole alkaloid accumulation. *Colloids and Surface B: Biointerfaces*, 60(1), 110-116.

- <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.06.006>
3. Aghaee Okhchlar, R., Amirnia, R., Tajbakhsh, M., Ghiyasi, M., & Alizadeh, M. B. 2012. The effect of sowing date and sowing method on quantity characteristics and essential oil content on moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.). *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(2), 353-61.
4. Ahmadian, A., Ghanbari, A., Siahshar, B., Heidari, M., Ramroodi, M., & Moosavi-Nik, S. (2011). Residual effect of chemical and animal fertilizers and compost on yield, yield components, physiological characteristics and essential oil content of *Matricaria chamomilla* L. under drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8(4), 668-676. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22124/jms.2018.2941>
5. Ahmadpoor Dehkordi, E., Danesh Shahraki, A., & Khosravi, P. (2019). Effect of seed priming with salicylic acid on germination indices and seedling growth of sistian's native roselle (*Hibiscus sabdariffa*) under drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 5(4), 1-11. (in Persian with English abstract).
6. Akbarinia, A., Ghalavand, A., Sefidcon, F., Rezaee, M. B., & Sharifi, A. (2004). Study on the effect of different rates of chemical fertilizer, manure and mixture of them on seed yield and main, compositions of essential oil of ajowan (*Trachyspermum copticum*). *Agronomy and Horticulture*, 61, 32-41. (in Persian with English abstract).
7. Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *American Society of Plant Physiologists*, 24, 1-10. <https://doi.org/10.1104%2Fpp.24.1.1>
8. Babaee, K., Dehaghi, M. A., Sanavi, S. M., & Jabbari, R. (2010). Water deficit effect on morphology, proline content and thymol percentage of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 26(2), 239-251. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2010.6939>
9. Babatunde, F. E., & Mofoke, A. L. E. (2006). Performance of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) as influenced by irrigation schedules. *Pakistan Journal of Nutrition*, 5(4), 363-367. <https://doi.org/10.3923/pjn.2006.363.367>
10. Bates, I. S., Waldern, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
11. Burce, J. A. (1991). Comparative response of leaf conductance to humidity in single attached leaves. *Experimental Botany*, 32, 629-634. <https://doi.org/10.22059/jci.2015.55189>
12. Fallahi, H. R., Ghorbany, M., Aghhavan-Shajari, M., Samadzadeh, A., & Asadian, A. H. (2017). Qualitative response of roselle to planting methods, humic acid application, mycorrhizal inoculation and irrigation management. *Journal of Crop Improvement*, 31(2), 192-208. <https://doi.org/10.1080/15427528.2016.1269378>
13. Good, A. G., & Zaplachinski, S. T. (1994). The effects of drought on free amino acid accumulation and protein synthesis in *Brassica napus*. *Physiologia Plantarum*, 90(1), 9-14. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb02185.x>
14. Griffith, D. R., Parsons, S. D., & Mannering, J. V. (1990). Mechanics and adaptability of ridge planting for corn and soybean. *Soil Tillage Research*, 18, 113-126.
15. Hashemi Fadaki, S., Fakheri, B., Mehdi Nezhad, N., & Mohammad Pour, R. (2018). Effects of nano and nano bio-fertilizer on physiological, biochemical characteristics and yield of roselle under drought stress. *Journal of Crops Improvement*, 20(1), 45-66. <https://doi.org/10.22059/jci.2018.219078.1568>
16. Heidari, M., Bakhshandeh, A. M., Nadeyan, H., Fathi, G., & Alami, S. (2006). The effect of different levels salinity and nitrogen on seed yield, uptake and osmotic regulation of Na and K wheat (*Triticum aestivum*) c.v. Chamran. *Journal of Horticultural Science*, 37(3), 501-510. (in Persian with English abstract).
17. Kafi, M., & Damghani, A. (2000). *Mechanisms of Plants Resistance to Stress*. Ferdowsi university of Mashhad Press, Mashhad, Iran. (in Persian).
18. Kuznetsov, V. I., & Shevykova, N. I. (1999). Proline under stress: Biological role, metabolism, and regulation. *American Society of Plant Physiologists*, 46, 274-287.
19. Lashkari, F. (2013). The effect of superabsorbent polymer, animal manure and potassium on the quantitative and qualitative characteristics of the medicinal plant Karla (*Momordica charantia*) in different rounds of irrigation. MSc Thesis. Zabol University, Zabol, Iran. (in Persian with English abstract).
20. Metzger, M. J., Bunce, R. G., Jongman, R. H., Sayre, R., Trabucco, A., & Zomer, R. (2012). A high-resolution bioclimate map of the world: a unifying framework for global biodiversity research and monitoring. *Global Ecology and Biogeography*, 22(5), 630-638. <https://doi.org/10.1111/geb.12022>.
21. Mirshekari, M., Einali, A., & Valizadeh, J. (2017). Physiological and biochemical responses of *Hibiscus sabdariffa* to drought stress in the presence of salicylic acid. *Iranian Journal of Plant Biology*, 32, 21-38. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22108/ijpb.2017.100883.1002>
22. Mohamad Zadeh, H., Asghary, J., Farajee, H., Moradi, A., & Majidian, M. (2018). Effect of planting date and method on ear yield, water use efficiency and some phenological characteristics of sweet corn in Yasouj. *Cereal Research*, 8(3), 371-385. (in Persian with English abstract).
23. Mohammad Zadeh, M. (2015). *Effect of wind stress on morphological and biochemical properties of Roselle (Hibiscus sabdariffa) under chemical and biofertilizer treatments*. MSc. Thesis, Faculty of Agriculture, Zabol University. (in Persian with English abstract).

24. Monks, D. W., & Scholtheis, J. R. (1998). Critical weed free period for large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*) in transplanted watermelon. *Weed Science*, 46, 530-532. <https://doi.org/10.1017/S0043174500091049>
25. Munne, S., Schwarz, K., Alegre, L., Horvath, G., & Szigeti, Z. (1999). Aloha-tocopherol protection against drought, induced damage in *Rosmarinus officinalis* L. and *Milissa officinalis* L. Proceedings of an International Workshaop at Tata, Hungary.
26. Parsa Motlagh, B. P., Moghaddam, P. R., Ghorbani, R., & Sardooei, Z. A. (2018). Phytochemical characteristics of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) under different fertilizer systems and irrigation water. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 33(6), 928-939. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2018.108446.1896>.
27. Perry, L. M. (1980). *Medicinal plants of east and Southeast Asia: Attributed Properties and Uses*. MIT Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.02.036>.
28. Prasongwatana, V., Woottisin, S., Sriboonlue, P., & Kukongviriyapan, V. (2008). Uricosuric effect of roselle (*Hibiscus sabdariffa*) in normal and renal-stone former subject. *Journal of Ethnopharmacology*, 117, 491-495. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.02.036>.
29. Rahbarian, P., Afsharmanseh, G., & Modafea Behzadi, N. (2011). Effect of drought stress as water deficit and planting density on yield of roselle (*Hibiscus sabdariffa*) in Jiroft region. *New Finds in Agriculture*, 5(3), 249-257. (in Persian with English abstract).
30. Rajinder, S. D. (1987). Glutathione statues and protein synthesis during drought and subsequent dehydration in *Torula rulis*. *American Society of Plant Physiologists*, 83, 816-819. <https://doi.org/10.1104/pp.83.4.816>
31. Sabzevari, S., Khazaie, H. R., Ghaemi, A., Naderi, A., & Ahmadi, M. (2010). Effect of cultivar and harvest date on quantitative and qualitative characteristics of autumn sown sugar beet in Kashmar region. *Journal of Research in Crop Sciences*, 9(3), 67-78. (in Persian with English abstract).
32. Sanjari Mijani, M., Sirousmehr, A. R., & Fakheri, B. (2015). The effects of drought stress and humic acid on some physiological characteristics of roselle. *Journal of Crop Improvement*, 17(2), 403-414. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2015.55189>
33. Sanjari Mijani, M., Sirousmehr, A. R., & Fakheri, B. (2018). The effects of drought stress and humic acid on morphological traits, yield and anthocyanin of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Agroecology*, 8(3), 346-358. (in Persian with English abstract).
34. Schutz, M., & Fangmeir, E. (2001). Growth and yield responses of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Minaret) to elevated CO₂ and water limitation. *Environmental Pollution*, 114(2), 187-194. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(00\)00215-3](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00215-3)
35. Seghatoleslami, M. J., Mosavi, S. G., & Barzegaran, T. (2013). Effect of irrigation levels and planting date on yield and water use efficiency of *Hibiscus sabdariffa* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 29, 144-156. (in Persian with English abstract).
36. Sepahrom, A., & Moosavi, S. G. (2016). The effect of irrigation and nitrogen levels on morphological traits, yield and yield components of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 32(3), 436-449. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.106826>
37. Skoric, D. (2009). Sunflower breeding for resistance to abiotic stresses. *Helia*, 32, 1-15. <https://doi.org/10.2298/HEL0950001S>
38. Sreevalli, Y., Baskaran, K., chandra shekara, R., Kuikkarni, R., Sushil, H, Samresh, D., Kukre, J., Ashok, A., Sharmr Singh, K., Srikant, S., & Rakesh, T. (2001). Preliminary observation on the effect of irrigation frequency and genotypes on yield and alkaloid concentration in Petriwinkle. *Journal of Medicinal and Aromatic Plant Science*, 22, 356-358.
39. Torabi, A. (2004). *Study of planting date and row spacing on yield of Hibiscus sabdariffa*. MSc Thesis. Jiroft branch, Islamic Azad University, Jiroft, Iran. (in Persian with English abstract).
40. Levitt, J. (1980). *Response of Plants to Environmental Stresses*. Vol. 2. *Water, Radiation, Salt and Other Stresses*. Academic press. New York. p. 650.
41. Wise, R. R., & Naylor, A. W. (1987). Chilling enhanced photo-oxidation, the peoxidative destruction of lipids during chilling injury to photosynthesis and ultrastructure. *Plant Physiology*, 83, 272-2872. <https://doi.org/10.1104/pp.83.2.272>



Investigation of Physiological and Yield Characteristics of Quinoa as Affected by Different Levels of Irrigation and Plant Density

M. Mostafaei¹, M. Jami Al-Ahmadi^{2,3*}, M. Salehi⁴, A. Shahidi⁵

Received: 25-12-2021
Revised: 07-06-2022
Accepted: 20-06-2022

How to cite this article:

Mostafaei, M., Jami Al-Ahmadi, M., Salehi, M., & Shahidi, A. (2023). Investigation of Physiological and Yield Characteristics of Quinoa as Affected by Different Levels of Irrigation and Plant Density. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 29-46. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.74044.1126>

Introduction

Quinoa is a dicotyledonous plant from the Amaranthaceae family, with favorable nutritional value and a high potential for growth and production in adverse environmental conditions. Despite being three carbon, it has high water consumption efficiency and as a new crop, due to its wide adaptation to different environment conditions such as salinity and drought, as well as being premature, it is suitable for planting in arid and desert areas and has many factors. Genetic and environmental factors such as genotype, density, arrangement and planting date, soil salinity, and drought stress affect yield. Among these, drought is one of the most important non-living stresses that cause great damage to crops and horticulture in the world every year. And especially Iran, which is considered an arid and semi-arid country. The effect of moisture stress on plants varies depending on which stage of plant growth occurs and plants can work through various mechanisms such as reducing growth parameters, closing pores, reducing photosynthesis, changing regulatory mechanisms of ion transport, and increasing activity. Antioxidant enzymes cope with drought stress to some extent, although such mechanisms are energy-intensive and cause a decline in performance.

Materials and Methods

In order to investigate the optimal density of quinoa at different levels of irrigation, a factorial experiment was conducted based on completely randomized design with three replications at the research farm of the Faculty of Agriculture, Birjand University. The first factor was irrigation levels (based on 50, 75, and 100% water requirement) and the second factor was plant density at 5 levels (40, 60, 80, 100, and 120 plants m⁻²). Measurement traits included relative leaf water content, stomatal conductance, electrolyte leakage, number of branches, number of grains per branch, branch weight, 1000-grain weight, grain yield, water use efficiency, and grain protein.

Results and Discussion

The results showed that the yield components in response to low irrigation conditions were significantly

1- PhD Student in Plant Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Plant and Environmental Stresses Research Group, University of Birjand, Birjand, Iran

4- Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

5- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

(*- Corresponding Autor Email: mjamialahmadi@birjand.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.74044.1126>

reduced, so that the highest 1000-seed weight, number of branches, number of seeds per branch, branch weight and yield at the level of 100% water requirement were, respectively, 0.1 (g), 1368.4 (branching per square meter), 132.64 (grains per branching), 2377.8 (grams per square meter) and 3265.25 (kg ha^{-1}) have been obtained. The maximum orifice conductivity measured at 35.66 (mol CO_2 per square meter) was obtained at the beginning of flowering at 100% water requirement. Also, with decreasing irrigation level, physiological traits including relative leaf water content decreased significantly and traits such as electrolyte leakage and grain protein increased. The optimal density at the irrigation level of 100, 75, and 50% of water requirement were 113, 105, and 80 plants per square meter, respectively. The interaction of irrigation levels and density also showed that the highest yield was 100% of water requirement and density of 100 plants with 4226.52 kg ha^{-1} . The results showed that at the irrigation levels of 100 and 75% of the water requirement, the highest yield was obtained at a density of 100 plants and with a decrease in density at these levels by 61.2 and 73.2%, respectively, was associated with a decrease in yield, but at the level of 50%. The highest yield was obtained at a density of 80 plants, which was accompanied by a decrease in yield to 40 plants with a yield of 73.5%. The results also show an increase in optimal density with increasing irrigation level, so that the most optimal density at the irrigation level of 100% of the water requirement is 113 plants per square meter and with increasing the stress to 75 and 50% of the water requirement, respectively, density Optimal yields of 105 and 80 plants per square meter have been achieved.

Conclusion

In general, the results show that lack of moisture has an adverse effect on quinoa yield such as 1000-seed weight, branch weight, number of seeds per branch, and number of branches in the main inflorescence and reduces the optimal plant density.

Keywords: Drought stress, Optimal density, Seed protein, Stomatal conductance, Water use efficiency

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص ۴۶-۲۹

بررسی خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکردی گیاه کینوا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته

مسلم مصطفائی^۱، مجید جامی الاحمدی^{۲، ۳*}، معصومه صالحی^۴، علی شهیدی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰

چکیده

کینوا به عنوان یک گیاه زراعی جدید، به دلیل سازگاری وسیع به شرایط مختلف اقلیمی از جمله خشکی و نیز زودرس بودن، گیاهی مناسب برای کاشت در مناطق خشک است. با هدف بررسی تراکم بهینه کینوا در سطوح مختلف آبیاری، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام گرفت. فاکتور اول سطوح آبیاری (برمبنای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) و فاکتور دوم تراکم بوته در ۵ سطح (۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ بوته در متر مربع) بود. صفات اندازه‌گیری شامل محتوای نسبی آب برگ، هدایت روزنه‌ای، نشت الکتروولت، تعداد انشعاب، تعداد دانه در انشعاب، وزن انشعاب، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، کارایی مصرف آب و پروتئین دانه بود. نتایج نشان داد که اجزای عملکرد در مواجهه با شرایط کم آبیاری، به طور معنی‌داری کاهش یافت، نتایج سطوح آبیاری و تراکم نشان داد که بالاترین عملکرد در ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تراکم ۱۰۰ بوته به میزان ۴۲۶۸/۵۲ کیلوگرم در هکتار حاصل شد و همچنین نشان داد که در سطوح آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی نیز بالاترین عملکرد در تراکم ۱۰۰ بوته حاصل شد و با کاهش تراکم به میزان ۷۳/۲ درصد با کاهش عملکرد همراه بود ولی در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی بالاترین عملکرد در تراکم ۸۰ بوته حاصل شد که با کاهش تراکم به ۴۰ بوته عملکرد به میزان ۷۳/۵ درصد با کاهش همراه بود. بهینه‌ترین تراکم در سطح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی، به ترتیب ۱۱۳، ۱۰۵ و ۸۰ بوته در متر مربع بود. در این تحقیق برای تعیین بهترین تراکم در سطوح مختلف آبیاری این آزمایش طراحی شد که با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت که بهینه‌ترین تراکم در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی به میزان ۱۱۳ بوته در مترمربع حاصل شده و با افزایش میزان تنش به ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی به ترتیب تراکم بهینه به میزان ۱۰۵ و ۸۰ بوته در متر مربع حاصل شده است.

واژه‌های کلیدی: پروتئین دانه، تراکم بهینه، تنش خشکی، کارایی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای

مقدمه

کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa* Willd گیاهی دولپه از خانواده تاج خروسیان می‌باشد. کینوا از نظر ژنتیکی گیاهی

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

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

۳- گروه پژوهشی گیاه و تنش‌های محیطی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۴- استادیار مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

۵- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: mjamialahmadi@birjand.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.74044.1126>

آلوتراپلوئیدی ($2n=4x=36$) است که در بیشتر صفات کیفی، از خود رفتار دیپلوئیدی نشان می‌دهد و از گروه گیاهان مسیر فتوسنتز ۳ کرنه می‌باشد (Wilson & Heiser, 1979). در سال ۲۰۲۰ میزان سطح زیر کشت کینوا ۱۸۸۸۷۸ هکتار و حجم تولید این محصول، ۱۷۵۱۸۸ تن در جهان بوده است (Fao stat, 2020). ارزش غذایی بسیار بالای دانه کینوا موجب مقایسه آن توسط سازمان خواروبار جهانی با شیر خشک گردیده است. دانه‌های کینوا محصول اصلی این گیاه است. بذور کینوا به طور متوسط دارای ۱۶ درصد پروتئین هستند که بالاتر از مقدار پروتئین در بذر سایر غلات است. از سوی دیگر، پروتئین کینوا دارای کیفیت بالایی است که این گیاه را به معیارها و استانداردهای فائو به منظور تغذیه انسان‌ها، نزدیک تر کرده است.

خود را بسته که خود موجب حفظ پتانسیل برگ و سرعت فتوسنتز در طول خشک شدن خاک می‌گردد. از طرفی در طول خشک شدن خاک ریشه آب‌سزیک اسید تولید کرده که باعث تنظیم فعالیت روزه‌ها از طریق کاهش آماس سلول‌های نگهبان روزه و کاهش هدایت روزه‌ای می‌شود (Jacobsen et al., 2009).

تراکم بوته می‌تواند بر عملکرد و بسیاری دیگر از صفات گیاهان موثر باشد. تراکم بوته از طریق تاثیر بر عملکرد دانه تک بوته، بر عملکرد دانه در واحد سطح تاثیر می‌گذارد. چنانچه عملکرد دانه در اثر رقابت پایین باشد وجود تعداد زیادی بوته در تراکم بالا می‌تواند کمبود عملکرد بوته و متعاقباً عملکرد دانه در واحد سطح را جبران کند (Koutroubas et al., 2000)، گرچه تشدید رقابت درون‌گونه‌ای در تراکم‌های بسیار بالا نیز می‌تواند سبب افت عملکرد شود. بنابراین تعیین تراکم بهینه گیاهان نیز به نوبه خود نقش به‌سزایی در استفاده از منابع تولید در اکوسیستم‌های زراعی دارد (Kafi et al., 2010). تراکم مطلوب بوته در واحد سطح تراکمی است که در نتیجه آن کلیه عوامل محیطی به‌طور کامل مورد استفاده گیاه قرار گرفته و در عین حال رقابت‌های درون‌بوته‌ای و برون‌بوته‌ای حداقل باشد. به این ترتیب، حداکثر عملکرد ممکن با کیفیت مطلوب به‌دست می‌آید (Khajepour, 2000).

تراکم مناسب کشت نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی هر رقم دارد و می‌تواند بسته به نوع گیاه، رقم، حاصلخیزی خاک و شرایط اقلیمی هر منطقه متفاوت باشد. در پژوهشی در برزیل با افزایش تراکم کاشت کینوا از ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ بوته در هکتار، ارتفاع بوته و تعداد روز تا رسیدن کاهش نشان داده است اما صفات عملکرد دانه، بیوماس کل و شاخص برداشت تحت تاثیر تراکم کشت قرار نگرفتند، که این عدم تاثیرپذیری ناشی از ظرفیت بالای کینوا در تولید شاخه‌های فرعی و جبران تراکم کم بیان شده است (Spehar & Rocha, 2009).

در آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی کلزا (*Brassica napus*)، بیشترین عملکرد دانه کلزا در تراکم ۸۰ بوته در متر مربع به‌دست آمد و افزایش تراکم موجب کاهش معنی‌دار آن شد (Matinfar, 2012). تراکم بوته از طریق تاثیر بر عملکرد دانه تک بوته، بر عملکرد دانه در واحد سطح تاثیر می‌گذارد. همان‌طور که در گیاهی همچون گندم (Eyvazi et al., 2005) دیده شده است میزان پروتئین دانه از جمله صفات کیفی است که عموماً تحت شرایط تنش خشکی افزایش می‌یابد.

از آن‌جایی که کینوا گیاهی جدید بوده و برخی از جنبه‌های به‌زراعی و پژوهشی آن در مورد تراکم بهینه و سطوح مختلف آبیاری انجام نشده و با توجه به کاهش روزافزون منابع آب و ضرورت استفاده بهینه آب در جهت تولید و عملکرد بالا لذا این پژوهش با هدف تعیین بهترین مقدار آبیاری و تراکم بهینه گیاه کینوا صورت پذیرفته است.

اسید آمینه‌های لیزین، متیونین و سیستئین در پروتئین کینوا بالا است، به نحوی که این گیاه را نسبت به غلات (لیزین) و حبوبات (متیونین و سیستئین) برتری داده است (Abugoch et al., 2009).

عوامل متعدد ژنتیکی و محیطی نظیر ژنوتیپ، تراکم، آرایش و تاریخ کاشت، سوری خاک و تنش خشکی عملکرد را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Hashemi Dezfouli et al., 1995). در این بین، خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زنده است که هر ساله خسارت فراوانی به محصولات زراعی و باغی در جهان و به‌ویژه ایران که به‌عنوان کشوری خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود، وارد می‌کند (Kafi et al., 2007). اثر تنش رطوبت بر گیاهان بسته به این‌که در کدام مرحله رشد گیاه رخ دهد متفاوت بوده و گیاهان قادرند با مکانیسم‌های متعددی همچون کاهش پارامترهای رشد، بسته نمودن روزه‌ها، کاهش فتوسنتز، تغییر در سازوکارهای تنظیمی انتقال یون‌ها و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تا حدی با تنش خشکی مقابله کنند (Hassanpour & Niknam, 2014)، هرچند چنین مکانیسم‌هایی انرژی‌خواه بوده و سبب افت عملکرد می‌شوند.

پژوهش‌ها نشان داده است که تنش خشکی باعث کاهش رشد و عملکرد کینوا می‌شود (Fuentes & Bhargava, 2011)؛ زیرا در این تنش علاوه بر افت کارایی فتوسنتز به دلیل کمبود آب در سلول‌های برگ (کاهش RWC) و کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی، باعث افزایش میزان اکسیژن‌های فعال در کینوا می‌شود (Aziz et al., 2018). در پژوهشی دیگر علی و همکاران گزارش دادند که کاهش میزان آب آبیاری منجر به کاهش طول ریشه، ارتفاع، وزن تر اندام هوایی و ریشه و عملکرد دانه گیاه کینوا در شرایط آب و هوایی عربستان سعودی در سطح احتمال ۵ درصد شد (Aly et al., 2018). همچنین، در پژوهشی دیگر که به‌منظور بررسی اثر کم‌آبیاری بر روی گیاه کینوا در کشور برزیل اجرا شد، نتایج نشان داد که کم‌آبیاری به میزان ۵۰ درصد منجر به کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک ساقه و برگ و سنبله و وزن دانه شد (Jayme-Oliveira et al., 2017). جمالی و همکاران (Jamali et al., 2018) در مقایسه تنش دوره‌ای آب آبیاری بر گیاه کینوا رقم NSRCQ نیز دریافتند که تنش رطوبتی موجب کاهش تعداد برگ و تعداد شاخه جانبی و تعداد سنبله و به تبع آن وزن و عملکرد دانه می‌شود.

جمالی و همکاران (Jamali et al., 2018) در تحقیقی بر روی گیاه کینوا رقم Titicaca نشان دادند که کم‌آبیاری منجر به کاهش وزن هزار دانه، ارتفاعات بوته، وزن خشک اندام هوایی و ریشه و عملکرد دانه در بوته شد. ایشان اظهار کردند که با توجه به شرایط محدودیت آب در منطقه و با توجه به این‌که بین تیمارهای ۱۰۰ درصد و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در صفت عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. جاکوبسن و همکاران نشان دادند که گیاه کینوا جهت مقابله با خشکی و افزایش راندمان آب روزه‌های برگ

مواد و روش‌ها

این آزمایش به منظور بررسی اثر تنش خشکی و تراکم بوته بر صفات رشدی گیاه کینوا در طی سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند به مرحله اجرا درآمد. به منظور اطلاع از شرایط جوی محل اجرای آزمایش، میانگین بارندگی، رطوبت نسبی و درجه حرارت ۲۰ ساله اخیر بیرجند به استناد پایگاه اطلاع‌رسانی هواشناسی کل کشور در شکل ۱ نشان داده شده است.

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول آزمایش سطوح مختلف آبیاری در سه سطح (آبیاری بر اساس ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) و فاکتور دوم آزمایش تراکم بوته در پنج سطح (۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ بوته در متر مربع) بود.

بذر کینوا مورد نیاز از رقم تیتیکاکا، لاین NSRCQ1 بود که از مرکز تحقیقات ملی شوری یزد تهیه شد. کشت در اول مرداد ماه سال ۱۳۹۶ انجام شد. بذور به صورت دستی و در عمق یک سانتی‌متری خاک، بر روی شش خط به فاصله ۳۰ سانتی‌متر در کرت‌هایی (در ابعاد ۵ در ۲/۱ متر) به مساحت ۱۰/۵ متر مربع کشت شدند. تعداد بوته در روی هر خط کشت در تراکم ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ بوته به ترتیب ۷۰، ۱۰۵، ۱۴۰، ۱۷۵ و ۲۱۰ بوته بود. جهت یکنواختی در سبز شدن بلافاصله پس از کاشت اولین آبیاری انجام شد و هر سه روز یک بار تا سبز شدن کامل آبیاری تکرار شد. برای دستیابی به تراکم‌های مورد نظر در مرحله ۴ تا ۵ برگگی تنک و اعمال تیمارهای آبیاری از مرحله ۶ تا ۸ برگگی شروع شد. نیاز آبی گیاه با استفاده از نرم‌افزار Cropwat version 8i محاسبه گردید و اعمال سطوح

آبیاری از مرحله چهار تا پنج برگگی (بعد از اطمینان از استقرار گیاهچه) شروع شده و تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه ادامه یافت. به منظور دستیابی به مقادیر مورد نظر آب برای هر نوبت آبیاری از کنتور استفاده شد. زمان آبیاری با توجه به میزان تبخیر از تشتک تبخیر که در مجاورت مزرعه نصب شده بود، تعیین شد.

برآورد نیاز آبی گیاه

روش بلانی - کریدل:

$$ET_o = C[P(0.46T + 8.13)] \quad (1)$$

ETo: تبخیر و تعرق گیاه مرجع

C: ضریب تصحیح یا ضریب اقلیمی که شامل سه پارامتر: رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد می‌باشد.

T: میانگین درجه حرارت ماهانه

P: متوسط درصد ساعات روشنایی روزانه به کل ساعات روشنایی در ماه‌های مختلف.

رقم P توسط فائو برای مناطق مختلف محاسبه شده است.

برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر، از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (2)$$

CWR: نیاز آبی محصول

$$CWR = ET_o \times K_c \times A \quad (3)$$

ETo: داده خروجی کراپ وات حاصل از داده هواشناسی منطقه مورد آزمایش

Kc: ضریب گیاهی

A: سطح کرت

جدول ۱- مجموع میزان آب استفاده شده جهت آبیاری در هر تیمار

Table 1- Total amount of water used for irrigation in each treatment

آبیاری (درصد از نیاز آبی گیاه)	حجم آب مصرفی در کل دوره رشد در هر کرت
Irrigation (Percentage of plant water requirement)	Volume of water consumption in the whole growth period per plot (L)
50	7957
75	11936
100	15915

جدول ۲- مشخصات خاک منطقه مورد آزمایش

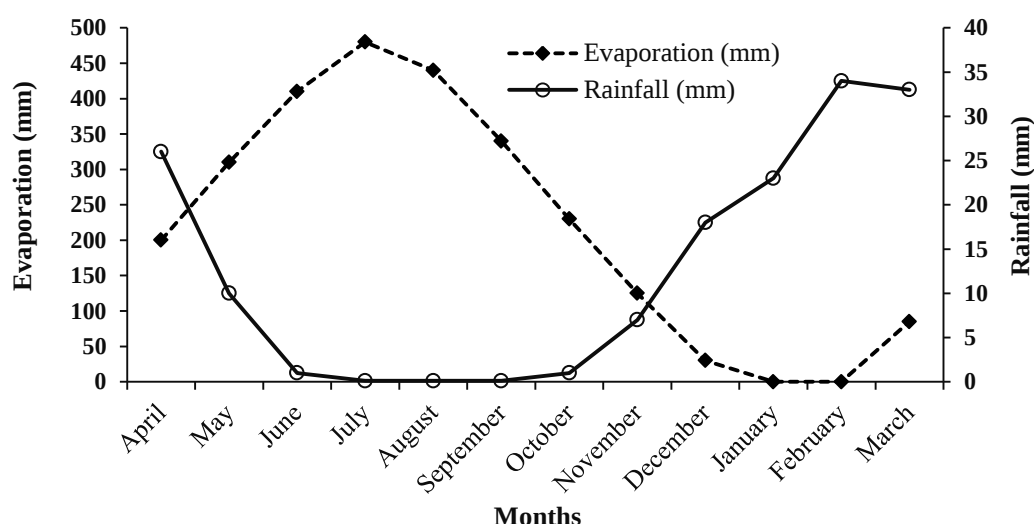
Table 2- Characteristics of the soil of the experimental site

نسبت جذب کلسیم	پتاسیم	سدیم	منیزیم	درصد رطوبت اشباع	ماده آلی	بافت خاک
Ca	K	Na	Mg	Saturated Moisture	Organic matter	Soil texture
سدیم	meq L ⁻¹			%	pH	لومی رسی
4.87	5	2.15	11	4.4	24.5	0.38
						7.8
						Clay loam



شکل ۱- مکان آزمایشی و کنتور آب برای اندازه‌گیری مصرف آب نصب شده است.

Figure 1- Experimental field and water meter installed to measure water consumption



شکل ۲- میانگین ۲۰ ساله نوسانات تبخیر و بارندگی در منطقه بیرجند

Figure 2- 20 years average of evaporation and rainfall fluctuations in Birjand region

صفات اندازه‌گیری شده

محتوای نسبی آب برگ

جلوگیری از تنفس)، نگهداری شدند. پس از این مدت آب سطحی نمونه‌ها با دستمال کاغذی گرفته شد و وزن اشباع برگ‌ها تعیین شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت، درون آون در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک و مجدد توزین شدند. محتوای نسبی آب برگ از رابطه (۴) محاسبه شد (Ritchi & Nighoyn, 1990).

$$RWC = \{(Fw - Dw) / (Sw - Dw)\} \times 100 \quad (4)$$

که در این رابطه Fw = وزن تر برگ، Dw = وزن خشک برگ و Sw = وزن اشباع برگ می‌باشد.

هدایت روزنه‌ای

در دو مرحله ابتدای گل‌دهی و ابتدای دانه‌بندی (۱۳۹۵/۷/۱۰، ۶۰ روز پس از کاشت)، هدایت روزنه‌ای چهار عدد برگ تصادفی در هر

سه گیاه از هر کرت را انتخاب کرده و در اوایل گلدهی (۱۳۹۵/۶/۲۵، ۴۴ روز پس از کاشت) دو ساعت پس از طلوع آفتاب یک برگ از هر گیاه (برگ ماقبل آخر یا همان آخرین برگ توسعه‌یافته) برای محاسبه محتوای آب نسبی برگ جدا گردید (Saremi & Seyadat, 1996). برگ‌ها بلافاصله در پاکت پلاستیکی و درون فلاسک حاوی یخ قرار داده شده و به سرعت به آزمایشگاه منتقل شدند و پس از تمیز کردن سطح برگ‌ها، وزن تر آن‌ها تعیین شد. پس از آن نمونه‌ها در ظروف دربسته حاوی آب مقطر قرار گرفتند و ظروف به مدت چهار تا شش ساعت در تاریکی (برای جلوگیری از فتوسنتز) و در دمای پایین (حدود چهار درجه سانتی‌گراد، جهت

در انتهای فصل رشد (که زمان تقریبی رسیدگی فیزیولوژیک گیاه در تیمار ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی به ترتیب به میزان ۹۹، ۹۰ و ۸۰ روز پس از کاشت بود) به صورت تصادفی از هر کرت با رعایت اصول اثر حاشیه تعداد انشعاب در گل آذین اصلی در سه تکرار شمارش شد.

وزن انشعاب در گل آذین اصلی

از هر کرت سه عدد بوته به صورت تصادفی انتخاب و از گل آذین اصلی یک عدد انشعاب برداشت و درون پاکت قرار گرفته و به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت و بعد وزن خشک آن تعیین گردید.

تعداد دانه در انشعاب در گل آذین اصلی

بعد از خشک شدن و وزن انشعاب و پس از انجام بوجاری، تعداد دانه در هر انشعاب تعیین گردید.

عملکرد و وزن هزار دانه

به منظور تعیین عملکرد دانه پس از رسیدگی کامل (۱۳۹۵/۸/۲۰)، ۱۰۰ روز پس از کاشت) زمانی که ۵۰ درصد بذور هر کرت به مرحله رسیدگی فیزیولوژیک رسیدند، سطحی معادل ۲ متر مربع از نیمه دوم کرت برداشت شد و پس از انجام بوجاری عملکرد هر کرت جداگانه اندازه گیری شد. وزن هزار دانه نیز با توزین ۱۰۰۰ دانه بر اساس رطوبت ۱۴ درصد گزارش شد (Ghasemi seiani et al., 2011).

در نهایت، محاسبات آماری با استفاده از نرم افزار SAS (9.3) انجام شد، رسم نمودارها نیز توسط نرم افزار Excel انجام گردید. میانگین صفات مورد مطالعه نیز با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی دار LSD در سطح پنج درصد مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

محتوای نسبی آب برگ در این پژوهش تحت تأثیر معنی داری اثر ساده سطوح مختلف آبیاری و اثر ساده سطوح مختلف تراکم بوته ($P < 0.01$) قرار گرفت (جدول ۳). نتایج نشان داد که بالاترین میزان محتوای نسبی آب برگ در سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی حاصل شده است که با افزایش میزان تنش کم آبی، به ترتیب محتوای نسبی آب برگ به میزان ۱۳/۱ و ۲۲/۶ درصد کاهش یافت. همچنین، افزایش تراکم از ۴۰ بوته به ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ بوته در متر مربع با کاهش محتوای نسبی آب برگ به ترتیب به میزان ۱/۷، ۴/۵، ۷/۳ و ۱۰/۷ درصد همراه بود (جدول ۴). در تراکم های بالاتر، به دلیل رقابت بیشتر

کرت از ارتفاع یکسان با استفاده از دستگاه Porometer (ECM/ASU) و در ساعات ۱۱ تا ۱۳ مورد اندازه گیری قرار گرفت و میانگین آن ها به عنوان هدایت روزنه ای تیمار در نظر گرفته شد.

شاخص پایداری غشا

شاخص پایداری غشا از طریق اندازه گیری میزان نشت الکترولیتی برگ در اوایل گلدهی (۱۳۹۵/۶/۲۵، ۴۴ روز پس از کاشت) از آخرین برگ توسعه یافته ارزیابی شد. برای این منظور ۱۵ عدد دیسک برگ به لوله هایی با حجم ۱۰ میلی لیتر آب مقطر انتقال یافت و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و شدت نور کم قرار داده شدند. سپس هدایت الکتریکی آب مقطر همراه نمونه ها (EC1) توسط دستگاه EC اندازه گیری شد. سپس لوله های آزمایش در حمام آب جوش (۹۵ درجه سانتی گراد) به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند و پس از سرد شدن EC2 آن ها مجدداً اندازه گیری شد و در نهایت نشت الکترولیتی با رابطه (۵) محاسبه گردید (Sairam & Srivastava, 2001).

$$EL\% = \left[\frac{EC1}{EC2} \right] * 100 \quad (5)$$

کارایی مصرف آب (WUE)

کارایی مصرف آب که نشان دهنده عملکرد دانه تولید شده به ازای واحد حجم آب مصرفی می باشد، بر اساس رابطه (۶) محاسبه گردید (Sharma et al., 2015).

$$WUE = \frac{GY}{W} \quad (6)$$

که در این رابطه GY نشان دهنده عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار و W نیز حجم آب مصرف شده در هکتار بر حسب متر مکعب می باشد.

پروتئین دانه

پروتئین دانه به روش کج لال اندازه گیری شده و با استفاده از رابطه (۷) میزان نیتروژن یا درصد پروتئین خام نمونه محاسبه گردید (AOAC, 1990).

$$\%protein = \frac{v \times 0.14 \times F}{m} \dots\dots\dots (7)$$

v: حجم اسید مصرفی

m: وزن نمونه (گرم)

F: این فاکتور برای مواد خوراکی مختلف، متفاوت است که معمولاً عدد ۶/۲۵ را قرار می دهند که فاکتور پروتئینی است. در صورتی که این فاکتور در صورت کسر نباشد عدد به دست آمده درصد نیتروژن نمونه می باشد.

تعداد انشعاب در گل آذین اصلی

برای آب و مواد غذایی، میزان آب قابل دسترس برای هر بوته نسبت به تراکم‌های پایین‌تر کاهش می‌یابد که نتیجه آن، کاهش محتوای نسبی آب برگ خواهد بود. این شاخص، ارتباط نزدیکی با حجم سلول دارد و بیان‌کننده تعادل بین فراهمی آب بافت‌های برگ و سرعت تعرق می‌باشد (Lugoian & Ciulca, 2011).

به نظر می‌رسد گیاهانی که تحت تنش خشکی قرار می‌گیرند، فضای بین سلولی و میزان آب در پیکره خود را از طریق افزایش مواد اسمزی در درون بافت‌ها به حداقل می‌رسانند تا آب از بافت خاک با نیروی بیشتری وارد آن‌ها شود که این امر موجب کاهش میزان آب نسبی در شرایط تنش خشکی می‌گردد (Khorshidi et al., 2001). اندازه‌گیری وضعیت آب گیاه به‌عنوان یک شاخص مهم در شناسایی

پاسخ گیاهان به تنش خشکی مطرح است به‌طوری که زیاد بودن میزان آب نسبی برگ و کم بودن سرعت از دست رفتن آب نشان‌دهنده سازگاری به خشکی است و می‌تواند به‌عنوان یک معیار گزینش برای تحمل به خشکی مورد استفاده قرار گیرد (Winter et al., 1988). تغییرات محتوای رطوبت برگ به‌عنوان یک واکنش کوتاه‌مدت به تنش و معیاری از توان حفظ قدرت منبع در شرایط تنش خشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ahmadi & Sivoesmarde, 2004). پایین آمدن محتوای نسبی آب برگ‌ها و کاهش تورژسانس در بافت‌های گیاهی می‌تواند اولین اثر تنش خشکی باشد که به‌طور طبیعی رشد سلول و اندازه نهایی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد (El-Kheir et al., 1994).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس صفات مورد ارزیابی
Table 3- Results of analysis of variance of evaluated traits

	S.O.V				خطا Error	ضریب تغییرات CV (%)
	بلوک Block	آبیاری Irrigation (I)	تراکم Density (D)	آبیاری × تراکم I × D		
درجه آزادی Degrees of freedom	2	2	4	8	28	
محتوای نسبی آب برگ Relative leaf water content	88.4**	1448.4**	105.1**	7.4 ^{ns}	15.01	5.1
نشت الکترولیت Electrolyte leakage	216.07 ^{ns}	1087.3*	484.05 ^{ns}	170.3 ^{ns}	323.9	26.1
هدایت روزنه‌ای در گلدهی Directing an orifice in flowering	12.4 ^{ns}	709.9**	12.7 ^{ns}	4.7 ^{ns}	4.9	7.8
هدایت روزنه‌ای در دانه‌بندی Aperture guidance in granulation	1.3 ^{ns}	380.1**	44.4**	3.8 ^{ns}	5.6	48.9
تعداد انشعاب خوشه Number of cluster bifurcations	9073.6 ^{ns}	1620400.9**	1323970.4**	60109.6**	4115.9	6.1
وزن انشعاب Branch weight	263191.1*	13306110.8**	2547390.7**	4791108**	73143.3	19.5
تعداد دانه در انشعاب Number of seeds per branch	852.1 ^{ns}	29591.6**	1069.9 ^{ns}	528.2 ^{ns}	521.6	26.8
وزن هزار دانه Weight of one thousand seeds	68.7 ^{ns}	1725.4**	72.6*	10.8 ^{ns}	20.6	27.8
عملکرد دانه Grain performance	415216.1 ^{ns}	358029081**	3112722.2**	818071.1**	151263.3	24.5
کارایی مصرف آب Water use efficiency	0.2 ^{ns}	10.5**	1.5**	0.3**	0.08	27.0
پروتئین دانه Grain protein	4.1 ^{ns}	20.8**	2.6 ^{ns}	3.3 ^{ns}	2.06	7.4

***، * و ^{ns} به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

***, * and ns indicates significant at 0.01 and 0.05 probability level and non-significant, respectively

جدول ۴- اثر ساده سطوح آبیاری و تراکم بوته بر برخی صفات اندازه‌گیری شده گیاه کینوا
Table 4- Effect of irrigation levels and plant density on some measured traits of Quinoa

تیمار Treatment	محتوای نسبی آب برگ Relative leaf water content (%)	نشت الکترولیت Electrolyte leakage ($\mu\text{mol cm}^{-1}$)	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductivity ($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		تعداد دانه در انشعاب در گل‌آذین اصلی Number of seeds per branching in the main inflorescence		وزن هزار دانه Weight of 1000 seeds (g)	پروتئین دانه Grain protein (%)
			گلدهی Flowering	دانه‌بندی Seed setting				
تراکم (بوته در متر مربع) Density (Plant per square meter)	40	79.91 ^a	67.39	28.22	23.44 ^b	79.76	1.32 ^b	19.53
	60	78.51 ^a	69.94	27.89	23.56 ^b	78.92	1.42 ^a	18.31
	80	76.32 ^{ab}	74.67	27.11	24.11 ^b	89.97	1.43 ^a	19.40
	100	74.06 ^{bc}	67.05	29.67	25.44 ^b	95.56	1.26 ^{bc}	19.62
	120	71.39 ^c	66.26	29.89	28.78 ^a	81.31	1.18 ^c	19.48
آبیاری (درصد از نیاز آبی گیاه) Irrigation (Percentage of plant water requirement)	50	66.78 ^c	78.50 ^a	21.93 ^c	20.07 ^c	44.62 ^c	0.68 ^c	20.29 ^a
	75	74.98 ^b	66.73 ^{ab}	28.07 ^b	25.00 ^b	78.25 ^b	1.46 ^b	19.54 ^a
	100	86.35 ^a	61.96 ^b	35.67 ^a	30.13 ^a	132.64 ^a	1.82 ^a	17.98 ^b

شاخص پایداری غشا

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که سطوح مختلف آبیاری روی نشت الکترولیت اثر معنی‌داری ($P < 0.05$) داشته است (جدول ۳). کمترین میزان تخریب غشاء در سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی حاصل شده است که با کاهش آبیاری به ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی به‌ترتیب میزان نشت الکترولیت با ۷/۷ و ۲۶/۷ درصد افزایش داشته است (جدول ۴).

غشای سلولی از نخستین اندام‌هایی است که تحت شرایط تنش، آسیب می‌بیند و تراوایی آن افزایش یافته و نشت الکترولیتی از سلول باعث مرگ آن می‌گردد. پایداری غشای سلولی می‌تواند به‌عنوان معیاری از تحمل به تنش کم‌آبیاری در نظر گرفته شود (Nazari nasi et al., 2011). تنش کم‌آبی از تکامل دیواره ممانعت نموده و باعث نشت بیشتر الکترولیت‌ها از دیواره سلولی شده و پایداری غشاء سلولی کاهش می‌یابد (Shibario et al., 1998). در نتیجه صدمه به غشای سلولی، تراوایی افزایش یافته و بدین ترتیب نشت الکترولیتی از سلول باعث پژمردگی گیاه می‌شود (Blume & Ebercon, 1981). خزاکی

(Khazayi, 2001) گزارش کرده است که میزان صدمه به غشاهای سلولی بر اثر تنش خشکی ممکن است از طریق اندازه‌گیری نشت الکترولیت‌ها از سلول سنجیده شود، ایشان همچنین خاطر نشان نموده است که در شرایط تنش رطوبتی، پایداری غشاء سلولی جزء اصلی تحمل به تنش خشکی در گندم است. در طی بررسی اثر تنش خشکی بر روی چهار رقم سورگوم مشخص شد که میزان پایداری غشا پلاسمایی در بین ارقام مختلف متفاوت بود و با افزایش تنش آب کاهش یافت و نیز مشخص شد که پایداری غشا سیتوپلاسمی تحت تأثیر میزان موم‌پای کوتیکولی، ضخامت کوتیکول و پتانسیل آب برگ‌ها قرار گرفت (Premachandra et al., 1992).

هدایت روزنه‌ای

(الف) ابتدای گلدهی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که این صفت تنها تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف آبیاری ($P < 0.01$)، قرار گرفته است (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف آبیاری نشان داد که

بیشترین هدایت روزنه‌ای به میزان ۳۵/۶۶ (مول CO₂ در متر مربع بر ثانیه) در سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی حاصل شده است که با افزایش میزان تنش به ۵۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی به ترتیب با ۳۸/۵ و ۲۱/۳ درصد کاهش همراه بوده است (جدول ۴).

(ب) ابتدای دانه‌بندی

همچنین نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که این صفت در این مرحله نیز تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته ($P < 0.01$)، قرار گرفته است (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف آبیاری نشان داد که بیشترین هدایت روزنه‌ای به میزان ۳۰/۱۳ (مول CO₂ در متر مربع بر ثانیه) در سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی حاصل شده است که با افزایش میزان تنش به ۵۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی به ترتیب با ۳۳/۴ و ۱۷/۰۳ درصد کاهش همراه بوده است. نتایج مقایسه میانگین تراکم بوته نشان داد که با افزایش تراکم میزان هدایت روزنه‌ای نیز افزایش داشته است به طوری که بالاترین آن در تراکم ۱۲۰ بوته به میزان ۲۸/۷۷ (مول CO₂ در متر مربع بر ثانیه) حاصل شد و با کاهش تراکم بوته به ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ بوته در مترمربع به ترتیب به میزان ۱۱/۶، ۱۶/۲، ۱۸/۱ و ۱۸/۵ درصد با کاهش هدایت روزنه‌ای همراه بود (جدول ۴).

در تیمار آبیاری کامل هدایت روزنه‌ای زیادتر بوده و احتمالاً همین موضوع سبب افزایش فتوسنتز و تعرق بیشتر و در نتیجه رشد و توسعه بیشتر (افزایش ارتفاع و سطح برگ) در این تیمار شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت رفتار روزنه‌ها نقش اساسی در تعیین آثار تنش بر گیاه دارد. بیش از ۹۰ درصد تبادل دی‌اکسید کربن و بخار آب در گیاه توسط روزنه‌ها انجام می‌گیرد. تنش آبی باعث محدود شدن بازشدگی روزنه‌ها و کاهش هدررفت آب و جذب کربن و بنابراین حفظ رطوبت در بافت‌های گیاه می‌شود (Goldhamer, 2002). تنش خشکی می‌تواند موجب کاهش میزان فتوسنتز شود زیرا چون میزان باز بودن روزنه تابع وضعیت آبی گیاه است، کمبود آب گیاه منجر به بسته شدن دهانه روزنه می‌گردد که موجب کاهش میزان هدایت روزنه‌ای و در نتیجه کاهش فتوسنتز می‌گردد (Ahmadi et al., 2004). در آزمایش بر روی چغندر قند مشاهده شد که تنش خشکی موجب کاهش فتوسنتز در این گیاه می‌گردد (Baloch et al., 2006). ایشان دلیل کاهش میزان فتوسنتز را کاهش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه کاهش انتشار دی‌اکسید کربن دانستند که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد.

صفات عملکردی

تعداد انشعاب در گل‌آذین اصلی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که این صفت تحت تأثیر

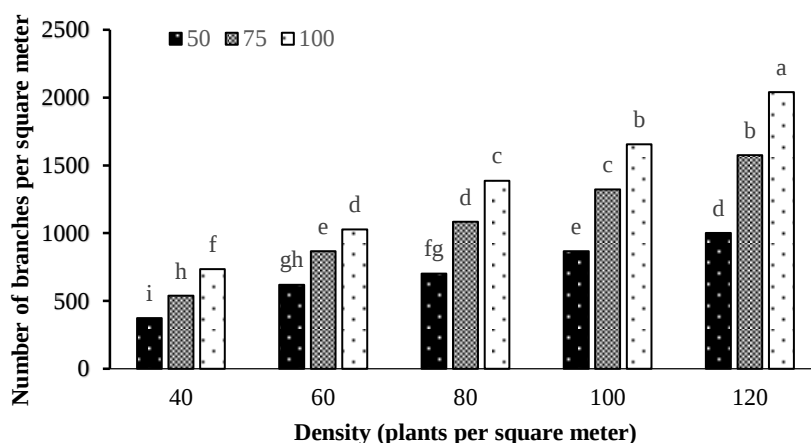
معنی‌دار سطوح مختلف آبیاری، تراکم بوته و اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته ($P < 0.01$)، قرار گرفته است (جدول ۳). اثرات متقابل نشان داد که بیشترین تعداد انشعاب در متر مربع در ترکیب تیماری آبیاری با ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تراکم ۱۲۰ بوته در متر مربع به میزان ۲۰۴۰ انشعاب در متر مربع حاصل شد. همچنین نتایج نشان داد که در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی با افزایش تراکم بوته از ۴۰ به ۱۲۰ بوته در متر مربع به میزان ۱۶۷/۸۶ درصد افزایش تعداد انشعاب در متر مربع را داشته و به همین ترتیب در سطح ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی با افزایش تراکم، شاهد افزایش تعداد انشعاب در متر مربع به ترتیب به میزان ۱۹۲/۵۶ و ۱۷۸/۱۸ درصد بود (شکل ۳).

در سطوح پایین نیاز آبی کاهش تعداد انشعاب نیز در جهت تنظیم تعداد مقصدهای فیزیولوژیکی با میزان تولید مواد پرورده انجام شده است. از آن‌جا که اجزای اصلی عملکرد دانه یعنی تعداد انشعاب در واحد سطح، تعداد دانه در انشعاب و وزن صد دانه در طی مراحل نسبتاً متفاوتی از رشد گیاه تعیین می‌شوند. شرایط محیطی موجود در زمان آغاز و طی دوره توسعه هر جزء عملکرد بر سهم نسبی آن جزء بر عملکرد اثر می‌گذارد. تنش آب در برخی از مراحل رشد در مقایسه با مراحل دیگر صدمات بیشتری را به محصول اقتصادی گیاه وارد می‌کند. در غلات، دوره بحرانی نیاز آبی معمولاً از مرحله تشکیل اندام‌های تولید مثل آغاز می‌شود و تا مرحله گرده‌افشانی و باروری ادامه می‌یابد (Cabuslay et al., 2002). سرمدنیا و کوچکی (Sarmadnia & Koocheki, 1991)، به وجود ارتباط نزدیک بین تعداد انشعاب در واحد سطح با رژیم رطوبتی خاک اشاره کرده‌اند.

وزن انشعاب در گل‌آذین اصلی در متر مربع

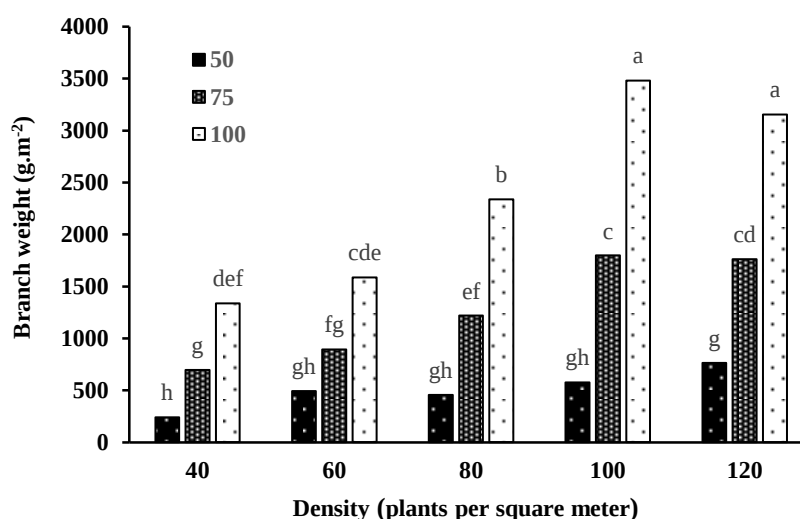
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که این صفت تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف آبیاری، تراکم و همچنین اثر متقابل دوگانه بین سطوح مختلف آبیاری و تراکم ($P < 0.01$)، قرار گرفته است (جدول ۳). اثرات متقابل نشان داد که بیشترین وزن انشعاب در متر مربع در ترکیب تیماری آبیاری با ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تراکم ۱۰۰ بوته بر متر مربع حاصل شد که به میزان ۳۴۸۰/۴ گرم در متر مربع بوده است. نتایج نشان داد که کاهش تراکم بوته از ۱۰۰ به ۴۰ بوته در متر مربع در هر سطح آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد آبیاری به ترتیب به میزان ۵۸/۶، ۶۱/۴ و ۶۱/۶ درصد با کاهش وزن انشعاب همراه بود (شکل ۴).

یاداو و همکاران (Yadav et al., 2001) گزارش نمودند که در شرایط تنش خشکی وزن دانه، وزن انشعاب اصلی، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت در ارقامی از گندم که از مقاومت کمتری برخوردار هستند، کاهش می‌یابد.



شکل ۳- اثر متقابل سطوح آبیاری و تراکم بوته بر تعداد انشعاب در متر مربع (LSD 0.05)

Figure 3- Interaction of different irrigation levels and plant density on the number of branches per square meter (LSD 0.05)



شکل ۴- اثر متقابل سطوح آبیاری و تراکم بوته بر وزن انشعاب در گل آذین اصلی در متر مربع (LSD 0.05)

Figure 4- Interaction of irrigation levels and plant density on branch weight in main inflorescence per square meter (LSD 0.05)

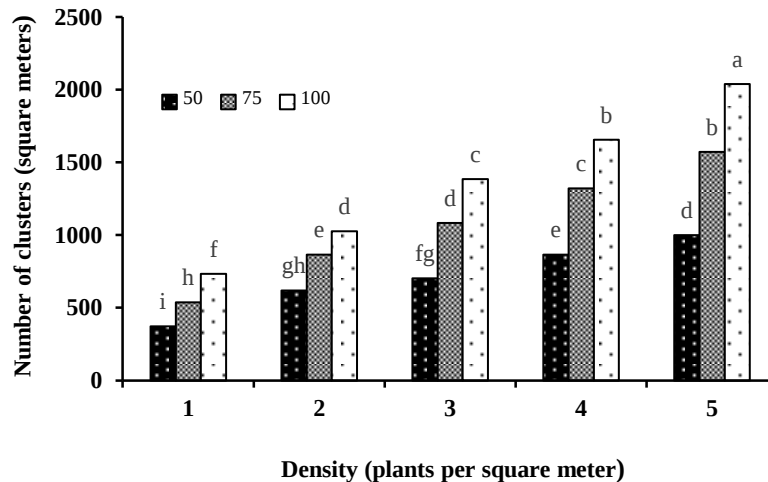
افزایش بیشتر طول ریشه و استخراج بیشتر آب از خاک انتقال بهتر روزنه‌ای و گسترش بیشتر انشعاب می‌سازد و در مجموع تنظیم اسمزی به‌طور مستقیم باعث افزایش تولید ماده خشک و به‌طور غیرمستقیم باعث افزایش تعداد دانه در انشعاب می‌شود (Chamberling & Wilson, 1985). بوجانگ و فوکایی (Boojang & Fukai, 1996)، اثر کمبود آب در مراحل مختلف رشد را بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام برنج ارزیابی کردند و دریافتند که اعمال کم آبیاری در مرحله رویشی، تأثیر کمی بر رشد و عملکرد دانه داشته است و کاهش ۳۰ درصدی عملکرد ناشی از کاهش در تعداد انشعاب و کاهش در تعداد

تعداد دانه در انشعاب در گل آذین اصلی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که این صفت تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف آبیاری ($P < 0.01$)، قرار گرفته است (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف آبیاری نشان داد که بیشترین تعداد دانه به میزان ۱۳۲/۶۴ در سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی حاصل شده است که با افزایش میزان تنش به ۵۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی به‌ترتیب با ۶۶/۳۶ و ۴۱ درصد کاهش همراه بود (جدول ۴، شکل ۵). تنظیم اسمزی بالا، گیاه را قادر به حفظ بیشتر فشار تورژسانس،

تنش تا ۶۰ درصد کاهش یافت و باعث کاهش درصد پر شدن دانه نیز شد.

دانه در انشعاب بود. اما زمانی که کم آبیاری در خلال دوره گلدهی اتفاق افتاد، تأثیر آن روی عملکرد بسیار زیاد بوده، به طوری که گلدهی به تأخیر افتاده و تعداد دانه در انشعاب نسبت به شرایط بدون



شکل ۵- اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته بر تعداد دانه در خوشه (LSD 0.05)

Figure 5- Interaction of different irrigation levels and plant density on the number of seeds per cluster (LSD 0.05)

مقایسه تراکم‌های ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ بوته در متر مربع گزارش نمودند که بیشترین تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه و عملکرد دانه کلزا در تراکم ۸۰ بوته در متر مربع به دست آمد. وزن هزار دانه با سرعت و مدت پر شدن دانه ارتباط دارد. تنش خشکی در طی پر شدن دانه وزن دانه را کاهش می‌دهد. این امر احتمالاً به دلیل کاهش مواد پرورده برای رشد دانه‌هاست. کاهش تولید مواد پرورده نیز به کاهش فرایند فتوسنتزی مربوط می‌شود که با بسته شدن روزنه‌ها مرتبط است (Morgan, 1977). نتایج این آزمایش با نتایج پژوهشگرانی نظیر (Rabbani & Emam, 2011; Rushdie et al., 2006) که همگی کاهش وزن هزار دانه را در اثر تنش خشکی گزارش نمودند، مطابقت دارد. بیلر و همکاران (Bieler et al., 1993) در مطالعه رشد دانه ارزن مرواریدی در شرایط تنش و بدون تنش نشان دادند وزن تک دانه در شرایط تنش خشکی کاهش یافت. در اینجا تنش خشکی سبب کاهش طول مدت مرحله خطی رشد دانه شد و از این طریق وزن نهایی دانه کاهش یافت.

عملکرد

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر آبیاری، اثر تراکم و نیز برهمکنش سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته بر این صفت در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر متقابل سطوح آبیاری و تراکم نیز نشان داد که بالاترین عملکرد در ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تراکم ۱۰۰ بوته به میزان ۴۲۶۸/۵۲ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. نتایج

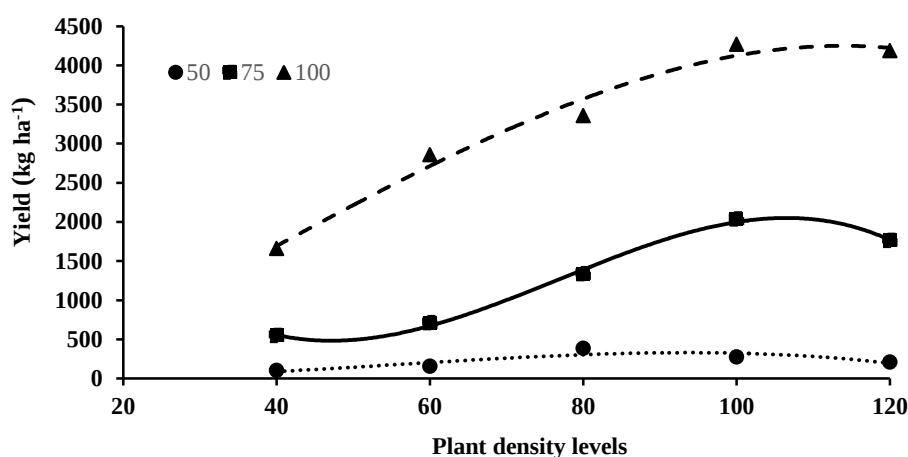
وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که وزن هزار دانه تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته ($P < 0.01$) قرار گرفته است (جدول ۳). بالاترین وزن هزار دانه در سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی به میزان ۱/۸۲ گرم حاصل شده است که با افزایش میزان تنش کم آبی، به ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی به ترتیب به میزان ۱۹/۶ و ۶۲/۷ درصد کاهش یافته است. با کاهش تنش از ۵۰ به ۷۵ درصد نیاز آبی وزن هزار دانه به میزان ۱۱۵/۸ درصد رشد داشته و همچنین با کاهش تنش از ۷۵ به ۱۰۰ درصد نیاز آبی ۲۴/۴ درصد افزایش داشت (جدول ۴). در پژوهش جمالی و همکاران (Jamali et al., 2018) که بررسی اثر تنش آبی بر روی گیاه کینوا رقم NSRCQ بود نیز وزن هزار دانه در تیمار ۱۰۰ درصد آبی بیشترین مقدار را داشت. به نظر می‌رسد که کاهش وزن هزار دانه در شرایط تنش خشکی می‌تواند به علت کاهش دوره پر شدن دانه و پیری زودرس گیاه باشد. قوشچی و همکاران (Ghooshchi et al., 2010) و سلیمانی پور و همکاران (Soleimanpour et al., 2009) نیز کاهش وزن هزار دانه کلزا را در شرایط کم آبی گزارش نمودند. همچنین بالاترین وزن هزار دانه تحت تأثیر تراکم بوته به میزان ۱/۴۳ گرم در تراکم ۸۰ بوته حاصل شد. تراکم‌های ۴۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ بوته به ترتیب به میزان ۷/۵۶، ۱/۱۲، ۱۲/۲۷ و ۱۷/۹ درصد کاهش نسبت به تراکم ۸۰ بوته همراه بود. تراکم بوته می‌تواند بر عملکرد و بسیاری دیگر از صفات گیاهان موثر باشد (جدول ۴). متین‌فر و همکاران (Matinfar et al., 2012)، در

بهترین عملکرد ۴۰۰۰۰ بوته در یک هکتار به دست می‌آید و کارایی مصرف آب با افزایش میزان آبیاری کاهش پیدا می‌کند (Rao, 1987). انگلیش و راجا (English & Raja, 1990) سه مورد کم آبیاری را بیان می‌کنند که در آن‌ها کاهش هزینه‌های آبیاری بیش از کاهش درآمد ناشی از کاهش محصول) بوده است. نحوه توزیع و تراکم بوته‌ها بر جذب و بهره‌وری از عوامل محیطی موثر بر رشد و رقابت درون و برون بوته‌ای تأثیر گذاشته، در نهایت از عوامل تعیین‌کننده عملکرد دانه است (Board & Harville, 1996; Prasad & Yadav, 1990). در تراکم‌های بسیار زیاد ناشی از کاهش زیاد فاصله بین بوته‌ها، به دلیل سایه‌اندازی و رقابت شدید برای نور و کمبود عوامل محیطی، سرعت ریزش برگ‌ها افزایش می‌یابد. این دو ممکن است از آثار مفید رشد سریع اولیه بکاهد (Board & Harville, 1996) و در صورت محدودیت شدید در عوامل محیطی کاهش عملکرد دانه گردد (Sandha et al., 1977). عملکرد بالقوه کینوا در صورتی که کلیه شرایط مطلوب برای آن فراهم باشد، بسته به رقم و منطقه کشت، ۶-۱/۵ تن در هکتار گزارش شده است (FAO, 2011).

نشان داد که در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی بالاترین عملکرد در تراکم ۱۰۰ بوته حاصل شد و با کاهش تراکم در این سطوح به ترتیب به میزان ۶۱/۲ و ۷۳/۲ درصد با کاهش عملکرد همراه بود ولی در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی بالاترین عملکرد در تراکم ۸۰ بوته حاصل شد که با کاهش تراکم به ۴۰ بوته عملکرد به میزان ۷۳/۵ درصد با کاهش همراه بود. همچنین نتایج نشان‌دهنده افزایش تراکم بهینه با افزایش سطح آبیاری است، به طوری که بهینه‌ترین تراکم در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی به میزان ۱۱۳ بوته در مترمربع حاصل شده و با افزایش میزان تنش به ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی به ترتیب تراکم بهینه به میزان ۱۰۵ و ۸۰ بوته در متر مربع حاصل شده است (شکل ۶). تراکم بسیار بالا موجب افزایش بیماری، آفات و همچنین ساقه‌های باریک و بوته‌های ضعیف و افزایش احتمال ورس می‌شود.

تحقیقات رائو (Rao, 1987) نشان داد که عملکرد محصول ذرت (*Zea mays* L.) به‌طور خطی با افزایش میزان سطح آبیاری افزایش می‌یابد و در شرایط بدون محدودیت آب، تراکم کاشت ۷۰۰۰-۵۵۰۰۰ بوته در یک هکتار مناسب بوده و در شرایط با محدودیت آب،



شکل ۶- اثر متقابل سطوح آبیاری و تراکم بوته بر میزان عملکرد گیاه کینوا. معادلات مربوط به خطوط رگرسیونی در جدول زیر آورده شده است.
Figure 6- Interaction of irrigation levels and plant density on quinoa yield. The equations for the regression lines are given in the table below.

آبیاری (درصد از نیاز آبی گیاه) Irrigation (Percentage of plant water requirement)	100	$y = -0.0014x^3 + 0.2272x^2 - 6.5128x + 72.815; R^2 = 0.755$
	75	$y = -0.015x^3 + 3.4553x^2 - 225.76x + 5017.2; R^2 = 0.996$
	50	$y = -0.0031x^3 + 0.3494x^2 + 39.256x - 240.24; R^2 = 0.980$

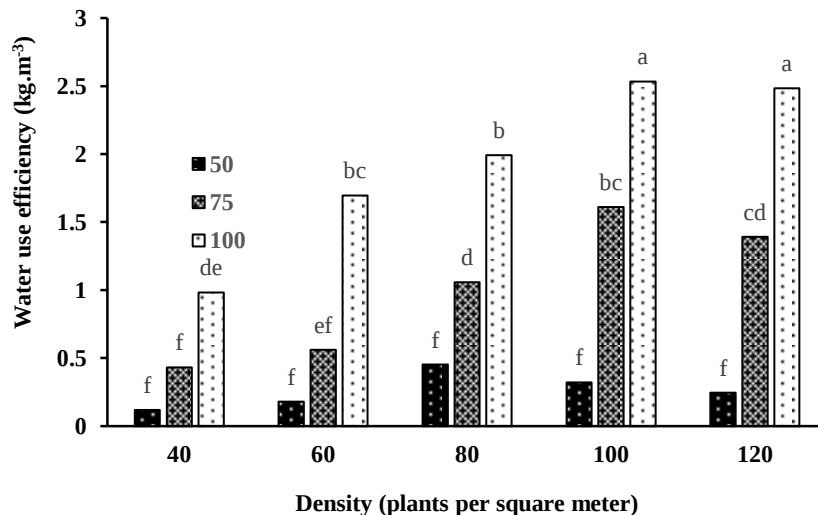
معنی‌دار سطوح مختلف آبیاری، سطوح تراکم و برهمکنش سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته ($P < 0.01$)، قرار گرفته است (جدول ۳).

کارایی مصرف آب (WUE)
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که این صفت تحت تأثیر

بود ولی در تیمار آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی بالاترین کارایی مصرف آب در تراکم ۸۰ بوته به میزان ۰/۴۵ کیلوگرم در متر مکعب حاصل شد و با کاهش تراکم بوته به ۴۰ بوته به میزان ۷۳/۵ درصد کاهش همراه بود (شکل ۷).

در پژوهش داگدلن و همکاران (Dagdelen et al., 2006) افزایش راندمان مصرف آب را همراه با کم شدن میزان آب مصرفی گزارش کردند، در حالی که (Eshghizadeh et al., 2010) افزایش کارایی مصرف آب همراه با افزایش میزان آب آبیاری گزارش کرده‌اند.

مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آبیاری و تراکم نشان داد که بالاترین کارایی مصرف آب در ترکیب تیماری ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تراکم ۱۰۰ بوته در متر مربع به میزان ۲/۵۳ کیلوگرم در متر مکعب حاصل شد ولی پایین‌ترین کارایی مصرف آب نیز در ترکیب تیماری ۵۰ درصد نیاز آبی و تراکم ۸۰ بوته به میزان ۰/۴۵ کیلوگرم در متر مکعب آب بود. نتایج نشان داد که در سطوح آبیاری ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی با کاهش تراکم از ۱۰۰ به ۴۰ بوته در متر مربع کارایی مصرف آب به ترتیب به میزان ۷۳/۲ و ۶۱/۲ درصد با کاهش همراه



شکل ۷- اثر متقابل سطوح آبیاری و تراکم بوته بر کارایی مصرف آب (LSD 0.05)

Figure 7- Interaction of irrigation levels and plant density on water use efficiency (LSD 0.05)

دانه شد. به نظر می‌رسد که با اعمال تنش خشکی و کوتاه شدن دوره‌ی رشد زایشی فرصت کمتری برای ذخیره نشاسته وجود دارد و در نتیجه میزان پروتئین دانه افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که خشکی اثر نامطلوبی بر خصوصیات عملکردی کینوا دارد. اجزای عملکرد کینوا نیز مانند وزن هزار دانه، وزن انشعاب، تعداد دانه در انشعاب و تعداد انشعاب در گل‌آذین اصلی در اثر تنش خشکی کاهش قابل توجهی داشتند. نتایج نشان داد تنش تاثیر منفی بر ویژگی‌های مورد بررسی شامل عملکرد، گل و دانه داشت. با نقصان مواد فتوسنتزی انتقال مواد به سمت اندام زایشی نیز کاهش پیدا می‌کند که در نهایت موجب کاهش عملکرد رویشی و زایشی در گیاه می‌شود. با توجه به موقعیت ایران از نظر اقلیمی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و وجود بحران آب در این مناطق و انتخاب گیاهان سازگار به این شرایط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است شناخت و توسعه کشت گیاهانی که از

پروتئین دانه

میزان پروتئین دانه در این تحقیق تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف آبیاری ($P < 0.01$)، قرار گرفته است (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بالاترین درصد پروتئین تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی به میزان ۲۰/۲۹ درصد بود که به ترتیب با کاهش میزان تنش به ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ترتیب به میزان ۳/۷۱ و ۱۱/۳۹ درصد کاهش همراه بود (جدول ۴). تنش خشکی سبب کاهش دوره پر شدن دانه می‌شود که سبب کاهش تجمع بسیاری از مواد می‌گردد، اما سنتز پروتئین به دلیل افزایش میزان انتقال مجدد نیتروژن، کمتر تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد (Oya, 2004). که در این تحقیق به دلیل کاهش دوره رشد زایشی این صفت با افزایش همراه بوده است. پروتئین بذر این گیاه بین ۱۳/۸۱ تا ۲۱/۹ درصد می‌باشد. به دلیل میزان بالای آمینواسیدها، این گیاه تنها گیاهی است که کل آمینواسیدهای ضروری بدن را تامین می‌کند (Bhargava et al., 2006). بیگلویی و همکاران (Biglouei et al., 2013) گزارش نمودند که افزایش تنش رطوبتی در ذرت سینگل کراس ۷۰۴ باعث افزایش درصد پروتئین

رشد کوتاه است، می‌تواند گیاه مناسبی جهت کشت در مناطق نیمه‌خشک باشد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که در بین سطوح آبیاری بالاترین تراکم بهینه چیزی حدود ۱۱۰ تا ۱۱۵ بوته در متر مربع بود و در صورت کم شدن آبیاری تراکم بهینه کاهش می‌یابد چون در این آزمایش، سطح ۷۵ درصد نیاز آبی ۱۰۵ بوته و سطح ۵۰ درصد نیاز آبی ۸۰ بوته بهینه‌ترین تراکم بوده‌اند.

ویژگی‌های مقاومت به خشکی پایین بهره‌مند هستند نیز از برنامه‌های اصولی و لازم در این مناطق می‌باشد. کشت کینوا می‌تواند راه‌گشایی در زمینه تولید و تکثیر این گیاه با ارزش باشد و به این وسیله موجب ترویج و گسترش آن در منطقه گردد، از طرفی چون بخش اعظمی از کشور ایران و به‌ویژه استان خراسان جنوبی در منطقه اقلیمی با آب و هوای گرم و خشک قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل از این پژوهش و با توجه به این که کینوا یک گیاه مقاوم به خشکی با دوره

References

1. Abugoch, L., Castro, E., Tapia, C., Añón, M. C., Gajardo, P., & Villarroel, A. (2009). Stability of Quinoa Flour Proteins (*Chenopodium quinoa* Willd.) During Storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(10), 2013-2020. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02023.x>
2. Ahmadi, A., & Ceicemardeh, A. (2004). Effect of drought stress on soluble carbohydrate, chlorophyll and proline in four adopted wheat cultivars with various climate of Iran. *Iranian Journal Agriculture Science*, 35, 753-763. (in Persian with English abstract).
3. Alvarez, J. A., & Ashraf, A. (2010). Role of vitamin D in insulin secretion and insulin sensitivity for glucose homeostasis. *International Journal of Endocrinology*, 61(4), 337-48. <https://doi.org/10.1155/2010/351385>
4. Aly, A. A., Al-Barakah, F. N., & El-Mahrouky, M. A. (2018). Salinity stress promote drought tolerance of *Chenopodium Quinoa* Willd. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(11), 1331-1343. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1457160>
5. AOAC. (1990). *Official Methods of Analyses*. Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC.
6. Aziz, A., Akram, N. A., & Ashraf, M. (2018). Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants under water deficit regimes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 123, 192-203. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.12.004>
7. Badran, A. E., El-Sherebeny, E. A. M., & Salama, Y. A. (2015). Performance of some Alfalfa cultivars under salinity stress conditions. *Journal Agriculture Science*, 7(10), 281-290. <https://doi.org/10.5539/jas.v7n10p281>
8. Bagheri, M. (2019). *Quinoa Agriculture Manual*. Ministry of Jihad for Agriculture, Seed and Plant Breeding Research Institute. 56 pages.
9. Bhargava, A., Shukla S., & Ohri, D. (2006). *Chenopodium quinoa*—An Indian perspective. *Industrial Crops and Products*, 23, 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.04.002>
10. Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2007). Effect of sowing dates and row spacing's on yield and quality components of quinoa (*Chenapodium quinoa*) leaves. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 77(11), 748-751. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050405>
11. Bhargava, A., Shukla, S., Rajan S., & Ohri, D. (2007). Genetic diversity for morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) germplasm. *Genetics Resources and Crop Evolution*, 54, 167-173. <https://doi.org/10.1007/s10722-005-3011-0>
12. Bieler, P., Fussell L. K., & Bidinger, F. R. (1993). Grain growth of *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. under well watered and drought- stressed conditions. *Field Crops Reserch*, 31, 41-54. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90049-S](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90049-S)
13. Biglouei, M. H., Kafi Ghasemi, A., Javaher Dashti, M., & Esfahani, M. (2013). Effect of irrigation regimes on yield and quality of forage maize (KSC 704) in Rasht region in Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 15(3), 196-206.
14. Bloch, D., Hoffman, C. M., & Marlandar, B. (2006). Impact of water supply on photosynthesis, water use and carbon isotope discrimination of sugar beet genotypes. *European Journal of Agronomy*, 24(3), 218-225.
15. Blum, A., & Ebercon, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat 1. *Crop Science*, 21(1), 43-47. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100010013x>
16. Board, J. E., & Harville, B. G. (1996). Growth dynamics during the vegetative period affects yield of narrow-row, late-planted soybean. *Agronomy Journal*, 88, 567-572. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800040012x>
17. Boojang, H., & Fukai, S. (1996). Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions.1: Growth during drought. *Field Crops Research*, 48, 37-45. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00039-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00039-1)
18. Cabuslay, G. S., Ito, O., & Alejar, A. A. (2002). Physiological Evaluation of Responses of Rice (*Oryza sativa* L.) to Water Deficit. *Plant Science*, 163(4), 815-827. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00217-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00217-0)

19. Chamberlain, D. G., Thomas, P. C., Wilson, W., Newbold, C. J., & MacDonald, J. C. (1985). The effects of carbohydrate supplements on ruminal concentrations of ammonia in animals given diets of grass silage. *The Journal of Agricultural Science*, 104(2), 331-340. <https://doi.org/10.1017/S0021859600044002>
20. Dagdelen, N., Yilmaz, E., Sezgin, F. & Gurbuz, T. (2006). Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypicum hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey. *Agriculture. Water Management*, 82(1), 63-85.
21. El-Kheir, M. S. A., Kandil, S. A., & Mekki, B. B. (1994). Physiological response of two soybean cultivars grown under stress conditions as affected by CCC treatment. Egypt. *Journal of Physiology Sciences*, 18, 179-200. <https://doi.org/10.3923/ajps.2009.536.543>
22. English, M. (1990). Deficit irrigation. I. Analytical framework *Journal of Irrigation and Drainage*. E-ASCE, 116, 399-412. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1990\)116:3\(399\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:3(399))
23. English, M. J., Musick, J. T., & Murty, V. V. (1990). Deficit Irrigation. In: G.J. Hoffman, T.A. Towell and K.H. Solomon (Eds.) *Management of Farm Irrigation Systems*. St. Joseph, Michigan, United States of America, ASAE.
24. Eshghizadeh, H. R., Zahedi, M., Ashrafi, A., & Khajepour, M. R. (2010). The effect of irrigation regime and plant density on growth and development, leaf moisture content and yield of sweet corn (K.S.C.404). *Journal of Applied Crop Research*, 88, 45-53. (in Persian with English abstract).
25. Eyvazi, A. R., Mohammadi, S. A., Abdollahi, Sh., Hosseini Salkadeh, S. A., & Majidi Heravan, E. (2005). Effect of Soil Salinity on Morpho-Physiological Traits of Ten Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. *Journal of Agricultural Knowledge*, 16(2), 171-184. (in Persian with English abstract)
26. FAO. (2011). Quinoa; An Ancient Crop to Contribute to World Food Security. Regional Office for Latin America and the Caribbean. 63p.
27. FAOSTAT. (2020). <https://www.fao.org/faostat/en/>
28. Fuentes, F., & Bhargava, A. (2011). Morphological analysis of quinoa germplasm grown under lowland desert conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197, 124-134. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00445.x>
29. Garcia, M., Raes, D., & Jacobsen, S. E. (2003). Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agriculture Water Management*, 60, 119-134. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00162-2)
30. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Del Castillo, C., & Buytaert, W. (2006). Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. *Agriculture Forest Meteorology*, 139, 399-412. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.018>
31. Ghasemi Siani, E., Fallah, S., & Tadayyon, A. (2011). Study on Yield and Seed Quality of *Plantago ovata* Forssk., Under Different Nitrogen Treatments and Deficit Irrigation. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 27(3), 517-528. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2011.6392>
32. Ghooshchi, F., Shirani Rad, A. H., Noormohammadi, Gh., & Hadi, H. (2010). Changes in Yield and Seed Yield Components of Rapeseed Cultivars in Optimum and Limited Irrigation Conditions. *Improvement Research (Environmental Stresses in Plant Sciences)*, 2(1), 13-28. (in Persian).
33. Goldhamer, D. A., Salinas, M., Crisosto, C., Day, K. R., Soler, M., & Moriana, A. (2002). Effects of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Horticulturae*, 592, 343-350. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.592.48>
34. Hashemi Dezfouli, A., Koocheki, A., & Banayan, M. (1995). *Maximizing Crop Yields*. Jahad Daneshgahi of Mashhad Press, Mashhad, Iran (in Persian).
35. Hashemi Nia, S. M. (2004). *Water Management in Agriculture*. First Edition. Ferdowsi University of Mashhad Press. Mashhad, Iran. 536 Page. (in Persian).
36. Hassanpour, H., & Niknam, V. (2014). Effect of water deficit stress on growth and antioxidant enzyme activity of *Mentha pulegium* L. at flowering stage. *Journal of Plant Process and Function*, 3(8), 25-34. (in Persian with English abstract).
37. Jackson, M. B. (1993). Are plant hormones involved in root-to-shoot communication? *Advances in Botanical Research*, 19, 103-187.
38. Jacobsen, S. E., Liu, F., & Jensen, C. R. (2009). Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Horticulturae*, 122(2), 281-287.
39. Jakobsen, A. L. (2003). Effects of think aloud on translation speed, revision, and segmentation. *Benjamins Translation Library*, 45, 69-96. <https://doi.org/10.1075/btl.45.08jak>
40. Jamali, S., Goldani, M., & Zaenodin, S. M. (2018). Investigation of the effect of periodic water stress on yield, yield components and water use efficiency of quinoa. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13, 1687-1697.
41. Jayme-Oliveira, A., Ribeiro Júnior, W. Q., Ramos, M. L. G., Ziviani, A. C., & Jakelaitis, A. (2017). Amaranth, quinoa, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(8), 561-571. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000800001>
42. Kafi, A. K. M., Ahmadalinezhad, A., Wang, J., Thomas, D. F., & Chen, A. (2010). Direct growth of nanoporous

- Au and its application in electrochemical biosensing. *Biosensors and Bioelectronics*, 25(11), 2458-2463. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.04.006>
43. Kafi, R., Kwak, H. S. R., Schumacher, W. E., Cho, S., Hanft, V. N., Hamilton, T. A., & Kang, S. (2007). Improvement of naturally aged skin with vitamin A (retinol). *Archives of Dermatology*, 143(5), 606-612. <https://doi.org/10.1001/archderm.143.5.606>
44. Khajepour, F., & Hosseini, S. A. (2012). Citric acid improves growth performance and phosphorus digestibility in Beluga (*Huso huso*) fed diets where soybean meal partly replaced fish meal. *Animal Feed Science and Technology*, 171(1), 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.10.001>
45. Khazaei, H. (2001). Improvement of sugarbeet (*Beta Vulgaris*) seed germination with water treatment.
46. Khazaei, H. (2002). *The effect of drought stress on yield and physiological characteristics of resistant and susceptible wheat cultivars and the introduction of the most appropriate drought resistance indices*. PhD Thesis in Crop Physiology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. <https://doi.org/10.22077/escs.2017.360.1068>
47. Khorshidi, M., Rahimzadeh, B., Mirhadi, M., & Normohamadi, Gh. (2002). Investigation of the effects of drought stress on potato growth stages. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 4(1), 59-48.
48. Koutroubas, S. D., Papakosta, D. K., & Doitsinis, A. (2000). Water requirements for castor oil crop (*Ricinus communis* L.) In a mediterranean climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 14, 33-41. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00357.x>
49. Lavini, A., Pulvento, C., d'Andria, R., Riccardi, M., Choukr, R., Allah, O. Belhabib. (2014). Quinoa's potential in the Mediterranean region. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200, 344-360. <https://doi.org/10.1111/jac.12069>
50. Lugojan, C., & Ciulca, S. (2011). Evaluation of relative water content in winter wheat. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 15(2), 173-177.
51. Matinfar, M., Matinfar, M., Mahjoor, M., Shiranirad, A. H., & Mohammadi, R. (2012). Effect of plant density on yield and yield components of rapeseed varieties (*Brassica napus*) in Qazvin. *Ecophysiology of Farm Crops*, 4(24), 405-414. (in Persian with English abstract).
52. Morgan, J. M. (1977). Changes in diffusive conductance and water potential of wheat plants before and after anthesis. *Australian Journal of Plant Physiology*, 4, 75-86.
53. Nazari Nasi, H., Jabbari, F., Azimi, M. R., & Nowruzian, M. (2012). Evaluation of the effect of drought stress on membrane stability, photosynthesis rate, relative water content and grain yield of four bean cultivars. *Iranian Journal of Crop Science*, 43(3), 499-491. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2012.29045>
54. Oya, T., Nepomuceno, A. L., Neumaier, N., Boucas Farias, J. R., Tobita, S., & Ito, O. (2004). Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. *Plant Production Science*, 7(2), 129-137. <https://doi.org/10.1626/pps.7.129>
55. Prasad, T., & Yadav, D. S. (1990). Effect of irrigation and plant density on yield attributes and yield of green gram and black gram. *Indian Journal of Agronomy*, 35, 99-151.
56. Premachandra, G. S., Saneoka, H., Fujita, K., & Ogata, S. (1992). Leaf water relations, osmotic adjustment, cell membrane stability, epicuticle wax load and growth as affected by increasing deficits in Sorghum. *Journal of Experimental Botany*, 43, 156-176.
57. Rabbani, J., & Emam, Y. (2011). Response of grain yield of corn hybrids to drought stress at different stages of growth. *Journal of Production and Processing of Crop and Horticultural Products*, 1(2), 78-65. <https://doi.org/10.2201.1.22518517.1390.1.2.5.0>
58. Rabbani, J., & Emam, Y. (2011). Yield Response of Maize Hybrids to Drought Stress at Different Growth Stages. *Journal of Crop Production and Processing*, 1(2), 65-78. (in Persian with English abstract).
59. Rao, K. G. (1987). *Water use and irrigation response to defoliated corn with various population*. Available from University Microfilms International 300 N. Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106, Order No. 8706243. Ph.D. Dissertation. 142p, 36 fig, 43 tab, 73 ref, append.
60. Razzaghi, F., Plauborg, F., Jacobsen, S., Jensen, C. R., & Andersen, M. N. (2012). Effect of nitrogen and water availability of three soil types on yield, radiation use efficiency and evapotranspiration in field-grown quinoa. *Agricultural Water Management*, 109, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.02.002>
61. Risi, J., & Galwey, N. W. (1991). Effects of sowing date and sowing rate on plant development and grain yield of quinoa (*Chenopodiumquinoa*) in a temperate environment. *Journal of Agricultural Science*, 117, 325-332. <https://doi.org/10.17557/tjfc.485617>
62. Rushdie, M., Heidari Sharifabad, H., Karimi., Noor Mohammadi, Q., & Dervish, F. (2006). Effects of dehydration stress on yield and grain yield components of sunflower cultivars. *Special Issue of Agricultural Sciences Research*, 12(1), 109-122. <https://doi.org/10.22055/ppd.2022.32122.1862>
63. Sairam, R. K., & Srivastava, G. C. (2001). Water stress tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.): variations in hydrogen peroxide accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186(1), 63-70. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2001.00461.x>

64. Salehi, M., & Dehghani, F. (2019). *Guide to planting, holding and harvesting quinoa in saline conditions*. Ministry of Jihad Agriculture, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Deputy for Extension. 96 pages. <https://doi.org/10.22077/escs.2021.3287.1837>
65. Samadzadeh, A. R., Zamani, Gh., & Fallahi, H. R. (2019). Possibility of quinoa production under South-Khorasan climatic condition as affected by planting densities and sowing dates. *Journal of Agricultural Applied Research*, 33(1), 126.104-82. <https://doi.org/10.22092/aj.2020.125793.1392>
66. Sandha, T. S., Bhllav, H., Chema, S., & Gill, A. (1977). Variability and interrelationship among grain protein yield and yield components in mungbeen. *Indian Journal Agriculture Reserch*, 30, 871-882.
67. Sarmadnia, Gh. H., & Koocheki, E. (1991). *Crop Physiology*. Jehade-Daneshgahi of Mashhad Publication. (in Persian).
68. Sarmadnia, Gh. H., & Kouchaki, A. (1991). *Crop Physiology*, Mashhad University Jihad Publications. 467 p. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100020034x>
69. Sharma, B., Molden, D., & Cook, S. (2015). *Water use efficiency in agriculture: Measurement, current situation and trends*. PP 39-64 in P. Drechsel, P. Heffer, H. Magen, R. Mikkelsen and D. Wichelns eds. Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), Georgia, USA: International Plant Nutrition Institute (IPNI), Horgen, Switzerland: International Potash Institute (IPI). <https://doi.org/10.22004/ag.econ.208411>
70. Shibairo, S. I., Upadhyaya, M. K., & Toivonen, P. M. A. 1998. Influence of prearrest water stress on postharvest moisture loss of carrot (*Daucus carota* L.). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 73, 347-352. <https://doi.org/10.1080/14620316.1998.11510984>
71. Soleimanipour, Sh., Shirani Rad, A. H., Madani, H., Rezaie Zad, A., & Fareghi, Sh., (2009). Study the time effect of irrigation outage on agronomic traits of cultivars of winter rapeseed. *New Findings in Agriculture*, 3(3), 263-274. (in Persian with English abstract).
72. Soleimanpour, S., Shiranirad, A. H., Madani, H., Rezaeizad, A., & Fareghi, S. (2009). Investigation the Effect of Water Deficit on Agronomical Characteristics and Growth Indices of Winter Rapeseed Cultivars. *New Finding in Agriculture*, 3(3), 263-274. (in Persian with English abstract).
73. Spehar, C. R., & Rocha, J. E. S. (2009). Effect of sowing density on plant growth and development of quinoa, genotype 4.5, in the Brazilian savannah highlands. *Bioscience Journal*, 25, 53-58. <https://doi.org/10.22092/sppi.2021.123894>
74. Wilson, H. D., & Heiser, C. B. (1979). The origin and evolutionary relationships of Huauzontle, (*Chenopodium nuttalliae* Safford), domesticated chenopod of Mexico. *American Journal of Botany*, 66(2), 198-206. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1979.tb06215.x>
75. Winter, S. R., Musick, J. T., & Porter, K. B. (1988). Evaluation of Screening Techniques for Breeding Drought – Resistance Winter Wheat. *Crop Science*, 28, 512-516. <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X0028000300018x>
76. Yadav, R., Gayadin, S., & Jaiswal, A. K. (2001). Morpho-physiological changes and variable yield of wheat genotypes under moisture stress conditions. *Indian Journal of Plant Physiology*, 6, 390-394.
77. Yerardi, R. S. (2007). Biobehavioral nicotine dependence in persons with schizophrenia (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
78. Zhang, H., & Oweis, T. (1999). Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agriculture Water Manage*, 38, 195-211. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00069-9)



Quinoa Phenological Development Modeling Based on Field Data

Sh. Eghbali^{1*}, M. Nassiri-Mahallati², M. Jahan², M. Salehi³

Received: 27-01-2022

Revised: 21-05-2022

Accepted: 19-06-2022

How to cite this article:Eghbali, Sh., Nassiri-Mahallati, M., Jahan, M., & Salehi, M., (2023). Quinoa Phenological Development Modeling Based on Field Data. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 47-60. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.74969.1145>

Introduction

Climate change is rapidly degrading the conditions of crop production. For instance, increasing salinization and aridity is forecasted to increase in most parts of the world. As a consequence, new stress-tolerant species and genotypes must be identified and used for future agriculture. Stress-tolerant species exist but are actually underutilized and neglected. Quinoa, scientifically known as *Chenopodium quinoa* Willd. is a member of the Amaranthaceae family. Promoting the cultivation and nutrition of quinoa will diversify food products in the country, sustainable production, increase farmers' incomes and provide part of the community's food needs. Crop simulation models have been used for various studies such as selecting the appropriate cultivar, determining the best planting date, predicting the effect of diversity and climate change on growth. Field research requires a lot of time and money, while computer simulation models can save time and money by conducting extensive experimental simulations.

Materials and Methods

This research was conducted in two regions of Yazd province with 10 separate experiments in the form of a randomized complete block design with 3 replications. Experimental factors included 5 promising modified lines in Yazd Salinity Research Center with Titicaca cultivar. The lines consisted of four intermediate maturity lines, numbered 1 (NSRCQE), 2 (NSRCQC), 3 (NSRCQD), and 6 (NSRCQA), one late maturity line numbered 4 (NSRCQB), and the early maturity cultivar Titicaca numbered 5. Sampling and note-taking were performed regularly, once every three days, in proportion to the progress of the phenological stages of each line. A model based on degree-day-growth was prepared in FST language. In preparing the length table, due to the short day of Quinoa, for all lines in the model up to 12.5 hours, the development rate was one, and after 13.8 hours, the development rate was zero. The base temperature in the model was 2 °C. Then, the model was calibrated and evaluated with data taken from the field.

Results and Discussion

RMSE (CV) coefficient of variation between 7 to 12%, root mean square error (RMSE) between 4.4 to 6.4 days, Wilmot agreement index (d) between 0.99 to 1, model efficiency (ME) between 0.96 to 0.98, the mean deviation from the model (MB) was between 0.05 to 0.08 and the coefficient of determination (R^2) was between 92 % to 98%. These values indicated a good estimate of the day to flowering of quinoa with the model written in FST language, and the values of day to flowering simulated gained the necessary validity. The coefficient of variation of nRMSE (CV) is between 6.8 to 8.6%, the root mean square error (RMSE) is between 6.2 and 8.7 days, the Wilmot agreement index (d) is between 0.75 and 0.92, The mean deviation from the model (MB) was between 0.05 to 0.08 and the coefficient of determination (R^2) was between 92% and 98%. These values indicated a good estimate of the day to physiological maturity with the model written in the FST language, and

1- Ph.D. graduate, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

3- Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

(*- Corresponding Author Email: sh_weed@yahoo.com)

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.74969.1145>

the day values to the simulated physiological maturity gained the necessary validity. Calibration and evaluation of model efficiency using root mean square error (RMSE), coefficient of variation or nRMSE percentage (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), and mean model deviation (MB), coefficient of explanation (R^2), line test 1: 1 day until germination, flowering and good physiological maturity was estimated.

Conclusion

The results of this study indicated that, the quinoa model prepared for quinoa in terms of degree-day-growth well predicts the developmental stages (emergence, flowering and maturation) of this plant in terms of maturity (early, medium and late) and can be its help determined the appropriate planting date in different areas. This calibrated sub-model can now be used to evaluate different temperature and photoperiod effects for decision making in a wide range of growth environments in quinoa cultivation systems in current and future climatic conditions. Therefore, this sub-model can be used in educational-research and applied work in the field.

Keywords: FST, Growing degree days, Sowing date

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص ۶۰-۴۷

شبیه‌سازی نمو فنولوژیک کینوا بر اساس داده‌های مزرعه‌ای

شهاب اقبالی شاه آباد^{۱*}، مهدی نصیری محلاتی^۲، محسن جهان‌پس^۳، معصومه صالحی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

چکیده

هدف از این پژوهش تهیه مدلی برای شبیه‌سازی نمو کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) و واسنجی و تعیین اعتبار آن بر اساس داده‌های مزرعه‌ای است. این تحقیق در دو منطقه استان یزد با ۱۰ آزمایش جداگانه و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. عامل‌های آزمایش شامل ۵ لاین امید بخش اصلاح‌شده در مرکز تحقیقات شوری یزد به همراه رقم تی‌تی‌کاکا بود. نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد. مدلی بر اساس درجه-روز-رشد با زبان برنامه‌نویسی FST تهیه و سپس اقدام به واسنجی و ارزیابی مدل با داده‌های برداشت شده از مزرعه شد. واسنجی و ارزیابی کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، آزمون خط ۱:۱ روز تا سبز شدن، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک خوب برآورد شد. این مدل تعیین اعتبار شده و هم‌اکنون می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات مختلف دمایی و فتوپریودی برای تصمیم‌گیری در طیف وسیعی از محیط‌های رشد در نظام‌های کشت کینوا در شرایط اقلیمی جاری و آینده مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین از این مدل در کارهای آموزشی-تحقیقاتی و کاربردی در مزرعه می‌توان استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، FST، درجه-روز-رشد

مقدمه

است (Yang et al., 2016). محصول اصلی این گیاه دانه است که ارزش غذایی بالایی از نظر پروتئین، توازن اسیدآمینه، چربی غیراشباع، ویتامین‌ها و مواد معدنی دارد (Fischer et al., 2017). بنابر گزارش‌های سازمان خواروبار جهانی این گیاه حتی در اراضی فقیر و غیرقابل کشت نیز می‌توان کشت کرد. علاوه بر این کشت کینوا در تناوب زراعی با غلات به منظور کنترل علف‌های هرز و بیماری‌ها توصیه می‌شود. ترویج کشت و تغذیه کینوا باعث تنوع‌بخشی محصولات غذایی در کشور، تولید پایدار، افزایش درآمد کشاورزان و تأمین بخشی از نیاز غذای جامعه خواهد شد. با توجه به نقش بالقوه این گیاه در بهبود امنیت غذایی در آینده و تحمل بالا به تنش‌های شوری و خشکی سازمان خوار و بار جهانی سال ۲۰۱۳ را به نام این گیاه نام‌گذاری کرد (FAO, 2014).

مدل ریاضی، معادله یا مجموعه‌ای از معادلات است که رفتار هر سیستم را به‌طور کمی توصیف می‌کند. سیستم، به بخش محدودی از جهان واقعی اطلاق می‌شود که شامل بخش‌هایی است که اثرات متقابل با هم داشته و در طی زمان تغییر می‌کند. از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب، تعیین خصوصیات مطلوب گیاهی، تعیین بهترین

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) گیاهی از خانواده *Amaranthaceae* است که بومی کوه‌های آند در بولیوی، شیلی و پرو بوده و در حال حاضر بولیوی، پرو و اکوادور مهم‌ترین تولیدکنندگان این گیاه هستند (Vega - Gálvez et al., 2010). این گیاه انعطاف‌پذیری بالایی در سازگاری به فتوپریود، ارتفاع از سطح دریا، دما و خصوصیات خاک دارد؛ به‌طوری‌که، در مناطقی با ارتفاع ۴۰۰۰-۰ متر از سطح دریا، pH بین ۶ تا ۸/۵ و مناطقی با اقلیم خشک، نیمه‌خشک، حاره‌ای و مرطوب قابلیت کشت دارد. دوره رشد کینوا بسته به منطقه و نوع رقم مورد کشت بین ۷۰ تا ۲۴۰ روز متغیر

۱- دانش‌آموخته دکتری اگرولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه اگرولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استادیار مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: sh_weed@yahoo.com)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.74969.1145>

مورفولوژیک با نوع گیاه تغییر می‌کند، کمی کردن نمو فنولوژیک در کلیه مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی لازم است (Soltani et al., 2006). گیاه کینوا بعد از گرده‌افشانی، وارد فاز شیرینی یا خمیری و رسیدگی‌دانه می‌شود. با پرشدن دانه کاسبرگ‌ها باز می‌شوند و به‌صورت ستاره‌ای درمی‌آیند و رنگ پوسته بیرونی بذر مشخص می‌شود.

برخی محققین مدل‌سازی پاسخ گل‌دهی ۹ رقم کینوا به دما و فتوپریود را با رگرسیون خطی انجام دادند. ابتدا اثر دما و فتوپریود را جداگانه مورد بررسی قرار دادند و فتوپریود آستانه، فتوپریود بحرانی، دمای پایه و دمای بهینه گل‌دهی را شبیه‌سازی کردند و سپس از پارامترهای به‌دست آمده برای مدل‌سازی اثر متقابل دما و فتوپریود استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند بدون اثر متقابل دما و فتوپریود زمانی که دما بالاتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود مدل نمی‌توانست زمان گل‌دهی را خوب پیش‌بینی نماید. همچنین بدون اثر متقابل، در دوره رویشی ارقام کینوا، فتوپریود با عرض جغرافیایی منشا رقم رابطه منفی و با مدت زمان رشد رویشی رقم رابطه مثبت داشت. در بررسی اثر متقابل، پارامترهای پاسخ دما و فتوپریود با عرض جغرافیایی منشا رقم اثر معنی‌دار نداشت (Bertero, 1999b).

نتایج آزمایشی در کرج نشان داد که کلیه ژنوتیپ‌های کینوا مورد ارزیابی برای کشت بهاره در این منطقه سازگاری داشتند. کشت در نیمه دوم اردیبهشت سال ۱۳۹۷ باعث مصادف شدن مرحله گرده‌افشانی و پرشدن دانه با دمای بالای هوا در تیرماه و مردادماه شده و باعث کاهش عملکرد دانه و اجزای عملکرد شد. رسیدگی‌دانه‌های کینوا در ماه‌های مرداد و شهریور، به دلیل کمبود غذای کافی برای پرندگان در این مقطع زمانی، خسارت هجوم پرندگان را در پی داشت (Abasi et al., 2018).

مدل فنولوژی، زمان وقوع یک فرآیند خاص در طی نمو پیش‌بینی می‌کند. به منظور مدیریت آفات، تنظیم برنامه آبیاری و برخی دیگر از مسائل دوران کاشت گیاه لازم است سرعت رشد و نمو گیاه تعیین شود. سرعت نمو گیاهان زراعی از زمان کاشت تا زمان رسیدگی، شدیداً وابسته به دمای محیطی است که این گیاهان با آن مواجه می‌شوند. از آنجا که شرایط آب و هوایی در طول سال‌های مختلف بسیار متنوع است، بنابراین تاریخ‌های تقویمی نمی‌توانند مبنای خوبی جهت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در رابطه با موجودات و مراحل رشد و نمو آن‌ها باشند. بدین ترتیب با اندازه‌گیری مقدار گرمای تجمع‌یافته در طی زمان، یک قیاس زمانی فیزیولوژیک به‌دست می‌آید که از نظر معیارهای زیست‌شناختی از دقت بیشتری نسبت به تاریخ تقویمی برخوردار است و این معیار در گیاهان مختلف به نوع گیاه بستگی داشته و در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت است. برای محاسبه واحدهای گرمایی از روش درجه-روز-رشد یا GDD استفاده می‌شود. درجه-روز-رشد مجموع میانگین درجه حرارت بالاتر

مدیریت زراعی، پیش‌بینی اثر تنوع و تغییر اقلیم بر رشد، تخمین عملکرد، برآورد ظرفیت تولید منطقه‌ای، تعیین خط‌مشی برای به‌نژادی، تعیین اولویت‌های تحقیقاتی و انتقال تکنولوژی طبقه‌بندی آگرواکولوژیک استفاده شده است. اجرای تحقیقات مزرعه‌ای به صرف وقت و هزینه زیاد نیاز دارد در حالی که مدل‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌تواند با انجام شبیه‌سازی آزمایش‌های وسیع باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه شوند (Matthews et al., 2013). اما باید توجه داشت که مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به هیچ‌وجه نمی‌توانند جایگزین آزمایشات مزرعه‌ای شوند بلکه بهترین حالت آن است که به‌عنوان مکمل این آزمایش‌ها استفاده شوند. در این صورت مدل‌های گیاهان زراعی خواهند توانست تا حدودی نیاز به آزمایشات مزرعه را کاهش دهند و اثربخشی نتایج این آزمایش‌ها را بیشتر کنند. مدل‌سازی در آموزش‌های کاربردی برای محققین، دانشجویان، کارشناسان کشاورزی و حتی بهره‌برداران، ضمن کاهش هزینه‌ها موجب شناخت و درک بهتر استفاده‌کنندگان از فرایندهای پیچیده زیستی، فیزیولوژی و اکولوژی گیاهان زراعی خواهد شد؛ تا به حال مدل‌های متفاوتی برای پیش‌بینی فنولوژی گیاهان زراعی مختلف استفاده شده است (Rahban et al., 2021; Bertero et al., 1999; Soltani et al., 2006).

تاریخ کاشت، نسبت به سایر روش‌های مدیریت زراعی بیشترین تأثیر را بر ویژگی‌های فنولوژیکی و رشدی گیاهان می‌گذارد (Pourghasemian et al., 2018) و نقش مهمی در بهبود درصد سبز و رسیدن به حداکثر عملکرد دارد. تاریخ کشت مناسب کینوا به اقلیم منطقه و رقم بستگی دارد. ارقام زودرس کینوا برای کشت در شهریور و یا کشت بهاره، ارقام متوسط‌ارس کینوا برای کشت در مرداد و یا کشت تابستانه، ارقام دیررس کینوا برای کشت در اسفند و یا کشت تابستانه در مناطق معتدل خشک کشور مناسب هستند (Eghbali et al., 2021). این ارقام در مناطق معتدله در صورتی که در مرحله ۱۲ برگ باشند در طول زمستان زنده می‌مانند ولی بذر تولید نمی‌کنند (Salehi, & Dehghani, 2017). تعیین مناسب‌ترین تاریخ کاشت یعنی تعیین زمانی که رشد رویشی و زایشی گیاه بیشترین هماهنگی را با عوامل اقلیمی داشته و گیاه کمتر با شرایط نامساعد محیطی روبه‌رو شود (Qulipor et al., 2003).

پیش‌بینی صحیح مراحل فنولوژی گیاهان زراعی برای بهینه‌سازی فعالیت‌های مدیریتی در مزرعه و سازگاری بهتر تقویم زراعی با سیستم‌های آگرواکولوژیک خاص بسیار مهم می‌باشد (Hirich et al., 2014). جوانه‌زنی و سبز شدن از مهم‌ترین فازهای فنولوژیکی استقرار گیاه است. جوانه‌زنی بذر فرایند پیچیده‌ای از فرایندها و واکنش‌ها می‌باشد که همگی تحت تأثیر دما انجام می‌شود. مهم‌ترین مرحله فنولوژیک، مرحله گل‌دهی یعنی عبور گیاه از مرحله رویشی به زایشی است. با توجه به این که بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیک و

از دمای پایه است. اقلیم و رقم مورد استفاده به لحاظ طول دوره رسیدگی (زودرس، متوسط‌رس و دیررس) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در دو منطقه از استان یزد (شهر یزد به‌عنوان منطقه ۱ و روستای ارنان به‌عنوان منطقه ۲) با ارتفاع متفاوت (اختلاف ارتفاع از سطح دریا ۸۰۰ متر) طبق زمان‌بندی جدول ۱ اجرا شد. آزمایش اول در مزرعه شخصی کشاورزی در شهر یزد با طول و عرض جغرافیایی $31^{\circ}55'$ و $54^{\circ}21'$ و ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد و آزمایش دوم در مزرعه شخصی کشاورزی در روستای ارنان یزد با طول و عرض جغرافیایی $31^{\circ}17'$ و $54^{\circ}14'$ و ارتفاع ۲۰۰۰ متر از سطح دریا در همان سال زراعی اجرا شد. نکته قابل توجه در تفاوت اقلیم دو منطقه یعنی اختلاف حداقل دماهای این دو ناحیه بین ۸ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد و اختلاف حداکثر دماهای آن‌ها بین ۵ تا ۷ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱).

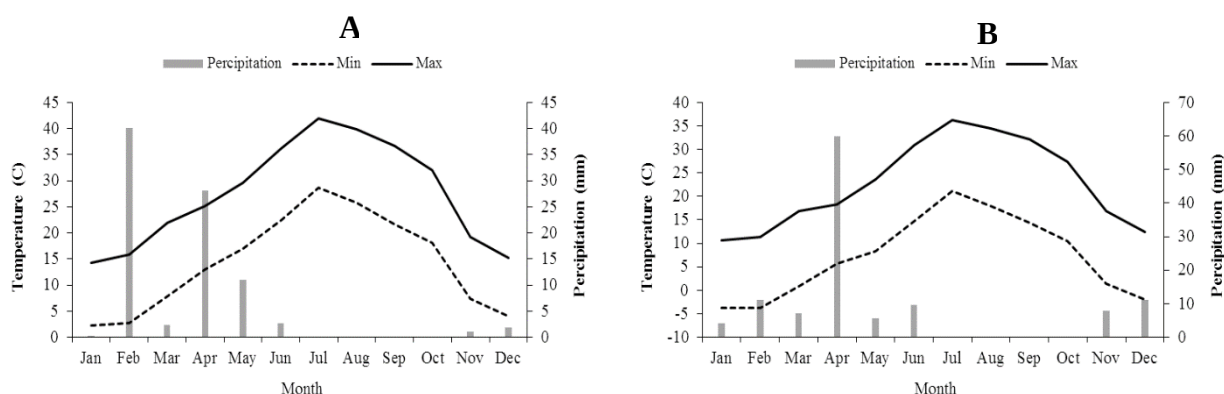
زمان حرارتی مورد نیاز برای تکمیل نمو کینوا در تاریخ‌های کاشت مختلف بین ۲۶۶۳ تا ۱۸۹۳ درجه روز گزارش کردند. دامنه تغییرات این زمان برای دوره سبز شدن بین ۸۳ تا ۱۵۰، مرحله غنچه‌دهی بین ۴۷۷ تا ۶۵۶، مرحله گرده‌افشانی ۳۴۸ تا ۸۹۰ و مرحله رسیدگی فیزیولوژیک ۱۴۳ تا ۱۱۲۱ درجه روز برآورد شد (Salehi et al., 2019).

مدل‌های شبیه‌سازی نمو در دو گروه هستند، برخی مراحل نمو را بر اساس سرعت نمو که خود تابع دمای روزانه است شبیه‌سازی می‌کنند و گروه دیگر پیشرفت نمو را بر اساس درجه روزهای تجمعی پیش‌بینی می‌کنند (Nassiri et al., 2000)؛ که مدل تهیه شده در این تحقیق از نوع دوم است. شبیه‌سازی نمو بخش مهمی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان از جمله کینوا است و تهیه، واسنجی و اعتبارسنجی چنین زیر مدل‌هایی برای ساخت مدل کامل شبیه‌سازی رشد کینوا ضروری می‌باشد. هدف از این تحقیق تهیه زیرمدلی کاربردی برای تعیین بهترین تاریخ کاشت گیاه کینوا بسته به نوع

جدول ۱- تاریخ‌های کاشت در دو محل آزمایش

Table 1- Planting dates of the test sites

Resources	March فروردین	April اردیبهشت	May خرداد	June تیر	July مرداد	August اول شهریور	September نیمه شهریور	September مهر	January بهمن	February اسفند
Yazd date of planting تاریخ کاشت منطقه یزد	29	29	28	28	26	23	6	20	29	29
Ernan date of planting تاریخ کاشت منطقه ارنان	30	5 may	29	30	24	19	12	-	-	28



شکل ۱- خلاصه آمار هواشناسی شهر یزد (A) و روستای ارنان (B) در زمان آزمایش

Figure 1- Summary of meteorological statistics of Yazd city (A) and Arnan village (B) at the time of the experiment

انجام شد. عامل‌های آزمایشی شامل ۵ لاین امید بخش اصلاح‌شده در مرکز تحقیقات شوری یزد به‌همراه رقم تی‌تی‌کاکا بود. لاین‌ها

تاریخ کاشت‌های این تحقیق در ۱۰ آزمایش جداگانه برای هر دو منطقه و در قالب آزمایش طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار

شامل چهار لاین متوسط‌طرس که در این آزمایش با شماره‌های ۱) (NSRCQE)، ۲) (NSRCQC)، ۳) (NSRCQD) و ۴) (NSRCQA)، یک لاین دیررس که با شماره ۴ (NSRCQB) و رقم زودرس تی‌تی‌کا که با شماره ۵ مشخص شده بود. ۳ ماه آبان، آذر و دی در یزد و ۴ ماه آبان، آذر، دی و بهمن در روستای ارنا به دلیل سرمای زیاد، تاریخ کاشتی انجام نشد. از آنجایی که تاریخ کاشت اصلی گیاه کینوا در منطقه یزد، شهر یور است (Salehi et al., 2019)، بنابراین دو تاریخ کاشت در شهر یور (نیمه اول و نیمه دوم شهریور) اجرا شد. کاشت، به روش خشکه‌کاری در کرت‌هایی به ابعاد ۳*۳ متر، با دست، به روش خطی و در عمق یک تا دو سانتی‌متری انجام شد و بلافاصله بعد از کاشت به صورت غرقابی آبیاری شد. بعد از سبز شدن، تراکم بوته به ۶۴ بوته در مترمربع رسید.

داده‌های هواشناسی از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل کشت تهیه شد. ایستگاه هواشناسی یزد واقع در فرودگاه شهر یزد با طول و عرض جغرافیایی ۳۱°۵۴' و ۵۴°۱۶' است و روستای ارنا به دلیل نداشتن ایستگاه هواشناسی از داده‌های ایستگاه هواشناسی روستای گاریز واقع در ۸ کیلومتری این روستا با طول و عرض جغرافیایی ۳۱°۱۸' و ۵۴°۰۶' استفاده شد.

نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد (Salehi et al., 2019). یادداشت‌برداری مراحل فنولوژیک، مشاهده بوته‌های دو ردیف از وسط هر کرت در طول دو متر بود. ملاک عمل یادداشت‌برداری هر مرحله از نمو (سبز شدن، گل‌دهی و تغییر رنگ

بوته‌ها)، ۵۰ درصد بوته‌های مورد بررسی بود.

محاسبات آماری با کمک نرم‌افزار EXCEL 2010 انجام شد و تمامی نمودارها نیز در محیط EXCEL 2010 ترسیم شدند.

برای محاسبه درجه-روز-رشد از روابط (۱)، (۲) و (۳) استفاده شد.

$$TMP = (T_{max} + T_{min}) / 2 \quad (1)$$

$$DTT_i = TMP_i - T_b \quad (2)$$

$$TT_i = TTT_i - 1 + DTT_i \quad (3)$$

که در این معادلات TMP میانگین دمای روزانه، T_{max} حداکثر دمای روزانه، T_{min} حداقل دمای روزانه، T_b دمای پایه، DTT درجه روز رشد روزانه، TT درجه روز رشد تجمعی، i روز مورد نظر برای محاسبه روز i ام و $i-1$ روز قبل از آن هستند (Soltani et al., 2006).

برای به‌دست آوردن پایه اطلاعات درجه-روز-رشد ابتدا درجه-روز-رشد محاسبه شده برای لاین‌های کینوا به سه گروه زودرس، متوسط‌طرس و دیررس دسته‌بندی شد و میانه داده‌های درجه-روز-رشد هر گروه در جدول قرار داده شد (جدول ۲). پس از محاسبه طول‌روزهای ویژه لاین‌های کینوا اقدام به تهیه زیرمدل با زبان برنامه‌نویسی FST شد. در تهیه جدول طول‌روز با توجه به روز کوتاه بودن کینوا، برای تمام لاین‌ها در مدل تا ۱۲/۵ ساعت سرعت نمو یک و بعد از ۱۳/۸ ساعت سرعت نمو صفر در نظر گرفته شد. دمای پایه در مدل دو درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد (Eghbali et al., 2021).

جدول ۲- میانه درجه-روز-رشد لاین‌های کینوا برای نمو کینوا

Table 2- Mean degree-day-growth of quinoa lines

مراحل نمو Developmental stages	پارامتر درجه-روز-رشد لاین‌های کینوا Growing degree day of quinoa lines					
	زودرس Early maturity		متوسط‌طرس Medium maturity		دیررس Late maturity	
	۱ ماهه نخست The first 6 months	۱ ماهه دوم The second 6 months	۱ ماهه نخست The first 6 months	۱ ماهه دوم The second 6 months	۱ ماهه نخست The first 6 months	۱ ماهه دوم The second 6 months
	۱ ماهه نخست The first 6 months	۱ ماهه دوم The second 6 months	۱ ماهه نخست The first 6 months	۱ ماهه دوم The second 6 months	۱ ماهه نخست The first 6 months	۱ ماهه دوم The second 6 months
سبز شدن Emergence day	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5
گل‌دهی Anthesis day	1072.7	1072.7	1155.5	1155.5	1333.8	1333.8
رسیدگی فیزیولوژیک Physiological Maturity	1577.3	1577.3	17675.5	1767.5	2357	2357

آذر) تشکیل گردید (Eghbali et al., 2021). بعد از تهیه زیرمدل نمو اقدام به واسنجی یا کالیبراسیون آن شد. برای کالیبراسیون، زیرمدل تهیه شده بارها و در هر بار شش دفعه اجرا شد (سه گروه زودرس،

با توجه به تفاوت زیاد داده‌های درجه-روز-رشد ۶ ماهه اول سال میلادی با شش ماهه دوم، برای هر گروه از لاین‌های کینوا ۲ جدول درجه-روز-رشد ۶ ماهه اول (از دی تا خرداد) و ۶ ماهه دوم (از تیر تا

RMSE جهت مقایسه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده استفاده شده است که هرچه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده آن است که شبیه‌سازی بهتر انجام شده است. چنانچه مقدار nRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف ارزیابی خواهد شد (Nassiri et al., 2019). هرچه مقدار d به‌دست آمده توسط مدل به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است میزان پیش‌بینی صفت را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده شده انجام دهد (Willmott, 1982). بهترین حالت MB صفر است و هرچه از صفر کمتر باشد یعنی مدل کمتر از واقعیت و هرچه از صفر بزرگ‌تر باشد یعنی مدل بیشتر از واقعیت تخمین می‌زند. شاخص کارایی مدل ME، بین صفر و یک خوب است و بهترین حالت عدد یک است و بدترین حالت، زمانی که منفی باشد.

متوسط‌رس و دیررس و برای هر گروه دو دفعه شش ماهه اول و شش ماهه دوم سال) و خروجی آن با اندازه‌گیری‌های شهر یزد مقایسه شد. در صورت لزوم تغییراتی در داده‌های جدول درجه-روز-رشد مدل داده شد و دوباره مدل اجرا گردید تا بهترین خروجی و نزدیک‌ترین داده به مقدار اندازه‌گیری به‌دست آمد که به‌عنوان برآورد نهایی پارامتر جدول انتخاب شد. در این مطالعه تمامی دستورات زیرمدل به زبان FST تبدیل شد (شکل ۲).

در نهایت ارزیابی زیرمدل با داده‌های روستای ارنان و بر اساس پارامترهای برآورد شده در واسنجی انجام شد.

برای واسنجی و ارزیابی کارایی زیرمدل از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، آزمون خط ۱:۱ روز تا سبزشدن، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک استفاده شد.

```
TITLE DEVELOPMENT WITH TEMPERATURE SUM
INITIAL
INCON ZERO= 0.
INCON ITSUM = 0.
CONSTANT PI = 3.1416
PARAM LATD = 35.
RAD = PI/180.
SINLAT = SIN (RAD*LATD)
COSLAT = COS (RAD*LATD)
SINDCM = SIN (RAD*23.45)
TRANSLATION_GENERAL DRIVER = 'EUDRIV'
*TIMER STTIME = 220., FINTIM = 1000., DELT = 1., PRDEL = 5.
TIMER STTIME = 263., FINTIM = 365., DELT = 1., PRDEL = 1.
PARAM TB = 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1072.75, 1., 1770.0, 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1155.55, 1., 2324.5, 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1333.85, 1., 2546.0, 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 872.75, 1., 1317.7, 2.
*FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1055.55, 1., 1790.5, 2.
FUNCTION STAGET = 0., 0., 92.55, 0., 1246.00, 1., 1860.0, 2.
FUNCTION PF2TB = 0., 1., 12.5, 1., 13.8, 0., 16.5, 0.
FINISH STAGE>2.
*PRINT TSUM, STAGE, DAYL, PF
PRINT TMMX, TMMN, DAYL, TA, TSUM, STAGE, PF
WEATHER WTRDIR='C:\WEATHER\';CNTR='NL';ISTN=1;IYEAR=2008

DYNAMIC
DATE = AMOD (TIME, 365.)
TA = 0.5 * (TMMX+TMMN)
TSUM = INTGRL (ITSUM, RTSUM)
RTSUM = MAX(0., TA-TB)
STAGE = AFGEN (STAGET, TSUM)
PF = INSW(DAYL-13.8, AFGEN(PF2TB, DAYL), 0.)

*CALCULATION OF DAY LENGTH|

SINDEC = -SINDCM*COS(2.*PI*(TIME+10.)/365.)
COSDEC = SQRT(1.-SINDEC*SINDEC)
A = SINLAT*SINDEC
B = COSLAT*COSDEC
DAYL = 12.*(1.+(2./PI)*ASIN(A/B))
END
```

شکل ۲- دستورات زیرمدل نمو کینوا به زبان برنامه‌نویسی FST بر اساس درجه-روز-رشد

Figure 2- Quinoa development model commands in FST language based on Growing Degree Day (GDD)

ضرایب رگرسیون ساده خطی (a و b) بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی، ضرایب a و b به‌ترتیب نشان‌دهنده مقدار انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات و مقدار شیب خط رگرسیون از خط ۱:۱ می‌باشند. اگر نقاط پیش‌بینی شده روی خط ۱:۱ قرار گیرند، نشان‌دهنده ایده‌آل بودن مدل است. خط ۱:۱ دارای عرض از مبدأ صفر (a=0) و شیب ۴۵ درجه (b=1) است (Nassiri et al., 2019).

نتایج و بحث

زیرمدل تهیه شده به زبان FST برای پیش‌بینی سه مرحله اصلی نمو لاین‌های کینوا (سبز شدن، گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیک) در سه

جدول ۳- مقادیر درجه-روز-رشد لاین‌های کینوا بعد از واسنجی زیرمدل نمو کینوا

Table 3- Growing Degree Day (GDD) values of quinoa lines after calibration of quinoa model

مراحل نمو Developmental stages	پارامتر درجه-روز-رشد لاین‌های کینوا Growing degree day of quinoa lines					
	زودرس Early maturity		متوسط‌رس Medium maturity		دیررس Late maturity	
	۶ ماهه نخست The first 6 months		۶ ماهه دوم The second 6 months		۶ ماهه نخست The first 6 months	
	۶ ماهه دوم The second 6 months		۶ ماهه نخست The first 6 months		۶ ماهه دوم The second 6 months	
سبز شدن Emergence day	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5
گل‌دهی Anthesis day	1072.7	872.7	1155.5	1055.5	1333.8	1246
رسیدگی فیزیولوژیک Physiological Maturity	1770	1317.7	2324.5	1790.5	2546	1860

از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مراحل نمو دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در رقم زودرس ۸۶ درصد و در لاین‌های دیررس ۹۳ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی‌شده تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی، به‌وسیله تغییرات در مقادیر مشاهده‌شده تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی کینوا قابل توضیح است (شکل ۳).

بر اساس شاخص میانگین انحراف از مدل (MB)، تطابق داده‌های شبیه‌سازی‌شده روز تا گل‌دهی با مقادیر مشاهده‌شده در لاین دیررس کینوا بهتر از سایر لاین‌ها اجرا شد (شکل ۳).

در بررسی شاخص کارایی مدل (ME)، در تمامی موارد مثبت شد بنابراین مدل در شبیه‌سازی روز تا گل‌دهی قابل‌قبول است. بهترین حالت شاخص کارایی مدل ($ME=0.76$) در لاین‌های متوسط‌رس محاسبه شد زیرا در این شاخص هرچه عدد به یک نزدیک‌تر باشد خطای شبیه‌سازی، کمتر است (شکل ۳).

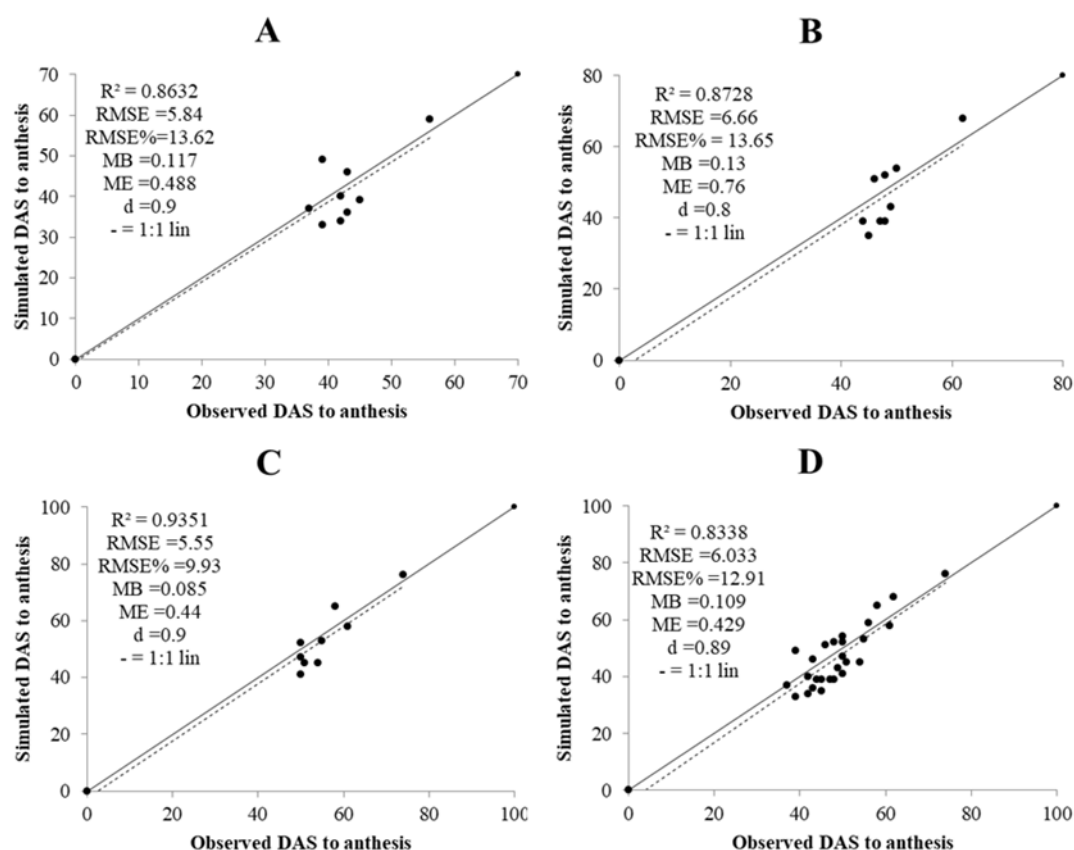
بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.9$) در رقم زودرس تی‌تی‌کاکا و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.8$) در

نتایج اجرای زیرمدل تهیه شده به زبان FST و مقدار شاخص‌های آماری برای تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی در شکل ۳ ارائه شده است. برای تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی بر اساس این نتایج، مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه ۵/۵ تا ۶/۵ روز، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV) در دامنه ۹/۵ تا ۱۳/۵ درصد، شاخص توافق ویلموت (d) در دامنه ۰/۸ تا ۰/۹، کارایی مدل (ME) در دامنه ۰/۴۳ تا ۰/۷۶، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه ۰/۰۹ تا ۰/۱۳ و ضریب تبیین (R^2) در دامنه ۰/۸۳ تا ۰/۹۳ قرار گرفت. بنابراین مرحله گل‌دهی بسیار خوب تخمین زده شده است. نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۳).

در بررسی تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی، بزرگ‌ترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین‌های دیررس ($R^2=0.93$) و کوچک‌ترین ضریب تبیین در رقم زودرس ($R^2=0.86$) به‌دست آمد. این امر نشان

تحقیقی دیگر نتایج واسنجی تعداد روز تا گل‌دهی، توسط پراگر و همکاران با مدل CSM-CROPGRO برای دو رقم جسی و زنو کینوا در آلمان نشان دادند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۳/۱ روز و شاخص توافق ویلموت (d) ۰/۹۸ برای هر دو رقم به‌دست آوردند که به نتایج این تحقیق نزدیک است (Prager et al., 2019).

لاین‌های متوسط‌ترس محاسبه شد که نشان از شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا گل‌دهی، در تمامی لاین‌های کینوا است (شکل ۳). نتایج واسنجی تعداد روز تا گل‌دهی با مدل‌های تجربی، در دما و طول‌روزهای متفاوت برای کینوا نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۷/۲ تا ۷/۸ روز و ضریب تبیین (R^2) ۰/۷۹ تا ۰/۸۵ به‌دست آمد. در بررسی شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (Bertero et al., 1999a). در



شکل ۳- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده روز تا گل‌دهی منطقه یزد در رقم زودرس (A)، لاین‌های متوسط‌ترس (B)، لاین دیررس (C) و لاین‌های کینوا (D) به همراه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، خط 1:1 (صاف) و خط رگرسیون (بریده)

Figure 3- Observed and simulated values of days to flowering of Yazd region in early cultivar (A), medium maturity lines (B), late maturity line (C) and quinoa lines (D) with root mean square error (RMSE), coefficient of variation NRMSE (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), mean model deviation (MB), coefficient of determination (R^2), line 1: 1 (smooth) and regression line (cut)

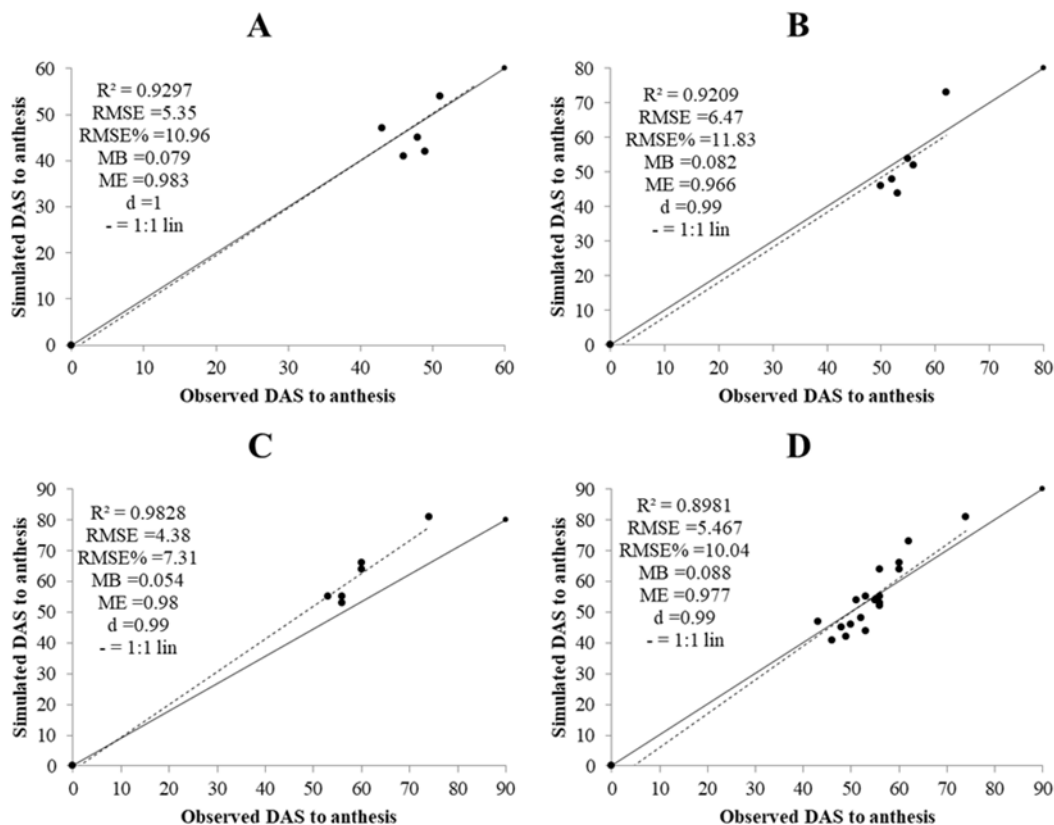
جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۴/۴ تا ۶/۴ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین ۰/۹۹ تا ۱، کارایی مدل (ME) بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۸، میانگین انحراف از مدل (MB) بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۸ و ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب

به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی زیرمدل تهیه شده، داده‌های روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV) بین ۷ تا ۱۲ درصد،

طول‌روزهای متفاوت برای کینوا نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۴/۵ تا ۴/۹ روز و ضریب تبیین (R^2) ۰/۸۵ تا ۰/۸۷ به‌دست آمد. در بررسی شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (Bertero et al., 1999a). محققین دیگر نتایج ارزیابی تعداد روز تا گل‌دهی با مدل CSM-CROPGRO برای دو رقم جسی و زنو کینوا در آلمان نشان دادند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱/۵ روز و شاخص توافق ویلموت (d) ۰/۹۹۷ برای هر دو رقم به‌دست آوردند که به نتایج این تحقیق نزدیک است (Prager et al., 2019).

روز تا گل‌دهی کینوا با زیرمدل نوشته شده به زبان FST داشت و مقادیر روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (شکل ۴).

مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده با خط ۱:۱ در مورد روز تا گل‌دهی کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت؛ بنابراین زیرمدل واستجی‌شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا گل‌دهی کینوا برخوردار بود. نتایج ارزیابی تعداد روز تا گل‌دهی با مدل‌های تجربی در دما و



شکل ۴- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده روز تا گل‌دهی منطقه ارنان در رقم زودرس (A)، لاین‌های متوسط‌رس (B)، لاین دیررس (C) و لاین‌های کینوا (D) به همراه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، خط ۱:۱ (صاف) و خط رگرسیون (بریده)

Figure 4- Observed and simulated values of days to flowering of Arnan region in early cultivar (A), medium maturity lines (B), late maturity line (C) and quinoa lines (D) with root mean square error (RMSE), coefficient of variation nRMSE (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), mean model deviation (MB), coefficient of determination (R^2), line 1: 1 (smooth) and regression line (cut)

تا ۱۴ درصد، شاخص توافق ویلموت (d) در دامنه ۰/۶۶ تا ۰/۶۸، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه ۰/۰۹ تا ۰/۱۱ و ضریب تبیین (R^2) در دامنه ۰/۸۸ تا ۰/۹۱ قرار گرفت؛ بنابراین مرحله رسیدگی فیزیولوژیک بسیار خوب تخمین زده شده است. نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که

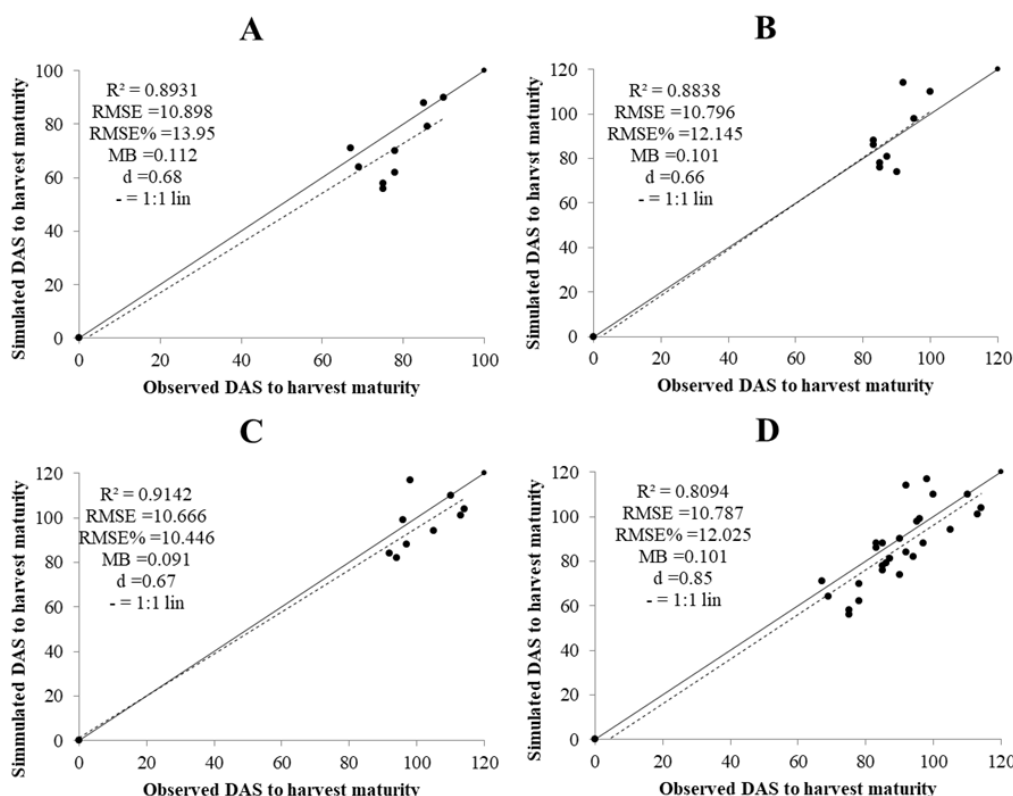
مقایسه نتایج زیرمدل با داده‌های اندازه‌گیری شده و مقدار شاخص‌های آماری برای تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در شکل ۵ ارائه شده است. برای تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک بر اساس این نتایج مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه ۱۰/۶ تا ۱۰/۹ روز، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV) در دامنه ۱۰/۵

تی‌تی‌کاکا و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.66$) در لاین‌های متوسط‌سرس محاسبه شد که نشان از شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در تمامی لاین‌های کینوا است (شکل ۵).

نتایج واسنجی تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک پراگر و همکاران با مدل CSM-CROPGRO برای دو رقم جسی و زنو کینوا در آلمان نشان دادند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۷ روز و شاخص توافق ویلموت (d) ۰/۸۹۵ برای هر دو رقم به‌دست آوردند که به نتایج این تحقیق نزدیک است. پیش‌بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نمو گیاهان اهمیت زیادی دارد چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حدود زیادی تحت تاثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می باشد. به همین ترتیب، ممکن است پیش‌بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرآیندها به پیش‌بینی نمو فنولوژیک وابسته باشند (Soltani et al., 2006).

شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۵).

در بررسی تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، بزرگ‌ترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین‌های دیررس ($R^2=0.91$) و کوچک‌ترین ضریب تبیین در لاین‌های متوسط‌سرس ($R^2=0.88$) به‌دست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مراحل نمو دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در لاین‌های متوسط‌سرس ۸۸ درصد و در لاین‌های دیررس ۹۱ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی شده تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، به‌وسیله تغییرات در مقادیر مشاهده‌شده تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا قابل توضیح است (شکل ۵). بر اساس شاخص میانگین انحراف از مدل (MB) تطابق داده‌های شبیه‌سازی‌شده روز تا رسیدگی فیزیولوژیک با مقادیر مشاهده‌شده در لاین دیررس کینوا بهتر از سایر لاین‌ها اجرا شد (شکل ۵). بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.68$) در رقم زودرس



شکل ۵- مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده روز تا رسیدگی فیزیولوژیک منطقه یزد در رقم زودرس (A)، لاین‌های متوسط‌سرس (B)، لاین دیررس (C) و لاین‌های کینوا (D) به همراه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، خط ۱:۱ (صاف) و خط رگرسیون (بریده)

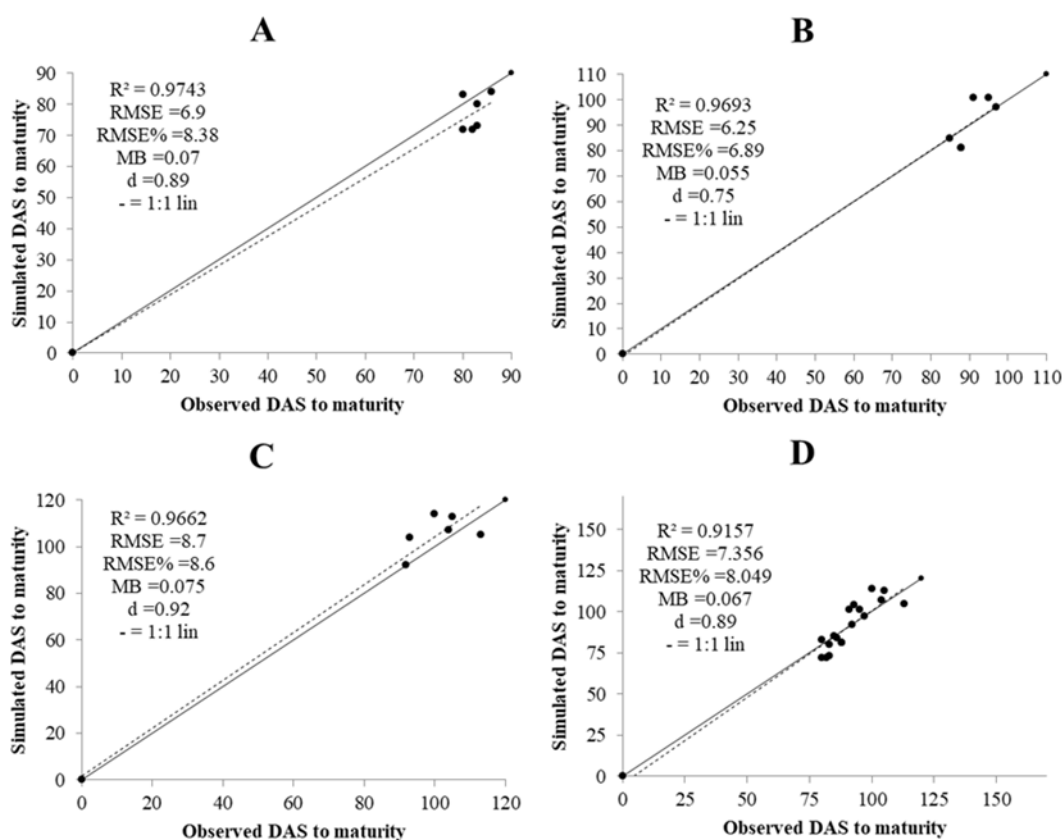
Figure 5- Observed and simulated values of days to physiological maturity of Yazd region in early cultivar (A), medium maturity lines (B), late maturity line (C) and quinoa lines (D) with root mean square error (RMSE), coefficient of variation nRMSE (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), mean model deviation (MB), coefficient of determination (R^2), line 1:1 (smooth) and regression line (cut)

مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده با خط ۱:۱ در مورد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت؛ بنابراین زیرمدل واسنجی شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا برخوردار بود.

نتایج ارزیابی تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک سایر محققین با مدل CSM-CROPGRO برای دو رقم جسی و زنو کینوا در آلمان نشان دادند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۷ روز و شاخص توافق ویلموت (d) ۰/۸۹۵ برای هر دو رقم به‌دست آوردند که به نتایج این تحقیق نزدیک است (Prager et al., 2019).

به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی زیرمدل تهیه شده، داده‌های روز تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت.

ضریب تغییرات با درصد nRMSE (CV) بین ۶/۸ تا ۸/۶ درصد، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۶/۲ تا ۸/۷ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۲، میانگین انحراف از مدل (MB) بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۸ و ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب روز تا رسیدگی فیزیولوژیک با زیرمدل نوشته شده به زبان FST داشت و مقادیر روز تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (شکل ۶).



شکل ۶- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده روزها تا رسیدگی فیزیولوژیک منطقه ارنان در رقم زودرس (A)، لاین‌های متوسط‌رس (B)، لاین دیررس (C) و لاین‌های کینوا (D) به همراه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، خط ۱:۱ (صاف) و خط رگرسیون (بریده)

Figure 6- Observed and simulated values of days until physiological maturity of Arnan region in early cultivar (A), medium middle lines (B), late line (C) and quinoa lines (D) with root mean square error (RMSE), coefficient of variation nRMSE (CV), Wilmot agreement index (d), model efficiency (ME), mean model deviation (MB), coefficient of determination (R^2), line 1: 1 (smooth) and regression line (cut)

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که مدل نمو تهیه شده برای کینوا بر حسب درجه-روز-رشد به خوبی مراحل نمو (سبز شدن، گل‌دهی و رسیدگی) انواع این گیاه به لحاظ رسیدگی (زودرس، متوسط‌رس و دیررس) پیش‌بینی می‌کند و می‌توان به کمک آن تاریخ مناسب کاشت در مناطق مختلف تعیین کرد. این زیرمدل کالبره شده هم‌اکنون می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات مختلف دمایی و فتوپریودی برای تصمیم‌گیری در طیف وسیعی از محیط‌های رشد در نظام‌های کشت کینوا در شرایط اقلیمی جاری و آینده مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین از این زیرمدل در کارهای آموزشی-تحقیقاتی و کاربردی در مزرعه می‌توان استفاده کرد.

از آن‌جایی که درجه-روز-رشد، پارامتر متداول و کاربردی در پیش‌بینی مراحل مختلف فنولوژی گیاهان است (Nassiri, 2000) به کمک آن می‌توان تاریخ کاشت مناسب را مشخص نمود و در ساخت مدل‌های مکانستیک ساده قابل استفاده است. در آزمون‌های انجام شده توسط محققین مشخص شد که قدرت مدل‌های ساده بیشتر از مدل‌های پیچیده است (Rahban et al., 2021). مدل‌های مکانستیک ساده علاوه بر این که محدودیت مدل‌های تجربی به لحاظ کاربرد در اقلیم‌های مختلف نداشته و به هزینه‌های زیاد برای تعیین پارامترهای مناطق جدید هم نیاز ندارند. در ضمن تهیه، واسنجی و اعتبارسنجی زیر مدل مکانستیک نمو کینوا کمکی در جهت ساخت مدل کامل شبیه‌سازی رشد کینوا در آینده می‌باشد.

References

- Abasi, S., Cordnaeich A., & Bagheri, M. (2018). *Evaluation of genetic diversity of new chenopodium quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) cultivars based on agromorphological traits*. 15th National Iranian Congress Science Congress, 2-5 Sep. 2019. Karaj, Iran. (in Persian with English abstract).
- Bertero, H. D., King, R. W., & Hall, A. J. (1999a). Modelling photoperiod and temperature responses of flowering in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crop Reserch*, 63, 19-34.
- Bertero, H. D., King, R. W., & Hall, A. J. (1999b). Photoperiod-sensitive envelopment phases in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research* 60, 231-243.
- Eghbali, Sh., Jahan, M., Nassiri, M. M., & Salehi, M. (2021). The response of phenological stages of quinoa promising lines to temperature and photoperiod regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19, 261-274. <https://doi.org/10.22067/jcsc.2021.69051.1032>
- FAO. (2014). *Food and nutrition in numbers*. Food and Agriculture Organisation, Rome, Accessed 27 March 2015.
- Fischer, S., Wilckens, R., Jara, J., Aranda, M., Valdivia, W., Bustamante, L., Graf, F., & Obal. I. (2017). Protein and antioxidant composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) sprout from seeds submitted to water stress, salinity and light conditions. *Industrial Crops & Products* 107, 558-564. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.035>
- Hirich, A., Choukr-Allah, R., & Jacobsen, S. E. (2014). Quinoa in Morocco-Effect of sowing dates on development and yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 23, 1-7. <https://doi.org/10.1111/jac.12071>
- Matthews, R. B., Rivington, M., Muhammed, S., Newton, A. C., & Hallett, P. D. (2013). Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: the role of crop modelling. *Global Food Security*, 2, 24-28. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.11.009>
- Nassiri, M. M. (2000). *Modelling Potential crop growth processes*. Jahad Daneshgahi Mashhad press.
- Nassiri, M. M., Koocheki, A. R., Fallahpour, F., & Amiri, M. B. (2019). Optimization of Nitrogen Fertilizer and Irrigation in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivation by Central Composite Design. *Journal of Agroecology*, 11, 515-530. <https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.31912>
- Pourghasemian, N., Moradi, R., & Naghizadeh, M. (2018). Effect of Planting Time and Place on Quality of Some Brompt on Stock Varieties for Cultivation in Bardsir, Kerman. *Crops Improvement*, 20, 679-692. <https://doi.org/10.22059/jci.2018.246733.1879>
- Präger, A., Boote, K. J., Munz, S., & Hönniger, S. G. (2019). Simulating growth and development processes of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): adaptation and evaluation of the CSM-CROPGRO model. *Agronomy*, 9, 832. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120832>
- Qulipor, A., Golkhodani, K., Latifi, N., & Moqadam, M. (2003). Comparison of growth and yield of rapeseed varieties in rain fed conditions. *Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources*, 3(1), 111-121.
- Rahban, S., Torabi, B., Soltani, S., & Zeinali, E. (2021). Using SSM-iCrop Model to Predict Phenology, Yield, and Water Productivity of Canola (*Brassica napus* L.) in Iran Condition. *Journal of Agroecology*, 13, 157-177. <https://doi.org/10.22067/jag.v13i2.84057>
- Salehi, M., & Dehghani, F. (2017). *Quinoa, suitable semi cereal for salt water resources*. Report of Minisrty of

Agricultural Jihad.

16. Salehi, M., Soltani, V., & Dehghany, F. (2019). The effect of planting date on phenological stages and yield of quinoa seeds in saline conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12, 923-932. <https://doi.org/10.22077/escs.2019.1514.1341>
17. Soltani, A., Robertson, M. J., Mohammad-Nejad, Y., & Rahemi-Karizaki, A. (2006). Modeling chickpea growth and development: leaf production and senescence. *Field Crops Reserch* 99, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.005>
18. Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. *The Journal of Agricultural Science*, 90, 2541-2547. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4158>
19. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309-1313. <https://www.jstor.org/stable/26222954>
20. Yang, A., Akhtar, S. S., Amjad, M., Iqbal, S., & Jacobsen, S. E. (2016). Growth and Physiological Responses of Quinoa to Drought and Temperature Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202, 445-453. <https://doi.org/10.1111/jac.12167>



Photosynthetic Metabolism and Antioxidant System of Spike and Flag Leaf of Bread Wheat under Drought Stress

S. Navabpour^{1*}, S. GolCheshmeh², A. Mazandarani³, H. Ahmadi-Ochtapeh⁴

Received: 04-05-2022

Revised: 11-06-2022

Accepted: 18-06-2022

How to cite this article:

Navabpour, S., GolCheshmeh, S., Mazandarani, A., & Ahmadi-Ochtapeh, H. (2023). Photosynthetic Metabolism and Antioxidant System of Spike and Flag Leaf of Bread Wheat under Drought Stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 61-74. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76536.1169>

Introduction

Drought stress and consequent lack of available water for plants is one of the main causes of accumulation of reactive oxygen species (ROS) in various organs of plants, which is effective in reducing the yield of cereals such as wheat. The antioxidant system, which contains various enzymes and genes, is responsible for removing and detoxifying plants from ROS. Unfortunately, genes responding to drought stress and their enzymatic activities associated with spike and flag leaf of wheat have received less attention. Therefore, in the present study, photosynthetic parameters, key enzymes of the antioxidant system, and expression analysis of some genes involved in this system under field capacity (FC) and drought stress (DS) conditions in spike and flag leaves of wheat were investigated.

Materials and Methods

The present study was performed in Azadshahr Research Center, Golestan Province, Iran in 2021. The wheat cultivar used in this study was Qaboos. This cultivar was cultivated under two experimental conditions of field capacity and drought stress in a randomized complete block design with three replications in the field. In the present study, differences in net photosynthesis (PN) rate, transpiration (E), stomatal conductance (gs), chlorophyll (Chl), relative water content (RWC), and the activity of APX, DHAR, MDHAR, and GR enzymes involved in the antioxidant system of flag leaf and spike of wheat were examined under field capacity and drought stress conditions. Transcription levels of APX, DHAR, MDHAR, and GR genes were measured using qRT-PCR under drought stress and field capacity conditions. Flag leaf and spike of Wheat for photosynthetic parameters and enzymatic activities at 0, 5, 10, 15, 20, and 25 and relative gene expression at 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, and 25 days after anthesis (DAA) were harvested. The recorded data were analyzed by analysis of variance and all analyzes were performed by SPSS software. Mean differences were compared using Duncan's multiple range test at 5% probability level.

Results and Discussion

In general, the spike had a better capacity to maintain net photosynthesis, transpiration, stomatal

1- Associate Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- Ph.D student, Department of Plant Breeding, Faculty of Crops Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

3- Ph.D in Plant Breeding, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran

(* - Corresponding Author Email: s.navabpour@gau.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76536.1169>

conductance, chlorophyll, and relative water content under drought stress conditions. This superiority reached its peak on the fifth day after anthesis. The enzymatic activity of the antioxidant system was normal under field capacity conditions. However, with the application of drought stress, APX, DHAR, MDHAR, and GR enzymes were affected in both spike and flag leaf of wheat and their activity increased, which indicates more activity of the antioxidant system in spikes and flag leaf of wheat for controls the level of ROS. After more days of grain filling, the activity of enzymes increased, and finally, after the plant entered the senescence stage, the activity of enzymes decreased to some extent. With drought stress, the antioxidant system in spike, especially from the 10th day after anthesis onwards, had a better performance. However, enzymatic activity in flag leaves under drought stress was not significantly different from field capacity conditions. Transcriptional levels of APX, DHAR, MDHAR, and GR genes associated with the antioxidant system increased under drought stress compared to field capacity conditions. It seems that the increase in enzymatic activity simultaneously with the increase in the level of transcription of the genes of the antioxidant system in the spikes and flag leaves of wheat is to counteract the oxidative damage.

Conclusion

In the present study, spikes of wheat played a more important role in responding to water deficiency through the antioxidant system than its flag leaf. The results of this study showed a high potential of the spike compared to flag leaf in the face of drought stress and this results in future breeding programs in wheat can play a key role in selecting drought-resistant cultivars with high yield.

Keywords: Enzyme activity, Flag leaf, Gene expression, Photosynthetic mechanism, Spike

مطالعه متابولیسم فتوسنتزی و سیستم آنتی اکسیدانی سنبله و برگ پرچمی گندم نان تحت تنش خشکی

سعید نواب پور^{۱*}، ساسان گل چشمه^۲، ابوالفضل مازندرانی^۳، حسین احمدی اوج تپه^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

چکیده

تنش خشکی، یکی از عوامل اصلی تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROSS) در اندام‌های مختلف گیاهان می‌باشد. این مسئله در کاهش عملکرد غلاتی همچون گندم تأثیرگذار است. سیستم آنتی اکسیدانی که شامل آنزیم‌ها و ژن‌های مختلفی است، مسئولیت سم‌زدایی گیاهان از ROSها را بر عهده دارد. در مطالعه حاضر، تفاوت در میزان فتوسنتز خالص (P_N)، تعرق (E)، هدایت روزنه‌ای (gs)، کلروفیل (Chl)، میزان نسبی آب (RWC)، فعالیت برخی آنزیم‌ها و سطح رونوشت ژن‌های آنزیمی دخیل در سیستم آنتی اکسیدانی سنبله و برگ پرچمی گندم تحت شرایط آبیاری کامل (FC) و تنش خشکی (DS) از ۰ تا ۲۵ روز پس از گرده افشانی بررسی شدند. طرح آزمایشی مورد استفاده بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. متوسط میزان پتانسیل آب خاک تیمار آبیاری کامل در حد ظرفیت مزرعه و تیمار تنش خشکی بر اساس رسیدن به محدوده ۷۰ درصد آب مورد نیاز گیاه تا حد ظرفیت مزرعه بود. سطوح رونویسی ژن‌های *MDHAR*، *DHAR*، *APX* و *GR* با استفاده از qRT-PCR اندازه‌گیری شد. به‌طور کلی، سنبله به‌ویژه تا روز پنجم پس از گرده افشانی با ثبت مقادیر $4/5 (\mu\text{mol})$ ، $0/36 (\text{mmol})$ ، $4/9 (\text{mmol})$ و $0/53 (\text{mg/g FW})$ و ۹۰٪ به‌ترتیب برای پارامترهای P_N ، E، gs، Chl و RWC ظرفیت بالایی به‌منظور مقابله با تنش خشکی در قیاس با برگ پرچمی داشت. تنش خشکی، عامل افزایش فعالیت‌های آنزیمی و بیان ژن سیستم آنتی اکسیدانی، به‌ویژه در روزهای ۱۵ الی ۲۰ پس از گرده افشانی بود و سنبله نسبت به برگ پرچمی افزون بر تجمع کمتر ROSها، درصد بیش‌تری از فعالیت آنزیمی و بیان ژن را داشت. این نتایج حاکی از پتانسیل بیش‌تر سنبله نسبت به برگ پرچمی در مقابله با تنش خشکی بود.

واژه‌های کلیدی: برگ پرچمی، بیان ژن، سنبله، فعالیت آنزیمی، مکانیسم فتوسنتزی

مقدمه

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) گیاهی هگزاپلوئید با تعداد

۱- دانشیار، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، رشته اصلاح نباتات (بیولوژی مولکولی)، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- دانشجوی دکتری تخصصی، رشته ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، گروه اصلاح نباتات، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- دکترای تخصصی اصلاح نباتات، گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۴- استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

(*) - نویسنده مسئول:
(Email: s.navabpour@gau.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76536.1169>

$2n=6x=42$ کروموزوم، از تیره غلات است (Emam, 2011). تنش خشکی یکی از شایع‌ترین تنش‌های غیرزنده محیطی می‌باشد و در کاهش عملکرد و کیفیت گندم نقش اساسی داشته و به‌عنوان یک چالش مهم برای اصلاح‌کنندگان گیاهان تبدیل شده است (Nezhadahmadi et al., 2013). تنش خشکی باعث بروز دامنه وسیعی از واکنش‌ها در غلات، از تغییر بیان ژن و متابولیسم سلول تا تغییر در سرعت رشد و عملکرد گیاهان می‌شود (Reddy et al., 2004). به‌عنوان نمونه، در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاهش بارندگی و افزایش دما در اواخر فصل موجب بروز تنش خشکی شده معمولاً با مرحله پرشدن دانه هم‌زمانی دارد، این مرحله در گندم از بحرانی‌ترین مراحل نمو تحت تنش خشکی می‌باشد (Liu et al., 2016). لذا، تنش خشکی می‌تواند در زمان پر شدن دانه‌ها از طریق کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش سنتز روبیسکو و افزایش تخریب آن، تخریب دستگاه فتوسنتزی و کاهش چشم‌گیر کلروفیل و در نهایت

پرچی گندم هستند کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، در مطالعه حاضر پارامترهای فتوسنتزی، آنزیم‌های کلیدی سیستم آنتی‌اکسیدانی و آنالیز بیان برخی از ژن‌های دخیل در این سیستم تحت شرایط آبیاری کامل (FC^V) و تنش خشکی (DS^A) در برگ پرچی و سنبله گندم مورد بررسی قرار گرفتند تا تفاوت پاسخ‌های فیزیولوژیکی و متابولیکی اندام‌های مختلف گندم به تنش خشکی بهتر درک شود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط رشد

پژوهش حاضر در سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در مرکز تحقیقات شهر آزادشهر استان گلستان انجام شد. شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه در دوره رشد گیاه گرم و معتدل بود. همچنین میانگین بارندگی ماهانه فصل رشد در منطقه مورد کشت در جدول ۱ نشان داده شده است.

رقم گندم مورد استفاده در این مطالعه قابوس بود که به دلیل رواج کاشت در منطقه، عملکرد مناسب، ریشک‌دار بودن و تحمل نسبی بالا در برابر تنش خشکی مورد استفاده قرار گرفت. این رقم تحت دو شرایط آزمایشی آبیاری کامل و تنش خشکی در دو مکان، به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه کشت شد. هر کرت آزمایشی دارای شش ردیف کاشت با طول ۲/۵ متر و فاصله ردیف ۲۵ سانتی‌متر بود. تراکم در واحد سطح ۳۰۰ دانه در متر مربع و فاصله بوته‌ها از یکدیگر بر روی ردیف‌ها پنج سانتی‌متر بود.

جهت آبیاری کامل، پنج دور آبیاری مطابق با عرف منطقه اعمال شد و با توجه به شرایط غیر یکنواخت مزرعه، متوسط میزان پتانسیل آب خاک تیمار آبیاری کامل در حد ظرفیت مزرعه نگه داشته شد. در تیمار تنش خشکی، آخرین آبیاری در ابتدای دوره گرده‌افشانی انجام شد و میزان آبیاری بر اساس رسیدن به محدوده ۷۰ درصد آب مورد نیاز گیاه تا حد ظرفیت مزرعه بود. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از دستگاه تانسومتر که در چند نقطه از مزرعه به‌طور مداوم در طول فصل کشت در محدوده ریشه نصب شده بود استفاده شد. حجم آب مصرفی نیز با تامین آب در شرایط ظرفیت مزرعه (پتانسیل آب خاک در حد ۰/۳- بار) مشخص شد و برای رسیدن به این میزان پتانسیل آب، با انجام آزمایش‌های مستمر و ملاحظه تغییر عدد تانسومتر تعیین شد. همین روند در مورد تیمار تنش خشکی با ۷۰ درصد آب مورد نیاز نسبت به ظرفیت مزرعه نیز انجام شد. همچنین وجود سقف متحرک (پناهگاه) با جلوگیری از تاثیر بارندگی بر گیاهان، بر دقت کار کمک موثر نمود.

تسریع پیری برگ‌ها، سبب کاهش سرعت فتوسنتز و فتوآکسمیلات تولیدی و در نهایت افت عملکرد دانه شود (Rubia et al., 2014).

تاثیر شرایط تنش‌زا محدود به تغییرات پارامترهای فتوسنتزی در گیاه نیست و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS^1) نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در اثر تنش خشکی، بسته شدن روزنه و در نتیجه کمبود CO_2 باعث کاهش فتوسنتز شده و به تشکیل بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن در کلروپلاست منجر می‌شود (Turkan et al., 2005). برای جلوگیری از اثرات تنش اکسیداتیو و زنده ماندن گیاه در چنین شرایطی، گیاهان مکانیسم‌های بیوشیمیایی و فرآیندهای متعدد برای سازگاری جهت افزایش تحملشان به شرایط نامساعد برای حذف یا کاهش این ترکیبات مخرب دارا می‌باشند. از جمله این سازوکارها می‌توان به چرخه آسکوربات-گلوتاتیون ($AsA-GSH^2$) اشاره نمود (Xu et al., 2008). این چرخه، یکی از مهم‌ترین مولفه‌های سیستم آنتی‌اکسیدانی، مسیری اساسی برای مهار H_2O_2 و مکانیسم موثر سم‌زدایی در سلول‌های گیاهی با استفاده از آنزیم‌های مرتبط با آن‌ها است. فعالیت هم‌زمان آنزیم‌های سوپراکسیددیسموتاز (SOD^3)، کاتالاز (CAT^4)، دهیدروآسکوربات‌ردوکتاز ($DHAR^5$) و گلوتاتیون‌ردوکتاز (GR^6) به عنوان قسمتی از این سامانه آنتی‌اکسیدانی، می‌تواند سلول را در مقابل ROSها حفاظت کند (Liu et al., 2014). سیستم آنتی‌اکسیدانی اطلاعات لازم در مورد وضعیت ردوکس سلولی را نیز ارائه می‌دهد و بر روی رونویسی ژن‌هایی که مسئول پاسخ به تنش هستند تاثیر می‌گذارد تا حداکثر دفاع ایجاد شود.

با توجه به مطالب ذکر شده و همچنین معضل وجود تغییرات آب و هوایی، یکی از تکنیک‌های به‌نژادی که پژوهشگران به‌منظور افزایش پتانسیل عملکرد در گندم و بهبود سازگاری آن با شیوع فزاینده تنش‌های غیرزنده مانند خشکی به کار می‌برند، گزینش در جهت فتوسنتز بیش‌تر سنبله است (Tambussi et al., 2007). در شرایطی که فتوسنتز برگ به دلایلی مانند بیماری و تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی محدود باشد، تعیین سهم فتوسنتز اندام‌های دیگر گندم از جمله سنبله و برگ پرچی در عملکرد دانه مهم است (Robert et al., 2005). همچنین مطالعات گذشته نشان داده است که فتوسنتز سنبله تحت شرایط تنش‌های محیطی، به عنوان جزء اصلی تامین کربن بذر در حال رشد می‌باشد (Abebe et al., 2010; Sanchez-Bragado et al., 2014) اما ژن‌های پاسخ‌دهنده به تنش خشکی و فعالیت‌های آنزیمی آن‌ها که در ارتباط با سنبله و برگ

- 1- Reactive Oxygen Species
- 2- Ascorbate-glutathione
- 3- Superoxide dismutase
- 4- Catalase
- 5- Dehydroascorbate reductase
- 6- Glutathione reductase

- 7- Field capacity
- 8- Drought stress

جدول ۱- میانگین میزان بارندگی ماهیانه فصل رشد در منطقه مورد بررسی
Table 1- The average monthly rainfall of the growing season in the study area

	آبان ۱۳۹۹ November 2020	آذر ۱۳۹۹ December 2020	دی ۱۳۹۹ January 2021	بهمن ۱۳۹۹ February 2021	اسفند ۱۳۹۹ March 2021	فروردین ۱۴۰۰ April 2021	اردیبهشت ۱۴۰۰ May 2021	خرداد ۱۴۰۰ June 2021
میانگین بارش ماهانه Average monthly rainfall (mm)	29.2	38.1	46.8	58.4	45.0	22.7	16.3	14.7

صافی حجم نهایی آن به ۲۰ میلی لیتر رسانده و سپس در طول موج های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر میزان جذب اندازه گیری شد (Bagheri, 2013).

اندازه گیری محتوای نسبی آب (RWC)

اندازه گیری محتوای نسبی آب (RWC^۴)، مطابق با روش اسمارت و بینگهام (Smart & Bingham, 1974) بود. برای اندازه گیری RWC، تعدادی برگ پرچمی و سنبله کامل گندم را به طور تصادفی برای هر تیمار در هر تکرار در انتهای مرحله گرده افشانی برداشت کرده و وزن تر آن ها اندازه گیری شد و به مدت ۴۸ ساعت در آب مقطر خیسانده شده و وزن اشباع آن ها اندازه گیری شد. سپس نمونه ها را در آون گذاشته و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدند تا وزن خشک به دست آید. میزان RWC به کمک رابطه (۲) محاسبه شد.

$$RWC [\%] = (FM - DM) / (TM - DM) \times 100\% \quad (2)$$
 که در این رابطه RWC محتوای نسبی آب برگ (%، FM، توده تازه، DM، توده خشک و TM، توده متورم می باشد.

اندازه گیری فعالیت های آنزیمی

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX^۵) با استفاده از روش چن و آسادا (Chen & Asada, 1989) محاسبه شد. بدین منظور تعدادی برگ پرچمی و سنبله گندم به طور تصادفی برای هر تیمار در هر تکرار در انتهای مرحله گرده افشانی برداشت شد. سپس، نمونه ها توسط نیتروژن مایع در هاون کوبیده شدند و نیم گرم نمونه پودری از آن ها برداشت شد. مخلوط واکنش شامل یک میلی لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی مولار (PH=۷) یک میلی مولار EDTA، ۰/۵ میلی مولار آسکوربات، ۱/۵۴ میلی مولار هیدروژن پراکسید و ۵۰ میلی لیتر عصاره آنزیمی بود. تخریب آسکوربات با کاهش جذب در طیف نوری ۲۹۰

برگ های پرچمی و سنبله های گندم برای صفات میزان فتوسنتز خالص (P_N^۱)، تعرق (E^۲)، هدایت روزنه (g_s^۳)، کلروفیل و میزان نسبی آب و فعالیت های آنزیمی در ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ برای صفت بیان نسبی ژن در ۰، ۱، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روز پس از گرده افشانی برداشت شدند.

اندازه گیری پارامترهای فتوسنتزی

میزان فتوسنتز خالص، هدایت روزنه ای و میزان تعرق در برگ های پرچمی توسط دستگاه تبادلات گازی مدل LI-6400XT شرکت LiCor آمریکا مطابق با روش جیا و همکاران (Jia et al., 2015) اندازه گیری شد. پارامترهای فتوسنتزی سنبله نیز توسط یک محفظه استوانه شیشه ای ویژه که به یک سیستم پرتابل فتوسنتزی متصل می شود، اندازه گیری شد (Ding et al., 2018). اندازه گیری فتوسنتز در ساعت ۹ صبح تا ۱۱ صبح با چگالی شار فتون فتوسنتزی اشباع شده (PPFD) از ۱۰۰۰ میکرومول (فتون m⁻²s⁻¹) در ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روز پس از گرده افشانی بر روی پنج بوته به طور جداگانه برای هر تیمار انجام شد و در نهایت میانگین آن ها ثبت شد. مساحت برگ پرچمی با استفاده از معادله پیشنهادی راوسون و همکاران (Rawson et al., 1988) به صورت زیر محاسبه شد:

$$LA = L \times W \times 0.75 \quad (1)$$

که در این رابطه L طول برگ، W عرض برگ، LA مساحت برگ و ۰/۷۵ ضریب ویژه گندم می باشد. محاسبه سطح سنبله طبق رابطه سطح لبه (حاشیه) بود.

اندازه گیری میزان کلروفیل

برای اندازه گیری میزان کلروفیل، مقدار ۰/۰۵ گرم نمونه برگ در ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد ساییده شد. پس از گذراندن از کاغذ

4- Relative water content
5- Ascorbate peroxidase

1- Net photosynthesis
2- Transpiration
3- Stomatal conductance

استخراج RNA و qRT-PCR

نمونه برداری سنبله و برگ پرچمی جهت ارزیابی بیان ژن‌ها در زمان خمیری سخت مرحله ۸۷ مقیاس زیادکس صورت گرفت. حدود یک گرم نمونه از سنبله و برگ پرچمی در تیمارهای مختلف برای اندازه‌گیری میزان بیان ژن‌ها برداشت شد و در نیتروژن مایع منجمد و تا مرحله استخراج RNA در فریزر منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. استخراج RNA به روش تریزول انجام شد و غلظت و خلوص آن از طریق دستگاه اسپکتوفوتومتری ساخت بیوتک تعیین شد. با استفاده از روش ترنس کریپتاز معکوس، عمل ساخت رشته اول cDNA انجام شد (Lou et al., 2018). آغازگرهای مورد استفاده در واکنش qRT-PCR در جدول ۲ نشان داده شده است.

نانومتر با دستگاه اسپکتوفوتومتر سنجیده شد. فعالیت GR با پیروی از کاهش جذب در طول موج ۳۴۰ نانومتر با توجه به روش گریس و لوگان (Grace & Logan, 1996) مورد سنجش قرار گرفت. فعالیت‌های DHAR و MDHAR با افزایش سطح جذب در طول موج ۲۶۵ نانومتر بر اساس روش پینتو و همکاران (Pinto et al., 2000) ارزیابی شدند. مخلوط واکنش شامل ۵۰ میلی‌مول بافر سدیم فسفات با PH برابر هفت، ۰/۲۵ UAAO، دو میلی‌مول AsA، دو میلی‌مول NADPH و عصاره آنزیم بود.

جدول ۲- توالی آغازگرهای مورد استفاده در واکنش qRT-PCR

Table 2- Sequences of primers used in qRT-PCR		
ژن‌ها Genes	شماره دسترسی Accession no.	جفت آغازگرها از ۵' به ۳' Primer pairs 5'-3'
APX	AY513263.1	F: AAAGCGAAGCATCCAAAG R: CAGAGGGTCACGAGTCCA
DHAR	AY074784	F: GTGCCTGTGTATAACGGTG R: ACAAGTGATGGAGTTGGGT
MDHAR	AK371371	F: AGAAGTTTACGCCCTTCGGC R: TTGGAATGTCATCGCCATC
GR	AY364467	F: GCACACGACCAAGCACATAT R: ATATCCGCCACCAAGAATAACG
GAPDH	U76558.1	F: TTCTCCCGCATCGACCACAAGTT R: TCCAGGGCAGCAAGATCCTCAGC

صفات مورد بررسی غیرمعنی‌دار بود و تجزیه و تحلیل آماری برای هر یک از شرایط تیماری (آبیاری کامل و تنش خشکی) به‌طور مستقل انجام شد.

نتایج و بحث

فتوسنتز خالص سنبله و برگ پرچمی

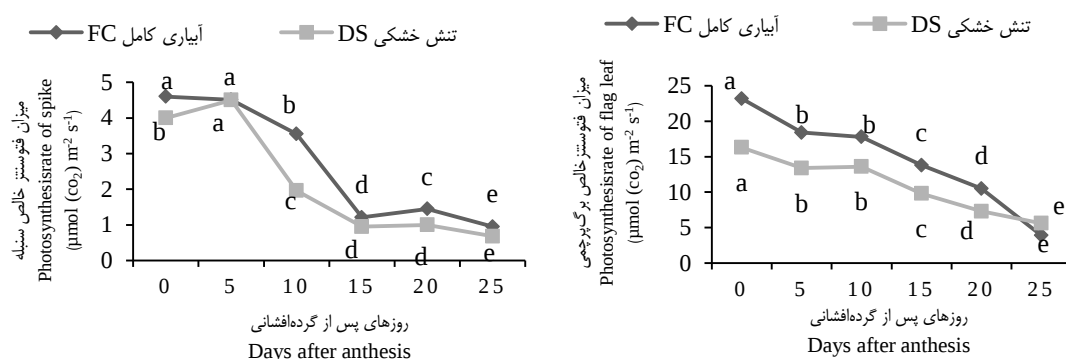
در مطالعه حاضر، میزان P_N اندام‌های سنبله و برگ پرچمی در شرایط آبیاری کامل بیش‌تر از شرایط تنش خشکی بود. روند تغییرات P_N در سنبله تحت تیمار خشکی نیز شامل افزایش موقتی آن (با مقدار ۴/۵ میکرومول) تا روز پنجم پس از گرده‌افشانی بود و پس از آن کاهش شدیدی را تجربه کرد. این در حالی است که مقدار P_N برگ پرچمی در موقعیتی مشابه با شیب نزولی ملایم‌تری نسبت به سنبله مواجه بود. با این حال، افزایش معنی‌دار میزان P_N سنبله از صفر تا پنج روز پس از گرده‌افشانی تحت تنش خشکی که مقارن با مراحل اولیه پر شدن دانه نیز می‌باشد، حاکی از توانایی سنبله در حفظ P_N در مقایسه با برگ پرچمی بود (شکل ۱). نتایج مشابهی توسط تمبوسی و همکاران (Tambussi et al., 2005) گزارش شده است. مطالعه

واکنش qRT-PCR در دستگاه Light cycle 96 (روش، آلمان) همراه با مانیتور، نرم‌افزار و رک‌های اختصاصی (روش، آلمان) و با سه تکرار صورت پذیرفت. در این واکنش ۱۰ میکرولیتر سایبر پرمیکس اکس تگ، ۱/۶ میکرولیتر آغازگرهای اختصاصی ژن و دو میکرولیتر cDNA الگو به‌همراه ۵/۱ میکرولیتر آب فاقد RNase مخلوط گردید. برنامه زمانی-گرمایی دستگاه شامل سه دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به‌منظور واسرشت‌سازی اولیه مولکول cDNA، سپس ۴۰ سیکل شامل ۱۰ ثانیه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد جهت واسرشت‌سازی، ۱۰ ثانیه در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد جهت اتصال پرایمرها و ۱۵ ثانیه در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌منظور طولیل‌سازی بود. همچنین پس از پایان یافتن سیکل‌ها، منحنی ذوب نمونه‌ها به‌منظور تعیین خلوص آن‌ها در بازه دمایی ۶۵ تا ۹۵ درجه سانتی‌گراد رسم شد (Parvae et al., 2016).

داده‌های ثبت شده نیز از طریق آنالیز واریانس تجزیه و تحلیل شدند و کلیه تحلیل‌ها به‌وسیله نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ انجام شد. اختلاف میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۵ درصد مقایسه شدند. لازم به توضیح است که اثر متقابل

در جذب کربن و ترکیبات مهم در طی پر شدن دانه می‌باشند که در نهایت بر روی عملکرد دانه نیز اثر مثبت می‌گذارند (Jia *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016).

فتوستت سنبله و برگ پرچمی در گندم به دلیل وجود شواهدی مبنی بر ظرفیت بالای این اندام‌ها در تحمل به تنش خشکی است (Reynolds *et al.*, 2005). مطالعات پژوهشگران نشان داده است فتوستت سنبله و برگ پرچمی گندم طی تنش خشکی از عوامل مهم



شکل ۱- میزان فتوستت سنبله‌ها و برگ‌های پرچمی پس از گرده‌افشانی تحت شرایط آبیاری کامل (FC) و تنش خشکی (DS). مقادیر با حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح $P < 0.05$ در هر تیمار آبیاری در طول زمان با توجه به آزمون چند دامنه دانکن می‌باشد.

Figure 1- Photosynthesis rate of spikes and flag leaves of wheat after anthesis under Field capacity (FC) and Drought stress (DS) conditions. Values with different letters indicated the significant differences at $P < 0.05$ level in each stress treatment through time according to Duncan's multiple range test.

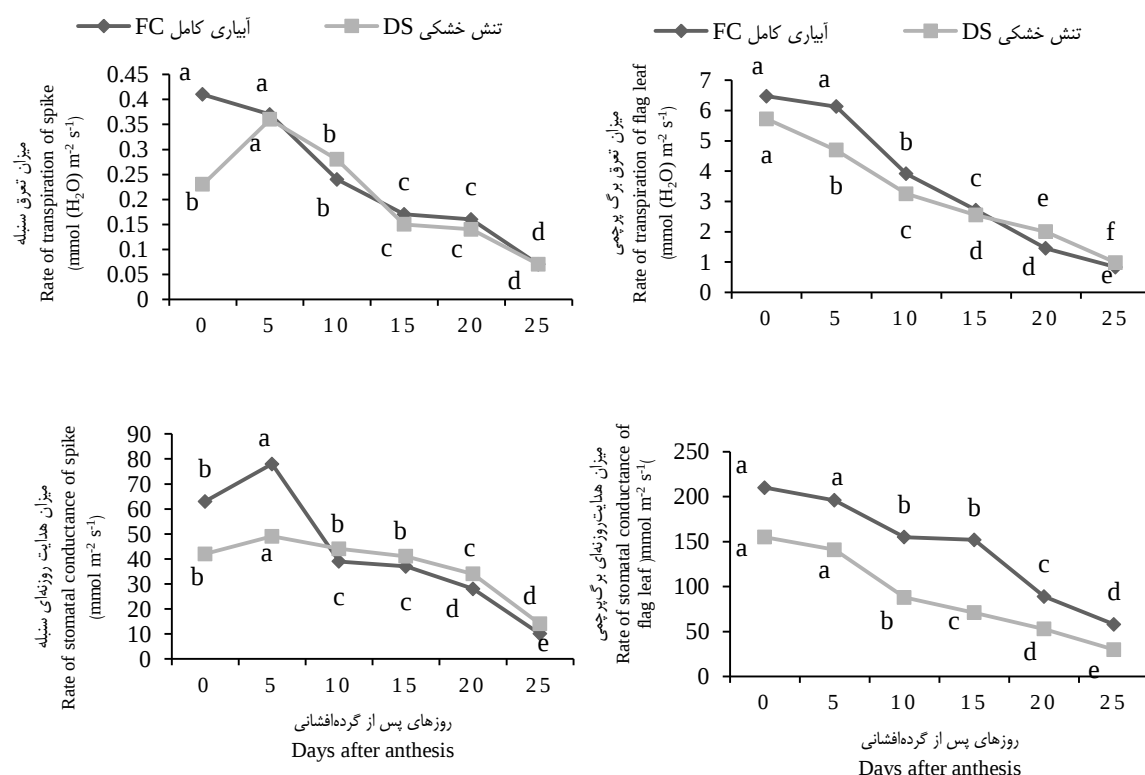
(Poljakoff-Mayber & Gale, 2012). به‌طور کلی، میزان فتوستت خالص، میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای سنبله در مقایسه با برگ پرچمی در شرایط تنش خشکی حساسیت کم‌تری داشته و تا حدود زیادی می‌تواند به عملکرد دانه کمک کند. نتایج مشابه توسط لو و همکاران (Lou *et al.*, 2018) گزارش شده است.

میزان کلروفیل

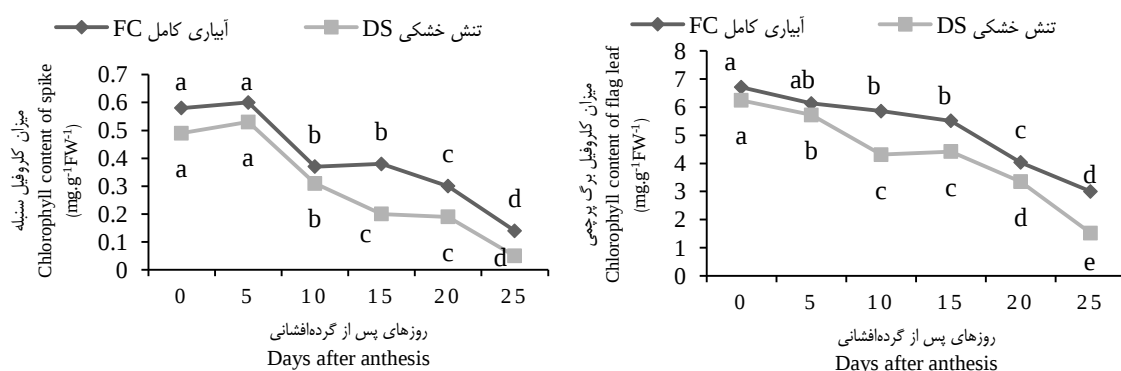
تنش خشکی باعث کاهش میزان کلروفیل برگ پرچمی در هر دو شرایط آبیاری شد. در حالی‌که سنبله در هر دو تیمار آبیاری (به‌خصوص در تیمار تنش خشکی) بین صفر تا پنج روز پس از گرده‌افشانی افزایش مطلوبی در میزان کلروفیل نشان داد و سپس کاهش یافت (شکل ۳). به‌نظر می‌رسد هنگامی که در اثر تنش خشکی کارایی فتوستت برگ‌های پرچمی ناچیز می‌شود، حفظ اجزای فتوستت در سنبله‌ها کمک می‌کند تا به‌عنوان منبع جذب در مرحله پر شدن دانه کار خود را ادامه دهند و در نهایت عملکرد را بهبود بخشند. پایداری نسبی میزان کلروفیل در سنبله گندم می‌تواند منجر به افزایش مدت زمان فتوستت در طول پر شدن دانه شود، که این مسئله به‌ویژه در ارقام متحمل به تنش خشکی حائز اهمیت است (Martinez *et al.*, 2003). از طرفی کاهش میزان کلروفیل در برگ پرچمی تحت تنش خشکی نیز می‌تواند باعث پیری زودرس در طی گلدهی شود (Huseynova, 2012). نتایج مشابه از تحقیقات مارتینز و همکاران (Martinez *et al.*, 2003) و دینگ و همکاران (Ding *et al.*, 2018) استنتاج شده است.

میزان تعرق و هدایت روزنه

با اعمال تنش خشکی، میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای در برگ پرچمی از صفر تا ۲۵ روز پس از گرده‌افشانی به‌طور پیوسته کاهش یافت. در حالی‌که، سنبله تحت تنش خشکی از صفر تا پنج روز پس از گرده‌افشانی به‌طور معنی‌داری با افزایش در میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای (به‌ترتیب با مقادیر ۰/۳۶ و ۴۹ میلی‌مول) مواجه بود، که علت آن می‌تواند به‌دلیل توانایی سنبله در حفظ آب و کاهش هدر رفت آب در شرایط تنش باشد (شکل ۲). لذا یکی از دلایل اصلی افزایش میزان فتوستت خالص سنبله از صفر تا پنج روز پس از گرده‌افشانی (شکل ۱)، افزایش میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای در زمان مشابهی بوده است. بسته شدن روزنه‌ها با اعمال تنش خشکی گرچه به‌منظور کاهش هدررفت آب صورت می‌گیرد، اما به واسطه ممانعت از ورود CO₂ می‌تواند فتوستت را به کم‌تر از نقطه جبرانی کاهش دهد (Shahinnia *et al.*, 2016). روزنه‌ها میزان مصرف آب و در نهایت مقدار عملکرد را در فرآیند فتوستت تحت تاثیر قرار می‌دهند و بسته‌تر شدن روزنه‌ها مهم‌ترین عامل مرتبط با توقف فتوستت در مراحل اولیه تنش خشکی در گیاه است. اهمیت هدایت روزنه‌ای در این فرآیند تا حدی است که پژوهشگران به‌نژادی گیاهی از آن در شناسایی و انتخاب ارقام پر محصول و مقاوم به خشکی استفاده می‌کنند (Sharma *et al.*, 2012). از طرفی هر زمان که میزان تعرق از میزان جذب آب بیش‌تر می‌شود، گیاه با کاهش تعرق از طریق بستن روزنه‌ها برای کاهش اثرات منفی کمبود آب و بهبود بهره‌وری محصول در شرایط تنش خشکی مبارزه می‌کند.



شکل ۲- میزان تعرق و هدایت روزنه سنبله‌ها و برگ‌های پرچمی پس از گرده‌افشانی تحت شرایط آبیاری کامل (FC) و تنش خشکی (DS). مقادیر با حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح $P < 0.05$ در هر تیمار آبیاری در طول زمان با توجه به آزمون چند دامنه دانکن می‌باشد.
Figure 2- The rate of transpiration and stomatal conductance of spikes and flag leaves of wheat after anthesis under Field capacity (FC) and Drought stress (DS) conditions. Values with different letters indicated the significant differences at $P < 0.05$ level in each stress treatment through time according to Duncan's multiple range test.

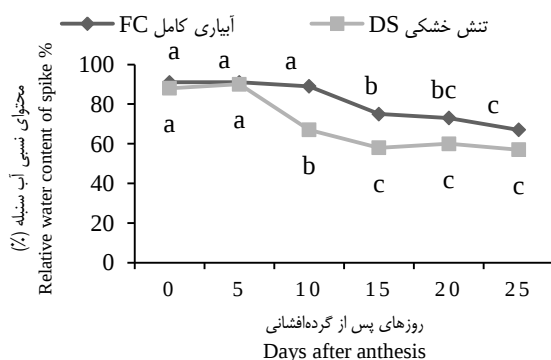


شکل ۳- میزان کلروفیل سنبله‌ها و برگ‌های پرچمی پس از گرده‌افشانی تحت شرایط آبیاری کامل (FC) و تنش خشکی (DS). مقادیر با حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح $P < 0.05$ در هر تیمار آبیاری در طول زمان با توجه به آزمون چند دامنه دانکن می‌باشد.
Figure 3- Chlorophyll content of spikes and flag leaves of wheat after anthesis under Field capacity (FC) and Drought stress (DS) conditions. Values with different letters indicated the significant differences at $P < 0.05$ level in each stress treatment through time according to Duncan's multiple range test.

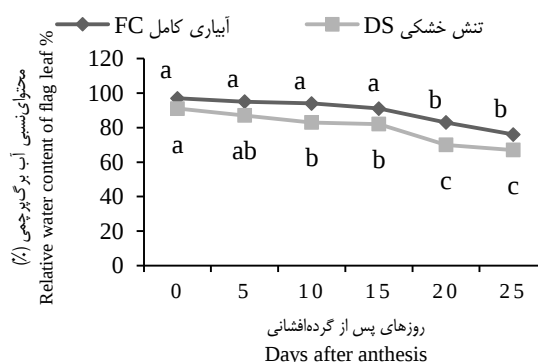
برگ پرچمی در شرایط آبیاری کامل بالاتر از تنش خشکی است، اما تفاوت چشمگیری بین آن‌ها وجود ندارد و این کاهش اندک می‌تواند

میزان نسبی آب (RWC) همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، علی‌رغم این که RWC

روزیهای ابتدایی پر شدن دانه تحت تیمار خشکی (شکل های ۱، ۲ و ۳) نیز گواه بر ظرفیت بالای سنبله در حفظ RWC بیش تر در قیاس با برگ پرچی است. هدف اصلاح گران گندم از بررسی RWC در سنبله و برگ پرچی گندم، افزایش توانایی گیاه در حفظ مقادیر بیش تری آب در مواقع تنش خشکی است. زیرا RWC نقش مهمی در تحمل گیاه به کمبود آب به خصوص در شرایط تنش خشکی دارد (Siosemardeh *et al.*, 2003). بر این اساس، ژنوتیپ های متحمل میزان نسبی آب بیش تری در شرایط تنش خشکی از خود نشان می دهند و از عملکرد بهتری نیز برخوردار خواهند بود. همچنین میزان نسبی آب نقش مهمی در تنظیم هدایت روزنه ای و در نتیجه سرعت فتوسنتزی گیاه دارد (Mitchell *et al.*, 2001) که در نهایت می تواند روی عملکرد دانه اثر مثبتی داشته باشد. نتایج مشابه توسط واردلا (Wardlaw, 2002) گزارش شده است.



ناشی از برهم خوردن تعادل آب گیاه طی تیمار خشکی باشد، نتایج مشابهی توسط باجی و همکاران (Bajji *et al.*, 2001) گزارش شده است. در سنبله، میزان نسبی آب در تیمار آبیاری کامل از ثبات بهتری برخوردار بود اما در تیمار خشکی یک افزایش موقتی از ۸۸ تا ۹۰ درصد در مقدار RWC تا روز پنجم پس از گرده افشانی مشاهده شد و بعد از آن شاهد کاهش RWC تا روز ۱۵ پس از گرده افشانی بود و سپس افزایش موقتی دیگری از ۵۸ تا ۶۰ درصد را بین روزهای ۱۵ تا ۲۰ پس از گرده افشانی تجربه کرد (شکل ۴). به نظر این افزایش های مقطعی نشان دهنده ظرفیت بالای سنبله در حفظ RWC و به عنوان اصلی ترین عامل مقاومت بیش تر در برابر تنش خشکی باشد. در مطالعه واردلا (Wardlaw, 2002) گزارش شده است اجزای سنبله گندم نان تحت تنش خشکی RWC بالاتری را نسبت به برگ های پرچی حفظ کرده اند. قابل ذکر است که عملکرد نسبتا خوب فرآوردهای فتوسنتز، تعرق و هدایت روزنه ای در سنبله به ویژه در



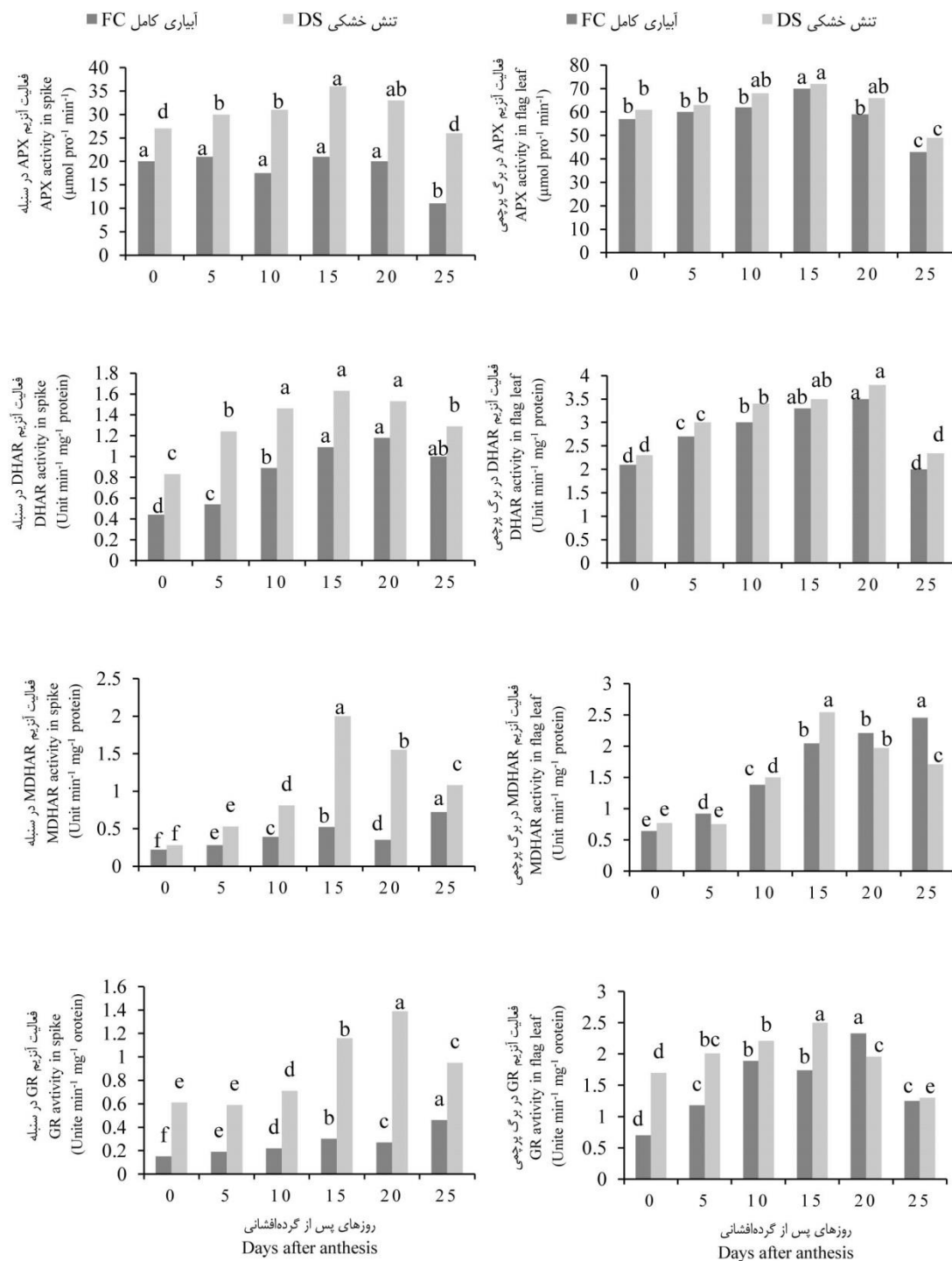
شکل ۴- میزان نسبی آب (RWC) سنبله ها و برگ های پرچی پس از گرده افشانی تحت شرایط آبیاری کامل (FC) و تنش خشکی (DS). مقادیر با حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح $P < 0.05$ در هر تیمار آبیاری در طول زمان با توجه به آزمون چند دامنه دانکن می باشد.

Figure 4- Relative water content (RWC) of spikes and flag leaves of wheat after anthesis under Field capacity (FC) and Drought stress (DS) conditions. Values with different letters indicated the significant differences at $P < 0.05$ level in each stress treatment through time according to Duncan's multiple range test.

فعالیت این آنزیم ها نیز بیش تر شده و در نهایت بعد از وارد شدن گیاه به مرحله پیری، به نظر از فعالیت آنزیم های مذکور تا حدودی کاسته شد. در یک مقایسه بین سنبله و برگ پرچی ملاحظه شد که با اعمال تنش خشکی، سیستم آنتی اکسیدانی در سنبله به خصوص روزهای حداکثر تنش، یعنی از روز ۱۰ پس از گرده افشانی به بعد عملکرد مطلوب تری را داشت. این در حالی بود که فعالیت آنزیمی در برگ پرچی تحت تنش خشکی، تفاوت معنی داری را با شرایط عادی (آبیاری کامل) نداشت و حتی در برخی مواقع آنزیم های مورد مطالعه در شرایط آبیاری کامل فعالیت بهتری را دارا بودند (شکل ۵). همین مسئله به نظر نشان دهنده برتری سنبله در کنترل سطح ROS نسبت به برگ پرچی بود.

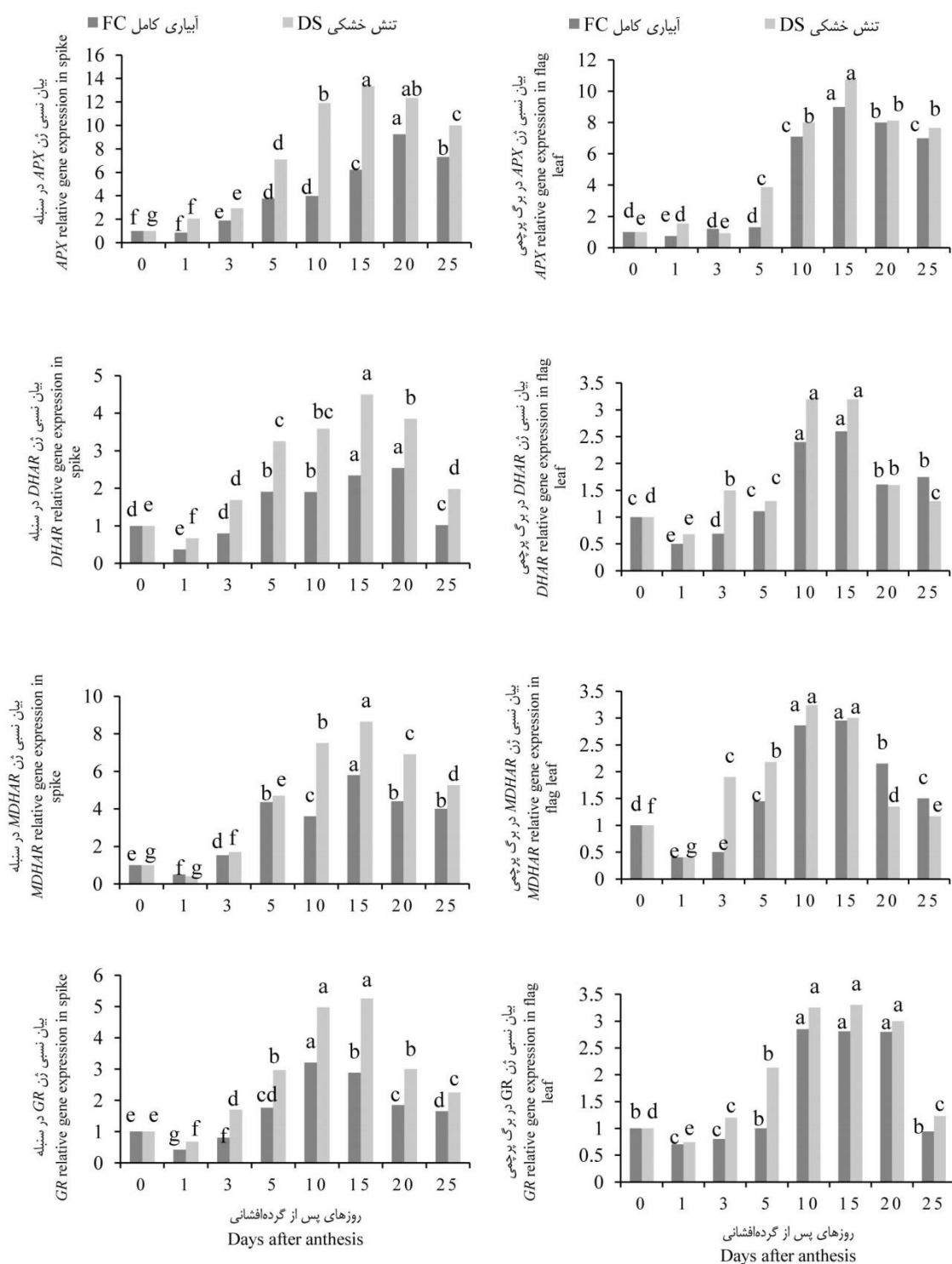
فعالیت های آنزیمی در سیستم آنتی اکسیدانی

در مطالعه حاضر، فعالیت برخی از آنزیم های سیستم آنتی اکسیدانی از قبیل APX، DHAR، MDHAR و GR در سنبله و برگ پرچی گندم تحت شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی اندازه گیری شد. با توجه به شکل ۵ مشاهده می شود که در شرایط آبیاری کامل، سیستم آنتی اکسیدانی از فعالیت عادی خود برخوردار می باشد. اما با اعمال تنش خشکی، آنزیم های مذکور در هر دو اندام مورد مطالعه تحت تاثیر قرار می گیرند و فعالیت آن ها افزایش پیدا می کند که نشان دهنده فعالیت بیش تر سیستم آنتی اکسیدانی برای کنترل سطح ROS می باشد (Moumita *et al.*, 2019). حداکثر فعالیت این آنزیم ها در روزهای ۱۵ الی ۲۰ پس از گرده افشانی بود. به عبارت دیگر، با گذشت تعداد روزهای بیش تری از زمان پر شدن دانه،



شکل ۵- وضعیت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (APX، DHAR، MDHAR و GR) درگیر در چرخه آنتی‌اکسیدانی در سنبله‌ها و برگ‌های برچمی گندم پس از گرده‌افشانی تحت شرایط آبیاری کامل (FC) و شرایط تنش خشکی (DS). مقادیر با حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح $P < 0.05$ در هر تیمار آبیاری در طول زمان با توجه به آزمون چند دامنه دانکن می‌باشد.

Figure 5- Activity status of antioxidant enzymes (APX, DHAR, MDHAR and GR) involved in the antioxidant cycle in spikes and flag leaves of wheat after anthesis under Field capacity (FC) and Drought stress (DS) conditions. Values with different letters indicated the significant differences at $P < 0.05$ level in each stress treatment through time according to Duncan's multiple range test.



شکل ۶- تغییرات سطح رونوشت شش ژن آنزیمی چرخه آنتی اکسیدان در سنبله‌ها و برگ‌های پرچمی گندم پس از گرده‌افشانی در شرایط آبیاری کامل (FC) و تنش خشکی (DS). مقادیر با حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح $P < 0.05$ در هر تیمار آبیاری در طول زمان با توجه به آزمون چند دامنه دانکن می‌باشد.

Figure 6- Changes in the transcript level of six enzymatic genes in the antioxidant cycle in spikes and flag leaves of wheat after anthesis under Field capacity (FC) and Drought stress (DS) conditions. Values with different letters indicated the significant differences at $P < 0.05$ level in each stress treatment through time according to Duncan's multiple range test.

نمایش قدرت مند سازوکارهای مقاومت به تنش خشکی در سنبله نسبت به برگ پرچمی کاملاً بدیهی است. در اثر القای تنش در روند تولید ROSها اختلال ایجاد می شود و منجر به افزایش مقادیر آنها در سلول های گیاهی می شود (Gratao et al., 2005). چرخه آنتی اکسیدانی، که مهار ROSها را بر عهده دارد، در رونویسی ژن های پاسخ دهنده به تنش نیز مشارکت می کند (Kang et al., 2013). نتایج مشابهی در تحقیقات لو و همکاران (Lou et al., 2018) ارائه شده است.

نتیجه گیری

میزان تغییرات پارامترهای فتوسنتزی، فعالیت های آنزیمی و بیان ژن در سیستم آنتی اکسیدانی سنبله و برگ پرچمی گندم در دو شرایط آبی متفاوت (آبیاری کامل و تنش خشکی) مورد بررسی قرار گرفتند. روند تغییرات پارامترهای اندازه گیری شده در دو اندام مورد آزمایش متفاوت بود و عکس العمل متفاوتی نیز به شرایط تنش خشکی نشان دادند. سنبله در شرایط تنش خشکی در حفظ پارامترهای فتوسنتزی، میزان کلروفیل و میزان نسبی آب عملکرد مطلوب تری نسبت به برگ پرچمی داشت. همچنین فعالیت های آنزیمی و سطح رونوشت ژن های مورد مطالعه در سیستم آنتی اکسیدانی توسط تنش خشکی تحت تاثیر قرار گرفتند و نتایج نشان داد سنبله ظرفیت بهتری برای مقابله با تنش خشکی نسبت به برگ پرچمی دارد که همین امر فتوسنتز بالاتر و آسیب اکسیداسیون کمتر در سنبله را نیز توجیه می کند. به طور کلی در مطالعه حاضر، سنبله نسبت به برگ پرچمی نقش مهم تری در پاسخ به کمبود آب از طریق چرخه آنتی اکسیدانی داشت و نتایج این پژوهش در برنامه های به نژادی گندم می تواند نقش اساسی در انتخاب ارقام مقاوم به خشکی با عملکرد بالا ایفا کند.

در اثر تنش خشکی و یا کمبود آب در گیاه، تنش اکسیداتیو رخ می دهد که منجر به افزایش ROSها و در نهایت آسیب به متابولیسم عادی لیپیدها، پروتئین ها و اسیدهای نوکلئیک می شود که این مسئله یکی از دلایل اصلی کاهش عملکرد نیز است. پاسخ دفاعی گیاه در برابر تنش خشکی به صورت افزایش در فعالیت آنزیم هایی است که مربوط به چرخه آنتی اکسیدانی هستند. با فعالیت این آنزیم ها تحت تنش خشکی، گیاه از تحمل نسبی بالایی برخوردار می شود که بر عملکرد نهایی محصول نیز تاثیر گذار است (Zhong et al., 2009). نتایج مطالعه ممتاز خان و همکاران (Mumtaz-Khan et al., 2002) همسو با یافته های این مطالعه بود.

بیان ژن در سیستم آنتی اکسیدانی

در مطالعه حاضر بررسی سطوح رونویسی ژن های APX، MDHAR، DHAR و GR در سنبله و برگ پرچمی گندم در حد فاصل ۰، ۱، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روز پس از گرده افشانی تحت شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی با استفاده از qRT-PCR به همراه ژن GAPDH به عنوان شاهد داخلی اندازه گیری شد. افزایش بیان ژن های مرتبط با چرخه آنتی اکسیدانی در شرایط تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل، به نظر باعث تقویت توان گیاه به مقابله با کم آبی و حفظ ثبات عملکرد شده است (شکل ۶). در تایید این فرضیه، نتایج فعالیت های آنزیمی چرخه آنتی اکسیدانی که همسو با نتایج بیان ژن ها بود، بیش تر جلب توجه می کند (شکل ۵). به نظر می رسد، افزایش فعالیت های آنزیمی هم زمان با افزایش سطح رونوشت برداری ژن های سیستم آنتی اکسیدانی در سنبله ها و برگ پرچمی گندم، به منظور مقابله با آسیب های اکسیداتیو است. همچنین مطالعات مختلف نشان داده است در شرایط تنش خشکی، سنبله منبع اصلی جذب در طی پر شدن دانه است (Tambussi et al., 2007; Hein et al., 2016). لذا با توجه به نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر،

References

1. Abebe, T., Melmaiee, K., Berg, V., & Wise, R. P. (2010). Drought response in the spikes of barley: gene expression in the lemma, palea, awn, and seed. *Functional & Integrative Genomics*, 10 (2), 191-205. <https://doi.org/10.1007/s10142-009-0149-4>
2. Bagheri, A. R. (2013). Comparison of bread and durum wheat photosynthesis and yield under salt stress and salicylic applying condition. *Plant Ecophysiology*, 5(12), 1-11. (in Persian with English abstract).
3. Bajjii, M., Lutts, S., & Kinet, K. M. (2001). Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf aging in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars performing in arid conditions. *Plant Science*, 160(4), 669-681. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00443-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00443-X)
4. Chen, G. X., & Asada, K. (1989). Ascorbate peroxidase in tea leaves: occurrence of two isozymes and the differences in their enzymatic and molecular properties. *Plant Cell Physiology*, 30(7), 987-998. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a077844>
5. Ding, H., Liu, D., Liu, X., Li, Y., Kang, J., Lv, J., & Wang, G. (2018). Photosynthetic and stomatal traits of spike and flag leaf of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit. *Photosynthetica*, 56(2), 687-697. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0718-z>
6. Emam, Y. (2011). *Cereal production*. Shiraz University Press. Iran. (in Persian).

7. Gratao, P. L., Polle, A., Lea, P. J., & Azevedo, R. A. (2005). Making the life of heavy metal stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, 32(6), 481-494.
8. Grace, S. C., & Logan, B. A. (1996). Acclimation of foliar antioxidant systems to growth irradiance in three broadleaved evergreen species. *Plant Physiology*, 112(4), 1631-1640. <https://doi.org/10.1104/pp.112.4.1631>
9. Hein, J. A., Sherrard, M. E., Manfredi, K. P., & Abebe, T. (2016). The fifth leaf and spike organs of barley (*Hordeum vulgare* L.) display different physiological and metabolic responses to drought stress. *BMC Plant Biology*, 16, 1-12.
10. Huseynova, I. M. (2012). Photosynthetic characteristics and enzymatic antioxidant capacity of leaves from wheat cultivars exposed to drought. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1817, 1516-1523. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2012.02.037>
11. Jia, S., Lv, J., Jiang, S., Liang, T., Liu, C., & Jing, Z. (2015). Response of wheat ear photosynthesis and photosynthate carbon distribution to water deficit. *Photosynthetica*, 53(1), 95-109. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0087-4>
12. Kang, G. Z., Li, G. Z., Liu, G. Q., Xu, W., Peng, X. Q., Wang, C. Y., Zhu, Y. J., & Guo, T. C. (2013). Exogenous salicylic acid enhances wheat drought tolerance by influence on the expression of genes related to ascorbate-glutathione cycle. *Biologia Plantarum*, 57(4), 718-724. <https://doi.org/10.1007/s10535-013-0335-z>
13. Liu, E. K., Mei, X. R., Yan, C. R., Gong, D. Z., & Zhang, Y. Q. (2016). Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. *Agricultural Water Management*, 167, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.026>
14. Liu, S., Liu, S., Wang, M., Wei, T., Meng, C., Wang, M., & Xia, G. (2014). A wheat SIMILAR TO RCD-ONE gene enhances seedling growth and abiotic stress resistance by modulating redox homeostasis and maintaining genomic integrity. *Plant Cell*, 26(1), 164-180. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.118687>
15. Liu, Y., Liang, H., Lv, X., Liu, D., Wen, X., & Liao, Y. (2016). Effect of polyamines on the grain filling of wheat under drought stress. *Plant Physiology & Biochemistry*, 100, 113-129. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.01.003>
16. Lou, L., Li, X., Chen, J., Li, Y., Tang, Y., & Lv, J. (2018). Photosynthetic and ascorbate-glutathione metabolism in the flag leaves as compared to spikes under drought stress of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *PLOS ONE*, 13(3), 1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194625>
17. Martinez, D. E., Luquez, V. M., Bartoli, C. G., & Guiamet, J. J. (2003). Persistence of photosynthetic components and photochemical efficiency in ears of water-stressed wheat (*Triticum aestivum*). *Physiologia Plantarum*, 119(4), 519-525. <https://doi.org/10.1046/j.1399-3054.2003.00195.x>
18. Mitchell, R. A. C., Mitchell, V. J., & Lawlor, D. W. (2001). Response of wheat canopy CO₂ and water gas-exchange to soil water content under ambient and elevated CO₂. *Global Change Biology*, 7(5), 599-611. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2001.00431.x>
19. Moumita, M., Mahmud, J. A., Biswas, P. K., Nahar, K., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2019). Exogenous application of gibberellic acid mitigates drought-induced damage in spring wheat. *Acta Agrobotanica*, 72(2), 1-18. <https://doi.org/10.5586/aa.1776>
20. Mumtaz-Khan, M., Hendry, G. A. F., & Usman, M. (2002). Light promotes free radical processes in Citrus (*Citrus paradise* Macf.) seeds. *International Journal of Agriculture & Biology*, 4(2), 199-203.
21. Nezhadahmadi, A., Hossain-Prodhan, Z., & Faruq, G. (2013). Drought Tolerance in Wheat. *The Scientific World Journal*, 11(1), 610-721. <https://doi.org/10.1155/2013/610721>
22. Parvae, P., Mondanizadeh, M., Khansarinejad, B., & Emami-Razavi, A. N. (2016). To select the appropriate reference gene for normalizing the quantitative data to assess microRNAs in plasma samples of patients with gastric cancer. *Journal of Arak University Medical Sciences*, 19(5), 12-20. (in Persian with English abstract).
23. Pinto, M. C. D., Tommasia, F., & Garaa, L. D. (2000). Enzymes of the ascorbate biosynthesis and ascorbate-glutathione cycle in cultured cells of Tobacco Bright Yellow 2. *Plant Physiology & Biochemistry*, 38(7), 541-550. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(00\)00773-7](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(00)00773-7)
24. Poljakoff-Mayber, A., & Gale, J. (2012). *Physiological basis and practical problems of reducing transpiration*. pp. 277-306. Plant responses and control of water balance. in: T. T. Kozlowski eds. Academic Press Inc., New York.
25. Rawson, H. M., Richards, R. A., & Munns, R. (1988). An examination of selection criteria for salt-tolerance in wheat, barley and triticale genotypes. *Australian Journal of Agricultural Research*, 39(5), 759-772. <https://doi.org/10.1071/AR9880759>
26. Reddy, A. R., Chaitanya, K. V., & Vivekanandan, M. (2004). Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, 161(11), 1189-1202. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
27. Reynolds, M. P., Mujeeb-Kazi, A., & Sawkins, M. (2005). Prospects for utilizing plant-adaptive mechanisms to improve wheat and other crops in drought-and salinity-prone environments. *Annals of Applied Biology*, 146(2), 239-259. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.040058.x>
28. Robert, C., Bancal, M. O., Ney, B., & Lannou, C. (2005). Wheat leaf photosynthesis loss due to leaf rust, with

- respect to lesion development and leaf nitrogen status. *New Phytologist*, 165(1), 227-241. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01237.x>
29. Rubia, L., Rangan, L., Choudhury, R. R., Kamínek, M., Dobrev, P., Malbeck, J., Fowler, M., Slater, A., Scott, N., & Bennett, J. (2014). Changes in the chlorophyll content and cytokinin levels in the top three leaves of new plant type rice during grain filling. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33, 66-76.
 30. Sanchez-Bragado, R., Elazab, A., Zhou, B., Serret, M. D., Bort, J., Nieto-Taladriz, M. T., & Araus, J. L. (2014). Contribution of the ear and the flag leaf to grain filling in durum wheat inferred from the carbon isotope signature: genotypic and growing conditions effects. *Journal of Integrative Plant Biology*, 56(5), 444-454. <https://doi.org/10.1111/jipb.12106>
 31. Shahinnia, F., Le-Roy, J., Laborde, B., Sznajder, B., Kalambettu, P., Mahjourimajd, S., Tilbrook, J., & Fleury, D. (2016). Genetic association of stomatal traits and yield in wheat grown in low rainfall environments. *BMC Plant Biology*, 16, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0838-9>
 32. Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, 2012, 1-26.
 33. Siosemardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K., & Ebrahimzadeh, H. (2003). Stomatal and nonstomatal limitations to photosynthesis and their relationship with drought resistance in wheat cultivars. *Iranian Journal Agriculture Science*, 34(4), 93-106. (in Persian with English abstract).
 34. Smart, R. E., & Bingham, G. E. (1974). Rapid estimates of relative water content. *Plant Physiology*, 53(2), 258-260. <https://doi.org/10.1104/pp.53.2.258>
 35. Tambussi, E. A., Bort, J., Guíamet, J. J., Nogués, S., & Araus, J. L. (2007). The photosynthetic role of ears in C₃ cereals: metabolism, water use efficiency and contribution to grain yield. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/07352680601147901>
 36. Tambussi, E. A., Nogués, S., & Araus, J. L. (2005). Ear of durum wheat under water stress: water relations and photosynthetic metabolism. *Planta*, 221(3), 446-58. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1455-7>
 37. Turkan, I., Bor, M., Ozdemir, F., & Koca, H. (2005). Differential responses of lipid peroxidation and antioxidants in the leaves of drought-tolerant *P. acutifolius* Gray and drought-sensitive *P. vulgaris* L. subjected to polyethylene glycol mediated water stress. *Plant Science* 168(1): 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.032>
 38. Wardlaw, I. F. (2002). Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment. *Annals of Botany*, 90(4), 469-476. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf219>
 39. Xu, J., Zhang, Y., Guan, Z., Wei, W., Han, L., & Chai, T. (2008). Expression and function of two dehydrins under environmental stresses in *Brassica juncea* L. *Molecular Breeding*, 21, 431-438. <https://doi.org/10.1007/s11032-007-9143-5>
 40. Zhong, L., Xu, Y., & Wang, J. (2009). DNA-methylation changes induced by salt stress in wheat *Triticum aestivum*. *African Journal of Biotechnology*, 8(22), 6201-6207. <https://doi.org/10.5897/AJB09.1058>



Effect of Deficit Irrigation, Planting Date and Biofertilizers on Agro-Morphological Traits, Leaf Nitrogen and Carbon Concentration and Seed Yield on Quinoa under Ardabil conditions

M. Jabbari-oranj^{1*}, H. Moghadam², M. R. Jahansouz³, A. Ahmadi³, B. Motesharezadeh⁴

Received: 05-06-2022

Revised: 19-06-2022

Accepted: 04-07-2022

How to cite this article:

Jabbari-oranj, M., Moghadam, H., Jahansouz, M. R., Ahmadi, A., & Motesharezadeh, B. (2023). Effect of Deficit Irrigation, Planting Date and Biofertilizers on Agro-Morphological Traits, Leaf Nitrogen and Carbon Concentration and Seed Yield on Quinoa under Ardabil conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 75-89. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76560.1170>

Introduction

The most important problem that threatens food security of any country and the world is the lack of adequate water resources, so one of the ways to deal with this crisis is to use plants with low water requirements and high water use efficiency. Among the plants, we can name Quinoa, which is one of the plants that has been less studied and exploited in Iran. Since the planting date has the greatest impact on the physiological characteristics of the crop compared to other cropping treatments, so choosing the appropriate planting date can also create the greatest correlation between plant growth trends and climatic conditions. Undoubtedly, the use of biological fertilizers, in addition to the positive effects it has on all soil properties, is also economically, environmentally and socially fruitful and can be a suitable and desirable alternative to chemical fertilizers. Therefore, the aim of this study was to determine the response to deficit irrigation, planting date and application of different biofertilizers in quinoa.

Materials and Methods

This experiment was carried out during two cropping years 2019 and 2020 in a farm located in Moghan region. The site has latitude of 39°27' N, a longitude of 48°12' E and is 120 m above mean sea level, with an average annual rainfall of 250-300 mm. In this experiment, Titicaca cultivar of quinoa was cultivated in summer in the form of a double split plot design based on a randomized complete block design with three replications. Experimental factors include irrigation at three levels (Conventional irrigation, Irrigation cut-off in budding stage and Irrigation cut-off in seed filling stage) as a main factor, planting date at three levels (27 July, 11 and 27 August) as a sub-factor and four levels of nitrogen biofertilizer (without inoculation, seed inoculation with Azotobacter, seed inoculation with Azospirillum and inoculation with a mixture of Azotobacter and Azospirillum) were considered as a sub-sub-factor. Plant height, stem diameter and panicle length in each plant were measured at the physiological maturity stage by randomly selecting 10 plants using a ruler with millimeter accuracy. Leaf area was measured by selecting 5 plants from each plot randomly and with the model Leaf area meter Li-cor. At the end of the growing season, the product of two middle planting lines with a length of 4 meters was harvested by observing the half-meter margin effect and after drying in a ventilated oven at 70 °C for

1- Ph.D. Student of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Professor, Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(* - Corresponding Author Email: mjabbari-oranj@ut.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76560.1170>

24 hours, grain yield was determined. Leaf carbon concentration was estimated by dry combustion with air flow in an electric furnace, Kjeldahl method (Sharpe *et al.*, 2001) was used to measure nitrogen concentration. Experimental data were analyzed before analysis of variance for homogeneity of test errors through Bartlett test and then analyzed using SAS (9.1) software and comparison of means at 5% probability level using Duncan multi-range test.

Results and Discussion

The results showed that conventional irrigation with planting date of 27 August and inoculation of Azotobacter and Azospirillum biofertilizers had the best effect in terms of morphological traits and leaf nitrogen concentration and The highest grain yield (304.97 g.m^{-2}) was obtained from conventional irrigation treatment with planting date of 27 August and inoculation of biofertilizers of Azotobacter and Azospirillum. Also, quinoa seed yield had a positive and significant correlation with plant height ($r=0.85$), stem diameter ($r=0.64$), leaf area ($r=0.86$), panicle length ($r=0.86$) and leaf carbon concentration ($r=0.38$) showed.

Conclusion

The results of this study showed though conventional irrigation with planting date of 20 August and inoculation of Azotobacter and Azospirillum biofertilizers had the highest number of studied traits, especially grain yield (304.97 g.m^{-2}), but with interruption of irrigation treatment at the stage of seed filling with planting date of 20 August and inoculation of biofertilizers were included in a statistical group, so in terms of the importance of water consumption, it can be said that in conditions of limited water resources, irrigation cut-off treatment in the stage of grain filling has the most favorable results.

Keywords: Azospirillum, Azotobacter, Drought stress, Irrigation management

تاثیر کم آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی بر صفات اگرومورفولوژیک، غلظت نیتروژن و کربن برگ و عملکرد دانه کینوا در شرایط اردبیل

محمد جباری اورنج^{۱*}، حسین مقدم^۲، محمدرضا جهانسوز^۳، علی احمدی^۴، بابک متشرع زاده^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳

چکیده

به منظور بررسی اثر آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی بر صفات اگرومورفولوژیک، غلظت کربن برگ، غلظت نیتروژن برگ، نسبت کربن به نیتروژن برگ و عملکرد دانه کینوا، آزمایشی در مزرعه‌ای واقع در شهرستان بیله سوار (منطقه مغان) استان اردبیل در دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۴۰۰ در قالب طرح کرت‌های دوبار خرد شده بر مبنای طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عامل‌های آزمایشی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری معمولی، قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه) به عنوان فاکتور اصلی، تاریخ کاشت در سه سطح (۵ مرداد، ۲۰ مرداد و ۵ شهریور) به عنوان فاکتور فرعی و چهار سطح کود زیستی نیتروژنه (بدون تلقیح، تلقیح بذر با ازتوباکتر، تلقیح بذر با آزوسپیریوم و تلقیح با مخلوط ازتوباکتر و آزوسپیریوم) به عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که آبیاری معمولی با تاریخ کاشت ۲۰ مرداد و تلقیح توام کودهای زیستی ازتوباکتر و آزوسپیریوم بیشترین تاثیر را بر صفات مورفولوژیک و غلظت نیتروژن برگ داشته و بیشترین عملکرد دانه (۳۰۴/۹۷ گرم بر مترمربع) نیز در همین شرایط به دست آمد. همچنین عملکرد دانه کینوا همبستگی مثبت و معنی دار با ارتفاع بوته ($r=0/85$)، قطر ساقه ($r=0/64$)، سطح برگ ($r=0/86$)، طول پانیکول ($r=0/86$) و غلظت کربن برگ ($r=0/38$) نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آزوسپیریوم، ازتوباکتر، تنش خشکی، مدیریت آبیاری

مقدمه

مهم‌ترین مشکلی که امنیت غذایی کشور و جهان را تهدید می‌کند کمبود منابع آب مناسب است. خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی در ایران است (Abolhassani-Zeraatkar et al., 2008). از طرفی تلاش‌های اخیر در راستای خودکفایی در تولید، فشار بیشتری بر منابع آب وارد نموده و قطعاً با روند کنونی که آب و

هوای ایران به سمت گرم و خشک شدن تغییر می‌یابد، منابع آب در بخش کشاورزی دچار آسیب جدی خواهد شد. یکی از راهکارهای مقابله با این بحران استفاده از گیاهانی با نیاز آبی پایین و کارایی مصرف آب بالا می‌باشد از جمله گیاهان با این ویژگی‌ها می‌توان کینوا (*Chenopodium quinoa willd*) را نام برد و از گیاهانی است که در ایران کمتر مورد بررسی و بهره‌برداری قرار گرفته است. از آنجا که تاریخ کاشت نسبت به سایر تیمارهای زراعی بیشترین تاثیر را بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه زراعی می‌گذارد، بنابراین انتخاب تاریخ کاشت مناسب نیز می‌تواند بیشترین تطابق را میان روند رشد گیاه و شرایط اقلیمی ایجاد کند (Gharineh et al., 2019). کشور ایران دارای تنوع اقلیمی متنوعی است. کشت کینوا موجب ایجاد تنوع در محصولات زراعی، تولید پایدار، ایجاد افزایش درآمد کشاورزان و امنیت غذایی خواهد شد. از یک طرف تأمین غذای کافی و دارای کیفیت مناسب برای جمعیت روزافزون جهان و از طرف دیگر مشکلات زیست‌محیطی ناشی از کاربرد کودهای شیمیایی، هزینه‌های تولید و مصرف آن‌ها، تجدیدنظر در روش‌های

- ۱- دانشجوی دکتری گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۲- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۳- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۴- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

(*) نویسنده مسئول:
Email: mjabbari.oranj@ut.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76560.1170>

افزایش تولید محصولات زراعی را ضروری ساخته است.

در کشاورزی تجاری امروزی استفاده بی‌رویه و نامتعادل از کودهای شیمیایی باعث تخریب خاک و از بین رفتن موجودات خاکزی و در نتیجه سبب شده است تولید حاصلخیزی خاک و کیفیت محصولات تولیدی کاهش پیدا کند. با توجه به موارد یاد شده می‌توان با مدیریت مصرف آب و سیستم‌های مختلف تغذیه‌ای، شرایط را به گونه‌ای فراهم آورد که گیاه تحت آن وضعیت، پتانسیل بالقوه خود را ظاهر نموده و به حداکثر عملکرد کمی و کیفی دست یابد. از این رو بایستی کاربرد فرآورده‌های زیستی برای تغذیه گیاهان زراعی به‌عنوان راهکاری بنیادین در کشاورزی پایدار مدنظر قرار گیرد (Hamzei & Salimi, 2015). کودهای زیستی که جزء ضروری کشاورزی ارگانیک محسوب می‌شوند، حاوی موجودات زنده با گونه‌های کارآمد تثبیت‌کننده نیتروژن و حل‌کننده‌ی فسفات هستند که برای بذر، خاک یا محل‌های حاوی کمپوست با هدف افزایش تعداد این میکروارگانیسم‌ها و سرعت بخشیدن به فرایندهای میکروبی که دسترسی به عناصر غذایی را برای آسیمیلایون مناسب در گیاهان مهیا می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Venkateshwarlu, 2008). کاربرد کودهای بیولوژیک علاوه بر اثرات مثبتی که بر کلیه خصوصیات خاک دارد، از جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی نیز مفید بوده و می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب و مطلوب برای کودهای شیمیایی باشد. آزوسپیریلوم و ازتوباکتر از میکروارگانیسم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن مولکولی هستند که در همیاری با ریشه‌ی گیاهان، رشد آن‌ها را تقویت نموده و مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی افزایش داده بنابراین می‌توانند نقش کلیدی در حاصلخیزی خاک و حفاظت محیط ایفا کنند (Itelima et al., 2018). از آنجایی که مطالعات زیادی در خصوص آبیاری، تاریخ کاشت مناسب و تغذیه گیاه کینوا صورت نگرفته است بنابراین هدف از انجام این تحقیق مشخص شدن واکنش به کم آبیاری، تاریخ کاشت و کاربرد کودهای مختلف زیستی در این گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در طی دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۸ در مزرعه‌ای واقع در منطقه مغان (شهرستان بيله سوار)، روستای بابک، با موقعیت جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی و عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۲۰ متر از سطح دریا، که از نظر آب و هوایی و طبقه‌بندی اقلیمی جزو مناطق معتدل گرم با متوسط بارش سالیانه ۲۵۰-۳۰۰ میلی‌متر و با میانگین حداکثر دمای سالیانه ۲۰ و میانگین حداقل دمای سالیانه ۸ درجه سانتی‌گراد^۱ بوده اجرا شد.

۱- مأخذ: اداره کل هواشناسی استان اردبیل

ویژگی‌های خاک محل آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مطابق جدول ۱ بود. همچنین آمار هواشناسی منطقه در سال‌های اجرای آزمایش به شرح جدول ۲ بود.

در این آزمایش گیاه کینوا رقم تی تی کاکا به‌صورت تابستانه و در قالب طرح کرت‌های دوبار خرد شده بر مبنای طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار کشت گردید. فاکتورهای آزمایش شامل آبیاری به‌عنوان فاکتور اصلی در سه سطح (آبیاری معمولی، قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه)، تاریخ کاشت به‌عنوان فاکتور فرعی در سه سطح (۵ مرداد، ۲۰ مرداد و ۵ شهریور)^۲ و چهار سطح کود زیستی نیتروژنه (بدون تلقیح، تلقیح بذر با ازتوباکتر، تلقیح بذر با آزوسپیریلوم و تلقیح با مخلوط ازتوباکتر و آزوسپیریلوم) به‌عنوان فاکتور فرعی فرعی در نظر گرفته شد. به منظور تهیه بستر کاشت شخم اولیه زمین در ۲۵ اردیبهشت ماه و عملیات نهایی آماده‌سازی از قبیل شخم سطحی و تسطیح قبل از کاشت انجام گرفت. همچنین قبل از اجرای آزمایش از خاک محل اجرای طرح نمونه‌برداری و آنالیز شد و بر اساس نتایج آزمون خاک کود فسفره^۳ مورد نیاز به‌صورت فسفات آمونیوم و نیتروژن به‌صورت اوره در زمین پخش و با خاک مخلوط گردید. عملیات کاشت کینوا در تاریخ کاشت‌های ذکر شده به‌صورت دستی انجام شد. در این آزمایش فاصله ردیف ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۵ الی ۱۰ سانتی‌متر (به‌طور متوسط ۷ سانتی‌متر با تراکم ۲۸۵۷۰۰ بوته در هکتار) در نظر گرفته شد. جهت دستیابی به تراکم فوق، ابتدا بذر با تراکم بالا کشت شده و سپس با عملیات تنک تراکم مورد نظر حاصل گردید. برای تلقیح بذر کینوا، کودهای زیستی ازتوباکتر کرکوکوم MG386293 و آزوسپیریلوم برازیلنس MH130055، با تعداد ۱۰^۸ سلول زنده در یک میلی‌لیتر محلول از هر کدام از باکتری‌ها، از موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه گردید. همچنین از محلول صمغ عربی برای چسبندگی بهتر مایه تلقیح بذر با استفاده شد. کلیه عملیات در محیط سایه و دور از نور آفتاب انجام گرفت و بذر با پس از خشک شدن کشت شدند. اولین نوبت آبیاری بلافاصله بعد از پایان کشت در تاریخ کاشت‌های مشخص شده به روش نواری یا تیپ داده شد. مبارزه با علف‌های هرز در طول دوره رشد به‌صورت دستی و برای مبارزه با آفات از آفت‌کش‌های شیمیایی کنفیدور و لاروین استفاده گردید.

۲- مبنای انتخاب تاریخ‌های کاشت به توصیه موسسه تحقیقات اصلاح نهال و بذر کرج و شرایط و عرف منطقه

۳- حد بحرانی فسفر در خاک‌های زراعی ۷-۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و حد بهینه آن ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (Malakoti et al., 2005) بنابراین میزان فسفر مورد نیاز بر اساس آزمون خاک قبل از کاشت با خاک مخلوط گردید.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of test soil

K(ave) (ppm)	P(ave) (ppm)	N Total (%)	Organic carbon (%)	Soil Texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Lime (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)
509	9.6	0.08	0.76	Clay	22	32	46	17.5	7.5	1.77

جدول ۲- آمار هواشناسی مربوط به فصل رویش کینوا در دوره دو ساله (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹)

Table 2- Weather data for quinoa growing season during two year (2019 and 2020)

Table 2: Weather data for quince growing season during two year (2019 and 2020)										
	تبخیر Evaporation (mm)		بارندگی Rainfall (mm)		رطوبت نسبی relative humidity (%)		میانگین دمای حداقل Mean min. temperature (°C)		میانگین دمای حداکثر Mean max. temperature (°C)	
	1399	1398	1399	1398	1399	1398	1399	1398	1399	1398
مرداد (July - Aug)	247.1	250.6	3.6	0	53	47	21.7	21.8	32.1	33.2
شهریور (Aug - Sep)	220.4	129.5	34.2	43.2	60	64	17.9	17.9	29.8	27.8
مهر (Sep - Oct)	87.4	133.4	28.0	10.1	71	68	13.9	15.1	24.1	25.3
آبان (Oct - Nov)	61.4	87.0	10.5	20.3	78	69	10.5	8.1	18.3	17.9
آذر (Nov - Dec)	15.3	28.3	36.5	29.2	85	78	4.1	4.4	9.1	11.3
جمع (Total)	631.6	628.8	112.8	102.8	-	-	-	-	-	-
میانگین (Average)	-	-	-	-	69.4	65.2	13.6	13.5	22.7	23.1

* مأخذ: اداره کل هواشناسی استان اردبیل

$$(۱) \quad \text{وزن نمونه به گرم} = \frac{0.014 \times 100 \times \text{نرمالیت اسید مصرفی} \times \text{حجم اسید مصرفی میلی لیتر}}{\text{درصد نیتروژن نمونه}}$$

داده‌های آزمایش قبل از تجزیه واریانس برای اطمینان از یکنواختی واریانس‌ها با آزمون بارتلت مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه (۹/۱) تجزیه گردید. مقایسه میانگین‌ها نیز در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت گرفت.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

ارتفاع بوته در کینوا تحت تاثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت و هر یک از اثرات ساده سال، آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار شد، همچنین مقایسه میانگین‌ها اثر متقابل معنی‌داری بین آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال پنج درصد نشان داد (جدول ۳). به طوری که بیش‌ترین ارتفاع بوته (۸۷/۲۸ سانتی‌متر) از تیمار آبیاری معمولی با تاریخ کاشت ۲۰ مرداد و تلقیح توام با کودهای زیستی ازتوباکتر و آزوسپیریوم و کمترین ارتفاع بوته (۴۳/۹۵ سانتی‌متر) از تیمار قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی با تاریخ کاشت پنج شهریور و عدم تلقیح بذر با کود زیستی به‌دست آمد (جدول ۴).

صفات مورد اندازه‌گیری شامل ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، طول پانیکول، غلظت کربن برگ^۱، غلظت نیتروژن برگ، نسبت کربن به نیتروژن و عملکرد دانه بود. جهت اندازه‌گیری ارتفاع بوته، قطر ساقه و طول پانیکول در هر بوته، در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک تعداد ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی انتخاب (Modarres Sanavi & Soroushzadeh, 2003; Omid et al., 2021) و با استفاده از خط‌کش و با دقت میلی‌متری اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها برای هر کرت محاسبه گردید. جهت اندازه‌گیری سطح برگ با انتخاب پنج بوته از هر کرت به‌صورت تصادفی و اندازه‌گیری با دستگاه سطح برگ‌سنج مدل Leaf area meter Li-core. USA صورت گرفت (Jamali & Ansari, 2020). در پایان فصل رشد، محصول دو خط کاشت وسطی به طول چهار متر با رعایت نیم متر اثر حاشیه از طرفین برداشت شد و پس از خشک شدن در آون تهویه دار با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، عملکرد دانه تعیین گردید (Emam & Pirasteh, 2014). غلظت کربن برگ به روش احتراق خشک با جریان هوا در کوره الکتریکی برآورد گردید (IPCC, 2006). برای اندازه‌گیری غلظت نیتروژن از روش کج‌لدال (Sharpe et al., 2001) استفاده گردید و درصد نیتروژن از رابطه (۱) به‌دست آمد:

۱- کربن یکی از عناصر مهم در ساختار گیاهان بوده و عنصر سازنده تمام ترکیبات آلی همچون قندها، پروتئین‌ها و اسیدهای آلی است این ترکیبات در عناصر بنیادی، واکنش‌های آنزیمی و ماده ژنتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Deming, 2010).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مرکب برخی صفات رشدی مورد بررسی در گیاه کینوا تحت تأثیر آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی
Table 3- Results of combined ANOVA of some growth traits of quinoa as affected by irrigation, planting date and biofertilizers

منبع تغییرات Sources of Variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean of squares)							عملکرد دانه SY
		ارتفاع بوته PH	قطر ساقه SD	سطح برگ LA	طول پانیکول PL	کربن برگ Leaf C%	نیتروژن برگ Leaf N%	نسبت کربن به نیتروژن C:N Ratio	
سال (Y)	1	1061.34**	0.15**	56.03**	238.35**	0.77 ^{ns}	0.029*	1.15*	1310.78*
خطا ۱ (Error1)	4	6.72	0.003	0.03	0.002	0.17	0.019	0.78	63.66
آبیاری (Irrigation (I)	2	9494.71**	0.046*	253.22**	213.17**	90.3**	4.736**	473.34**	174594.89**
سال×آبیاری (Year ×Irrigation)	2	2.97 ^{ns}	0.009 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.051 ^{ns}	1.35*	0.002 ^{ns}	0.75*	55.30 ^{ns}
خطا ۲ (Error2)	8	2.31	0.009	0.05	0.013	0.65	0.009	0.79	52.10
تاریخ کاشت (Planting date (P.D)	2	5461.62**	0.002 ^{ns}	33.15**	458.26**	93.01**	0.029*	9.55**	15545.20**
کود (Fertilizer (F)	3	456.34**	0.049*	10.11**	83.81**	98.74**	2.082**	71.71**	28654.21**
تاریخ کاشت×کود (Planting date×Fertilizer)	6	17.68*	0.001*	2.03**	8.32**	0.63 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.55 ^{ns}	1012.16*
سال×تاریخ کاشت (Year×planting date)	2	2.77 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.026 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.21 ^{ns}	60.89 ^{ns}
سال×کود (Year×Fertilizer)	3	0.75 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.09 ^{ns}	63.12 ^{ns}
سال×تاریخ کاشت×کود (Year×Planting ×Fertilizer)	6	2.02 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.18 ^{ns}	52.36 ^{ns}
آبیاری×تاریخ کاشت (Irrigation×planting date)	4	403.57**	0.011*	3.38**	34.26**	7.09**	0.193**	16.24**	6466.88**
آبیاری×کود (Fertilizer× Irrigation)	6	8.83*	0.002*	5.53**	2.96*	6.23**	0.039*	2.86**	1493.74**
آبیاری×تاریخ کاشت×کود (Year×planting ×Irrigation)	12	21.67*	0.012*	2.52**	2.33*	4.99**	0.026*	2.12*	814.50*
سال×آبیاری×تاریخ کاشت (Year×Irrigation×date)	4	2.48 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.22 ^{ns}	53.60 ^{ns}
سال×آبیاری×کود (Year×Irrigation×Fertilizer)	6	1.23 ^{ns}	0.006 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.06 ^{ns}	53.71 ^{ns}
سال×آبیاری×تاریخ کاشت×کود (Y×I× P.D×F)	12	1.44 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.34 ^{ns}	59.457 ^{ns}
اشتباه آزمایشی Error	44	11.62	0.001	0.57	1.41	1.46	0.009	0.09	355.36
ضریب تغییرات CV (%)	-	5	3.4	3.2	6.9	3.0	4.3	5.2	8.5

^{ns}, *, ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح ۵ و ۱ درصد

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

PH: Plant Height, SD: Stem Diameter, LA: Leaf Area, PL: Panicle Length, Leaf C%: Leaf Carbon concentration, Leaf N%: Leaf Nitrogen concentration; SY: Seed Yield

گیاهی از جمله اکسین به طور مستقیم سبب افزایش رشد ساقه شده و با تولید سیتوکینین بر روی آنزیم‌های لیپاز و پروتئاز اثر منفی گذاشته و مانع تجزیه پروتئین در محیط داخلی سلول شده و از این طریق باعث تقسیم سلولی و افزایش قطر ساقه موثر می‌شوند (Mohammadvarzi et al., 2011). قطر ساقه با سطح برگ، ارتفاع بوته، طول پانیکول، عملکرد دانه، غلظت کربن برگ، همبستگی مثبت و معنی‌دار و با غلظت نیتروژن برگ و نسبت کربن به نیتروژن برگ همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد (جدول ۵).

سطح برگ

سطح برگ در کینوا تحت تاثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت و هر یک از اثرات ساده سال، آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال ۱ درصد بر اساس نتایج تجزیه مرکب معنی‌دار شد، همچنین اثر متقابل سه‌گانه آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). به طوری که بیش‌ترین سطح برگ (۲۷/۲۳ سانتی‌متر مربع در بوته) از تیمار آبیاری معمولی با تاریخ کاشت ۲۰ مرداد و تلقیح توام از توباکتر و آزوسپیریلوم و کمترین سطح برگ (۱۹/۷۱ سانتی‌متر مربع در بوته) از قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی با تاریخ کاشت پنج شهریور و عدم تلقیح بذر با کود زیستی به‌دست آمد (جدول ۴). بنابراین با کاهش آبیاری، تاخیر در کاشت و عدم کاربرد کود زیستی سطح برگ کاهش یافت. کاهش سطح برگ یکی از نخستین نشانه‌های تنش کمبود آب در گیاه می‌باشد (Boem & Thomas, 1998). کودهای زیستی از طریق افزایش فعالیت‌های بیولوژیک و بالابردن ظرفیت تبادل کاتیونی، موجب بهبود ساختمان خاک می‌شوند. که این عامل ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک را افزایش داده و شرایط مناسب‌تری برای رشد گیاه فراهم می‌کند (Amiryousefi et al., 2020). افزایش سطح برگ گیاه ذرت بر اثر تلقیح بذر با ازتوباکتر تا حدود ۶۵ درصد گزارش گردید (Gholami & Nezarat, 2009). بنابراین می‌توان گفت که باکتری‌های موجود در کود زیستی نیتروژنه علاوه بر تثبیت نیتروژن هوا و متعادل کردن جذب عناصر پر مصرف و کم‌مصرف با سنتز و ترشح مواد محرک رشد و همچنین ترشح اسیدهای آمینه مختلف موجب رشد و توسعه اندام هوایی گیاه می‌شوند. سطح برگ در کینوا با قطر ساقه، ارتفاع بوته، طول پانیکول، غلظت کربن برگ و عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار و با نسبت کربن به نیتروژن برگ همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد (جدول ۵). بنابراین می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع بوته، قطر ساقه و طول پانیکول افزایش یافته و در نهایت باعث افزایش عملکرد شده است.

بنابراین کاربرد کودهای زیستی به‌ویژه کاربرد توام آن‌ها ارتفاع بوته بیشتری داشت و در شرایط تنش رطوبتی شدید (قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی) و تاریخ کاشت پنج شهریور علی‌رغم این‌که کاربرد کودهای زیستی ارتفاع بوته بیشتری نسبت به عدم کاربرد داشت ارتفاع بوته به خاطر تنش رطوبتی و تاخیر در کاشت کاهش یافته است. به نظر می‌رسد با سرد شدن هوا، سرعت رشد رویشی کاهش یافته و گیاهان در ارتفاع کوتاه‌تری وارد مرحله زایشی شده‌اند. همچنین کاهش مقدار آب در دسترس به‌خصوص در ابتدای دوره گل‌دهی ضمن کاهش سرعت رشد رویشی و کوتاه کردن رشد زایشی، به‌طور غیر مستقیم بر ارتفاع بوته نیز تاثیر منفی دارد (Sivaramaiah et al., 2007). تیمار آبیاری باعث افزایش ارتفاع و رشد رویشی می‌شود (Rawson & Turner, 1982). کاربرد تلقیحی کودهای زیستی موجب افزایش معنی‌دار صفات رویشی کینوا از جمله ارتفاع بوته گردید (Amiryousefi et al., 2020). از این رو با استناد به مطالعات صورت گرفته، می‌توان گفت که کودهای زیستی اثرات مثبتی بر جذب بهتر عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن داشته بنابراین نقش زیادی در افزایش دسترسی نیتروژن و افزایش ارتفاع گیاه داشته است. ارتفاع بوته کینوا همبستگی مثبت و معنی‌داری با قطر ساقه، سطح برگ، طول پانیکول، غلظت کربن برگ و عملکرد دانه داشت و با نسبت کربن به نیتروژن برگ همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد (جدول ۵). در مطالعه (Iftikhar Hussain et al., 2020) نیز ارتفاع بوته با غلظت کربن برگ و عملکرد دانه رابطه مثبت نشان داد.

قطر ساقه

نتایج تجزیه مرکب اثرات ساده سال، آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی بر قطر ساقه کینوا را در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نشان داد (جدول ۳). همچنین در مقایسه میانگین‌ها اثر متقابل سه‌جانبه معنی‌داری بین آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال پنج درصد وجود داشت (جدول ۳). به طوری که بیش‌ترین قطر ساقه (۱۱/۷ میلی‌متر) از تیمار آبیاری معمولی با تاریخ کاشت پنج مرداد و تلقیح توام کودهای زیستی ازتوباکتر و آزوسپیریلوم و کمترین قطر ساقه (۱۰ میلی‌متر) از تیمار قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی با تاریخ کاشت پنج شهریور و عدم تلقیح بذر با کود زیستی به‌دست آمد (جدول ۴). بنابراین با افزایش شدت تنش، تاخیر در کاشت و عدم کاربرد کود زیستی قطر ساقه کاهش یافت. در کینوا با افزایش آب آبیاری ارتفاع بوته، قطر ساقه و عملکرد دانه افزایش یافت (Gharineh et al., 2019). افزایش قطر ساقه گیاه در تاریخ کاشت مناسب به دلیل بهره‌مندی بیشتر از عوامل محیطی نظیر دما، نور و عناصر غذایی گزارش شده است (Temel & Yolcu, 2020). باکتری‌های محرک رشد با دخالت در تولید هورمون‌های

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل سه جانبه (آبیاری×تاریخ کاشت×کودهای زیستی) بر صفات مورد ارزیابی کینوا

Table 4- Mean comparisons of the studied traits of quinoa as affected by irrigation, planting date, biofertilizers

				ارتفاع بوته (cm) PH	قطر ساقه (mm) SD	سطح برگ (cm ² .p ⁻¹) LA	طول پانیکول (cm) PL
آبیاری معمولی Conventional irrigation	کاشت ۵ مرداد (27 July)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	75.3 b-e	10.7 b-g	22.4 f-k	19.6 b-e
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	83.6 a-c	11.2 a-c	26.1 a-c	22.4 ab
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	82.9 a-c	11.2 a-c	25.9 a-d	22.0 a-c
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	82.4 a-c	11.7 a	26.6 ab	21.3 a-d
	کاشت ۲۰ مرداد (11 August)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	75.8 b-e	10.1 fg	22.7 e-j	18.7 c-g
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	80.1 a-c	10.9 a-f	25.0 a-f	21.9 a-c
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	82.4 a-c	10.7 b-g	25.0 a-f	22.4 ab
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	87.3 a	11.0 a-e	27.2 a	24.7 a
	کاشت ۵ شهریور (27 August)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	60.7 g-j	10.7 a-g	21.9 g-k	15.2 g-j
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	66.1 e-h	11.2 a-c	24.5 a-g	15.9 f-i
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	63.4 f-i	10.6 b-g	25.4 a-e	16.3 e-i
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	68.4 d-g	11.3 ab	25.0 a-f	16.9 e-i
قطع آبیاری در مرحله غنچه دهی Irrigation cut-off in budding stage	کاشت ۵ مرداد (27 July)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	58.7 g-j	10.2 e-g	20.6 i-k	12.7 j-l
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	62.4 g-i	10.3 c-g	23.1 d-i	14.8 h-j
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	58.8 g-j	10.7 b-g	21.2 h-k	13.7 i-k
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	63.9 f-i	10.7 b-g	23.4 c-i	14.6 i-j
	کاشت ۲۰ مرداد (11 August)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	51.1 j-l	10.1 fg	19.9 j-k	10.8 kl
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	53.1 i-l	10.2 d-g	21.2 h-k	12.7 j-l
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	54.3 i-l	10.6 b-g	20.8 i-k	13.5 i-k
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	56.3 h-k	10.5 b-g	21.5 h-k	13.9 i-k
	کاشت ۵ شهریور (27 August)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	43.9 l	10.0 g	19.7 k	9.8 l
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	47.6 kl	10.6 b-g	21.2 h-k	11.0 kl
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	50.3 j-l	10.6 b-g	20.7 i-k	10.7 kl
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	50.1 j-l	11.1 a-d	21.1 h-k	10.8 kl
قطع آبیاری در مرحله پرشدن دانه Irrigation cut-off in seed filling stage	کاشت ۵ مرداد (27 July)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	73.4 c-f	10.3 c-g	22.4 f-k	18.2 d-h
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	79.5 a-c	10.8 a-g	25.8 a-d	19.2 b-f
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	81.6 a-c	10.7 a-g	24.8 a-f	19.7 b-e
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	82.7 a-c	11.2 a-c	24.6 a-g	21.7 a-c
	کاشت ۲۰ مرداد (11 August)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	77.75a-d	10.5 b-g	21.34h-k	19.0 b-f
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	82.27 a-c	11.2 a-c	24.70 a-g	22.3 ab
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	84.95 ab	11.0 a-e	25.48 a-d	21.9 a-c
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	85.28 ab	11.2 a-c	25.77 a-d	24.4 a
	کاشت ۵ شهریور (27 August)	(Non-Inoculation)	عدم تلقیح	60.38 g-j	10.4 b-g	20.79 i-k	14.6 ij
		(Azotobacter)	ازتوباکتر	63.07 f-i	10.3 c-g	23.73b-h	16.3 e-i
		(Azospirillum)	آزوسپیریلام	60.08 g-j	10.9 a-f	22.39 f-k	16.3 e-i
		(Azoto+Azos)	ازتوباکتر+آزوسپیریلام	63.15 f-i	10.9 a-f	24.23b-g	16.9 e-i

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشابه، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

In each column, means followed by the same letters are not significantly different at the 5% level

ادامه جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل سه جانبه (آبیاری×تاریخ کاشت×کودهای زیستی) بر صفات مورد ارزیابی کینوا
Table 4- Mean comparisons of the studied traits of quinoa as affected by irrigation, planting date, biofertilizers

		غلظت کربن برگ Leaf C %	غلظت نیتروژن برگ Leaf N %	نسبت کربن به نیتروژن C:N Ratio	عملکرد دانه (gr,m ⁻²) SY
آبیاری معمولی Conventional irrigation	عدم تلقیح Non-) (Inoculation	39.3 c-i	1.69 p	23.33 a	232.8 c-l
	ازتوباکتر (Azotobacter)	42.1 a-e	2.08 g-l	20.35 c-i	264.2 a-g
	آزوسپیریوم (Azospirillum)	42.7 a-c	2.21 e-i	19.36 e-l	280.7 a-d
	ازتوباکتر+آزوسپیریوم (Azoto+Azos)	44.3 a	2.23 e-h	19.64 e-l	289.7 a-c
	عدم تلقیح Non-) (Inoculation	39.0 d-i	1.78 op	21.81 a-d	239.8 c-k
	ازتوباکتر (Azotobacter)	40.5 b-i	2.04 i-m	19.90 d-j	252.1 b-j
	آزوسپیریوم (Azospirillum)	42.7 a-c	1.92 l-o	20.22 c-h	266.3 a-e
	ازتوباکتر+آزوسپیریوم (Azoto+Azos)	43.0 ab	2.07 h-l	19.18 e-l	304.9 a
	عدم تلقیح Non-) (Inoculation	37.4 h-j	1.67 p	20.59 b-i	214.0 f-n
	ازتوباکتر (Azotobacter)	39.8 b-i	1.88m-o	18.81g-m	245.9 b-j
	آزوسپیریوم (Azospirillum)	38.2 f-j	1.95 k-o	18.10 j-n	278.1 a-e
	ازتوباکتر+آزوسپیریوم (Azoto+Azos)	40.3 b-i	2.09 f-k	17.74 k-n	286.9 a-d
قطع آبیاری در مرحله غنچه دهی Irrigation cut-off in budding stage	عدم تلقیح Non-) (Inoculation	39.4 c-i	2.15 f-j	21.11 b-e	182.4 k-p
	ازتوباکتر (Azotobacter)	42.4 a-d	2.49 cd	19.79 d-k	198.3 h-p
	آزوسپیریوم (Azospirillum)	41.6 a-f	2.36 de	18.72h-m	192.3 j-p
	ازتوباکتر+آزوسپیریوم (Azoto+Azos)	42.1 a-e	2.60 a-c	18.93 f-l	193.7 h-p
	عدم تلقیح Non-) (Inoculation	39.0 d-i	2.13 f-j	22.18 a-c	134.2 qr
	ازتوباکتر (Azotobacter)	41.0 a-h	2.59 a-c	20.89 b-g	158.3 n-r
	آزوسپیریوم (Azospirillum)	40.3 b-i	2.58 a-c	21.05 b-f	183.4 k-q
	ازتوباکتر+آزوسپیریوم (Azoto+Azos)	40.8 b-h	2.72 a	19.81 d-k	165.0 m-r
	عدم تلقیح Non-) (Inoculation	37.6 g-j	2.12 f-k	22.67 ab	125.3 r
	کاشت ۵ مرداد				

قطع آبیاری در مرحله پرشدن دانه Irrigation cut-off in seed filling stage	شهریور (27 August)	(Inoculation ازتوباکتر (Azotobacter)	39.4 c-i	2.54 bc	21.02 b-f	148.5 p-r
		آزوسپیریلام (Azospirillum)	40.3 b-i	2.58 a-c	20.83 b-h	153.6 o-r
		ازتوباکتر+آزوسپیریلام (Azoto+Azos)	39.0 d-i	2.68 ab	18.68 i-m	176.5 l-r
		عدم تلقیح (Inoculation Non-)	37.7 g-j	1.87m-o	17.57 l-n	211.2 g-o
	کاشت ۵ مرداد (27 July)	ازتوباکتر (Azotobacter)	38.7 e-i	2.15 f-j	15.57 op	256.1 a-h
		آزوسپیریلام (Azospirillum)	39.7 b-i	2.23 e-h	16.85 op	239.7 c-k
		ازتوباکتر+آزوسپیریلام (Azoto+Azos)	39.9 b-i	2.26 e-g	15.3 m-o	273.0 a-f
		عدم تلقیح (Inoculation Non-)	37.7 g-j	1.79m-o	17.69 k-n	221.2 e-m
	کاشت ۲۰ مرداد (11 August)	ازتوباکتر (Azotobacter)	38.6 e-i	1.98 j-n	14.95 op	255.4 a-h
		آزوسپیریلام (Azospirillum)	39.4 c-i	2.12 f-k	15.30 op	255.2 a-h
		ازتوباکتر+آزوسپیریلام (Azoto+Azos)	40.4 b-i	2.24 e-h	14.84 op	300.6 ab
		عدم تلقیح (Inoculation Non-)	34.8 j	1.83m-o	16.42 n-p	168.2 m-r
	کاشت ۵ شهریور (27 August)	ازتوباکتر (Azotobacter)	37.1 ij	2.12 f-k	14.64 op	196.6 i-p
		آزوسپیریلام (Azospirillum)	39.1 d-i	2.11 f-k	15.10 op	231.5 d-l
		ازتوباکتر+آزوسپیریلام (Azoto+Azos)	40.4 b-i	2.27 ef	15.10 p	229.6 c-l
		عدم تلقیح (Inoculation Non-)	34.8 j	1.83m-o	16.42 n-p	168.2 m-r

در هرستون میانگین‌های با حروف مشابه، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

In each column, means followed by the same letters are not significantly different at the 5% level

طول پانیکول

سال، آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال ۱ درصد بر طول پانیکول کینوا تاثیر معنی‌دار داشت. همچنین مقایسه میانگین‌ها اثر متقابل معنی‌داری بین آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال پنج درصد نشان داد (جدول ۳). به طوری‌که بیش‌ترین طول پانیکول (۲۴/۶۸ سانتی‌متر) از تیمار آبیاری معمولی با تاریخ کاشت ۲۰ مرداد و تلقیح توام بذر با ازتوباکتر و آزوسپیریلام به‌دست آمد که با تیمار قطع آبیاری در مرحله پرشدن دانه در یک گروه آماری قرار گرفت و کمترین طول پانیکول (۹/۷۸ سانتی‌متر) از تیمار قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی با تاریخ کاشت ۵ شهریور و

عدم تلقیح بذر با کود زیستی به‌دست آمد، در هر سه تاریخ کاشت و هر سه سطح آبیاری کاربرد کودهای زیستی به‌خصوص کاربرد توام باعث افزایش طول پانیکول شده و با تاخیر در کاشت طول پانیکول کاهش یافت و از لحاظ آبیاری، تیمار قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی در هر سه تاریخ کاشت و سطوح کود زیستی تاثیر معنی‌داری بر کاهش طول پانیکول داشت (جدول ۴). نتایج یک تحقیق نشان داد که تنش آبی بر روی خواص رشدی گیاه کینوا نظیر طول سنبله اثر دارد (Jamali et al., 2020). در پژوهش دیگری در هند شاخص‌های رشدی کینوا به‌طور قابل‌توجهی تحت تاثیر تاریخ کاشت قرار گرفت و این تفاوت‌ها به تغییر در میزان دما، نور و بارندگی در زمان‌های مختلف کاشت نسبت داده شد (Hirich et al., 2014). کاهش طول

کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال پنج درصد نشان داد (جدول ۳). به طوری که بیش ترین غلظت نیتروژن برگ (۲/۷۲ درصد) از تیمار قطع آبیاری در مرحله غنچه دهی با تاریخ کاشت ۲۰ مرداد و تلقیح توام از تو باکتر و آزوسپیریوم و کمترین میزان نیتروژن برگ (۱/۶۷ درصد) از تیمار آبیاری معمولی با تاریخ کاشت پنج شهریور و عدم تلقیح کود زیستی به دست آمد (جدول ۴). هر چند که کاربرد کودهای زیستی به خصوص کاربرد توام از تو باکتر و آزوسپیریوم نسبت به عدم تلقیح بذر با کود زیستی باعث افزایش میزان نیتروژن برگ گردیده است ولی با کاهش سطوح آبیاری (افزایش تنش خشکی) در تمام تاریخ های کاشت و سطوح کود زیستی افزایش غلظت نیتروژن برگ مشهود بود (جدول ۴). در یک مطالعه حداکثر غلظت نیتروژن برگ (۲/۲۳ درصد) و حداقل آن (۱/۴ درصد) گزارش شد (Iftikhar Hussain et al., 2020). در مطالعه دیگری با کاهش رطوبت خاک، شاخص کلروفیل برگ و غلظت نیتروژن بخش هوایی یونجه به طور معنی داری افزایش نشان داد (Zhang et al., 2014). همچنین تلقیح باکتری غلظت نیتروژن بخش هوایی و ریشه یونجه را به طور معنی داری افزایش داد (Markarian et al., 2015). افزایش غلظت نیتروژن بخش هوایی با کاهش رطوبت خاک را می توان به اثر تغلیظ نسبت داد، یعنی سرعت رشد بخش هوایی گیاه با کاهش رطوبت خاک بیشتر از سرعت جذب نیتروژن کاهش می یابد (Marschner, 1995). افزایش غلظت نیتروژن بخش هوایی در تیمار تلقیح باکتری نشان دهنده اثر بخشی تلقیح باکتری در تثبیت بیولوژیک نیتروژن هوا و انتقال آن به بخش های هوایی گیاه است (Markarian et al., 2015). در آزمایشی با تلقیح گیاه ذرت (Zea mays) با باکتری آزوسپیریوم جذب نیتروژن ۱۷ درصد افزایش یافت که باعث توسعه سیستم ریشه ای شده و به طور طبیعی امکان دسترسی و جذب بهتر عناصر غذایی را برای گیاه فراهم می سازد (Sepehri & Shahbazi, 2020). غلظت نیتروژن برگ با قطر ساقه و سطح برگ همبستگی منفی و معنی دار نشان داد (جدول ۵).

نسبت کربن به نیتروژن برگ

نسبت کربن به نیتروژن برگ در کینوا از نظر اثرات ساده سال، آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی تفاوت معنی داری نشان داد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین ها اثر متقابل معنی داری بین اثرات سه گانه آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد (جدول ۳). به طوری که بیش ترین نسبت کربن به نیتروژن برگ (۲۳/۳۳) از تیمار آبیاری معمولی با تاریخ کاشت پنج مرداد و عدم تلقیح بذر با کود زیستی و کمترین میزان نسبت کربن به نیتروژن (۱۴/۶۴) از تیمار قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه با تاریخ کاشت پنج شهریور و تلقیح با از تو باکتر به دست آمد، بنابراین در شرایط

سنبله با تاخیر در کاشت، می تواند به دلیل برخورد با دمای پایین و شرایط نامساعد رشدی در تاریخ کاشت های دیر باشد (Jamali et al., 2020). طول پانیکول با ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، غلظت کربن برگ و عملکرد دانه رابطه مثبت و معنی دار و با نسبت کربن به نیتروژن برگ همبستگی منفی و معنی دار نشان داد (جدول ۵).

غلظت کربن برگ

غلظت کربن برگ در کینوا تحت تاثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت و تاثیر هریک از اثرات ساده آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد، همچنین مقایسه میانگین ها اثر متقابل معنی داری بین آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی در سطح احتمال یک درصد نشان داد (جدول ۳). به طوری که بیش ترین غلظت کربن برگ (۴۴/۲۵ درصد) از تیمار آبیاری معمولی با تاریخ کاشت ۵ مرداد و تلقیح توام از تو باکتر و آزوسپیریوم و کمترین غلظت کربن برگ (۳۴/۷۸ درصد) از تیمار قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه با تاریخ کاشت ۵ شهریور و عدم تلقیح کود زیستی به دست آمد (جدول ۴). بنابراین به نظر می رسد در شرایط رطوبتی مناسب و تاریخ کاشت ۵ مرداد به سبب ایده آل بودن شرایط دمایی و کاربرد کودهای زیستی فتوسنتز بهتر انجام گردیده و باعث افزایش غلظت کربن برگ گردیده و با تاخیر در کاشت به دلیل کاهش دما و کاهش فتوسنتز در هر سه سطح تیمار آبیاری و سطوح کودهای زیستی غلظت کربن برگ کاهش یافته است (جدول ۴). در یک مطالعه حداکثر غلظت کربن برگ (۲۷/۸۲ درصد) و حداقل آن (۲۶/۴۵ درصد) به دست آمد (Iftikhar Hussain et al., 2020). کربن یکی از عناصر مهم در ساختار گیاهان بوده و عنصر سازنده تمام ترکیبات آلی همچون قندها، پروتئین ها و اسیدهای آلی است این ترکیبات در عناصر بنیادی، واکنش های آنزیمی و ماده ژنتیکی مورد استفاده قرار می گیرد (Deming, 2010). غلظت کربن برگ با ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، طول پانیکول و عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی دار نشان داد (جدول ۵). بنابراین می توان بیان داشت که افزایش غلظت کربن در گیاه تاثیر مثبت بر افزایش صفات مورد مطالعه داشت که در نهایت باعث افزایش عملکرد دانه در کینوا شده است. در مطالعه (Iftikhar Hussain et al., 2020) نیز غلظت کربن برگ با عملکرد دانه، ارتفاع بوته و نسبت کربن به نیتروژن همبستگی مثبت نشان داد.

غلظت نیتروژن برگ

بین اثرات ساده سال، آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی از لحاظ غلظت نیتروژن برگ در کینوا تفاوت معنی داری مشاهده گردید، همچنین مقایسه میانگین ها اثر متقابل معنی داری بین آبیاری، تاریخ

عدم تلقیح بذر با کودهای زیستی و اعمال آبیاری چون غلظت نیتروژن کاهش می‌یابد بنابراین نسبت کربن به نیتروژن افزایش یافت (جدول ۴). نسبت کربن به نیتروژن برگ با ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، طول پانیکول و عملکرد دانه همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد (جدول ۵).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها تفاوت معنی‌داری بین اثرات ساده سال، آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی از نظر عملکرد دانه کینوا نشان داد، همچنین مقایسه میانگین‌ها اثرات متقابل معنی‌دار سه‌جانبه آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی با احتمال پنج درصد نشان داد (جدول ۳) به طوری که بیش‌ترین عملکرد دانه (۳۰۴/۹۷ گرم بر مترمربع) از تیمار آبیاری معمولی با تاریخ کاشت ۲۰ مرداد و تلقیح توام کودهای زیستی ازتوباکتر و آزوسپیریوم و کمترین عملکرد دانه (۱۲۵/۳۳ گرم بر متر مربع) از تیمار قطع آبیاری در مرحله غنچه‌دهی با تاریخ کاشت پنج شهریور و عدم تلقیح بذر با کود زیستی به‌دست آمد (جدول ۴). گزارشات زیادی مبنی بر کاهش عملکرد در شرایط تنش رطوبتی و تاثیر تاریخ کاشت و کودهای زیستی بر عملکرد دانه وجود دارد (Anjum et al., 2011; Farooq et al., 2009; Chen et al., 2005; Dawood, 2018). کمبود آب با کاهش تبادلات گازی برگ سبب کاهش اندازه منبع و مخزن کینوا

می‌شود در نتیجه بارگیری، تخلیه و تسهیم مواد فتوسنتزی در گیاه به هم می‌ریزد. تاخیر در کاشت تأثیر زیادی بر تقسیم ماده خشک گیاهی به دانه دارد و باعث کاهش کارایی انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها شده و باعث کاهش عملکرد می‌گردد (Samadzadeh et al., 2020). در همین ارتباط یافته‌های پژوهش مشابهی روی کینوا در بیرجند نشان می‌دهد که تاریخ کاشت اواسط مرداد که گرده‌افشانی آن با دماهای نسبتاً مناسب در اواخر شهریور مواجه می‌شود، می‌تواند رشد زایشی کینوا را به‌طور مطلوبی بهبود بخشد (Mostafaei et al., 2017). تلقیح هم‌زمان دو باکتری ازتوباکتر و آزوسپیریوم باعث افزایش عملکرد ۲۰ درصدی نسبت به شاهد (عدم تلقیح) در ذرت گردید (Soleimani Fard et al., 2013)، می‌توان گفت دو نوع کود زیستی (ازتوباکتر و آزوسپیریوم) بهترین اثرات متقابل را داشته و دارای اثرات هم‌افزایی با یکدیگر می‌باشند (Moradi et al., 2011). بنابراین کودهای زیستی از یک طرف با تثبیت نیتروژن، آزاد کردن پتاسیم، انحلال فسفر و تولید مواد محرک رشد سبب بهبود رشد ریشه و در نهایت افزایش سرعت جذب آب و عناصر غذایی می‌شوند و از طرف دیگر با تحت تأثیر قرار دادن اجزای عملکرد موجب افزایش عملکرد دانه می‌گردند. عملکرد دانه کینوا با ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، طول پانیکول، غلظت کربن برگ همبستگی مثبت و معنی‌دار و با نسبت کربن به نیتروژن برگ همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد (جدول ۵).

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین صفات مورد مطالعه کینوا تحت تأثیر آبیاری، تاریخ کاشت و کودهای زیستی

Table 5- Correlation coefficients between studied quinoa traits as affected by irrigation, planting date and biofertilizers

صفات traits	1	2	3	4	5	6	7	8
1 ارتفاع بوته Plant height	1							
2 قطر ساقه Stem diameter	0.54**	1						
3 سطح برگ Leaf area	0.82**	0.76**	1					
4 طول پانیکول Panicle length	0.97**	0.61**	0.86**	1				
5 غلظت کربن برگ Leaf C%	0.32**	0.37**	0.45**	0.34**	1			
6 غلظت نیتروژن برگ Leaf N%	0.02 ^{ns}	-0.41**	-0.08 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	0.07 ^{ns}	1		
7 نسبت کربن به نیتروژن C:N Ratio	-0.38**	-0.33**	-0.41**	-0.39**	0.18 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	1	
8 عملکرد دانه Seed yield	0.85**	0.64**	0.86**	0.86**	0.38**	0.14 ^{ns}	-0.42**	1

^{ns}, * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد
ns, * and ** respectively non-significant and significant at 5% and 1%

ازتوباکتر و آزوسپیریوم بیشترین میزان صفات مورد مطالعه به خصوص عملکرد دانه (۳۰۴/۹۷ گرم بر مترمربع) را داشت ولی با تیمار قطع آبیاری در مرحله پرشدن دانه با تاریخ کاشت ۲۰ مرداد و تلقیح توام کودهای زیستی در یک گروه آماری قرار گرفت. بنابراین به لحاظ اهمیت مصرف آب می توان گفت که در شرایط محدودیت منابع آبی تیمار قطع آبیاری در مرحله پرشدن دانه مطلوب ترین نتیجه را دارد. بررسی صفات مورد مطالعه نمایانگر تاثیر مثبت کاربرد کودهای زیستی به ویژه کاربرد توام ازتوباکتر و آزوسپیریوم در صفات مورد مطالعه بود. بنابراین استفاده توام از کودهای زیستی به دلیل توانایی بالا در تثبیت نیتروژن و فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه همچون فسفر، پتاسیم، تولید سیدروفور و محلول سازی آهن، سنتز فیتوهورمون ها از جمله اکسین، سیٹوکینین، جبریلین و سنتز آنزیم هایی که رشد و نمو گیاه را تحت تاثیر قرار می دهند، اثرات مثبتی بر صفات مورد بررسی به خصوص عملکرد دانه نشان داد.

پس به نظر می رسد که افزایش صفات ارتفاع بوته، قطر ساقه و سطح برگ در شرایط آبیاری معمولی با کاربرد توام کودهای زیستی ازتوباکتر و آزوسپیریوم در تاریخ کاشت ۲۰ مرداد باعث رشد بهتر و انجام فتوسنتز بیشتر شده که خود باعث افزایش غلظت کربن و ایجاد پانیکول طویل گردیده که این عوامل تاثیر مثبت در افزایش عملکرد دانه داشته است.

نتیجه گیری

بروز تنش خشکی در مراحل مختلف رشد گیاه کینوا باعث کاهش صفات مورفولوژیکی و عملکرد آن می گردد. بنابراین بررسی میزان آب آبیاری با توجه به کمبود محدودیت منابع آبی، تعیین تاریخ کاشت مناسب و یافتن ترکیبات کودی مناسب مانند کودهای زیستی که جذب آب و عناصر غذایی را برای گیاه تسهیل می کنند از ضروریات است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که هرچند که آبیاری معمولی با تاریخ کاشت ۲۰ مرداد و تلقیح توام کودهای زیستی

References

- Abolhassani-Zeraatkar, M., Lakzian, A., Haghnia, G., Astarayi, A., & Sarcheshmepour, M. (2008). The study of salt and drought tolerance of *Sinorhizobium meliloti* isolated from Kerman province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(1), 1-10. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsc.v6i1.1170>
- Amiryousefi, M. R., Tadayon, M. R., & Ebrahimi, R. (2020). Effect of chemical and biological fertilizers on some physiological traits, yield components and yield of quinoa plant. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(2), 1-17. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jcpp.10.2.209112>
- Anjum, S. A., Xie, X., Farooq, M., Wang, L., Xue, L., Shahbaz, M., & Salhab, J. (2011). Effect of exogenous methyl jasmonate on growth, gas exchange and chlorophyll contents of soybean subjected to drought. *African Journal of Biotechnology*, 10(47), 9640-9646. <https://doi.org/10.5897/AJB10.2641>
- Boem, F. A., & Thomas, G. W. (1998). Phosphorus nutrition affects wheat response to water deficit. *Agronomy Journal*, 90, 166-171. <https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000020008x>
- Chen, H. H., Shenand, Z. Y., & Li, P. H. (2005). Adaptability of crop plant to high temperature streses. *Crop Science*, 22, 719-725. <https://doi.org/10.2135/cropsci1982.0011183X002200040006x>
- Dawood, M. G. (2018). Improving drought tolerance of quinoa plant by foliar treatment of trehalose. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(5), 245-254. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4539>
- Deming, A. (2010). "King of the elements?". *Nanotechnology*, 21(30), 201-300.
- Emam, Y., & Pirasteh Anousheh, E. (2014). *Farm and laboratory methods in agricultural sciences*. Mashhad University Jihad Publications.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185-196. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Gharineh, M. H., Bakhshandeh, A., Andarzian, B., & Shirali, M. (2019). Effects of sowing dates and irrigation levels on morphological traits and yield of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) in Khuzestan. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 50(3), 149-156. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2018.209566.654135>
- Gholami, A., & Nezarat, S. (2009). *Evaluation of the effect of plant growth stimulating bacteria on maize agronomic characteristics in Shahroud region*. 11th Iranian Soil Science Congress. Shahid Beheshti University of Tehran, Iran. (in Persian).
- Hamzei, J., & Salimi, F. (2015). Root colonization, yield and yield components of milk thistle (*Silybum marianum*) affected by mycorrhizal fungi and phosphorus fertilizer. *Jouranl of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(4), 161-171. https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article_3290.html
- Hillocks, R. J. (2012). Farming with fewer bio fertilizers in barley with water deficit stress. *Crop Protection*, 31,

- 85-93. (in Persian with English abstract).
14. Hirich, A., Choukr-Allah, R., & Jacobsen, S. E. (2014). Quinoa in Morocco- effect of sowing dates on development and yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 14, 1-7. <https://doi.org/10.1111/jac.12071>
15. Iftikhar Hussain, M., Muscolo, A., Ahmed, M., Asgar, M. A., & Al-Dakheel, A. (2020). Agro- Morphological, yield and quality traits and interrelationship with yield stability in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes under Saline mariginal environment. <https://doi.org/10.3390/plants9121763>
16. Intergovernmental Panl on climate change (IPCC). (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories, volume1; Genera guidance and reporting, Institute for Global Environmental strategies (IGES)*, Hayama, Japan, 309pp.
17. Itelima, J. U., Bang, W. J., Onyimba, I. A., Sila, M. D., & Egbere, O. J. (2018). Bio-fertilizers as key player in enhancing soil fertility and crop productivity: (A Review). *Direct Research Journal of Agriculture and Food Science*, 6(3), 73-83.
18. Jamali, S., & Ansari, H. (2020). Investigation the effect of unconventional water on yield and yield components of quinoa. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(1), 331-343. (in Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1399.14.1.29.2>
19. Jamali, S., Goldani, M., & Zeynodin, S. M. (2020). Evaluation the effects of periodic water stress on yield and water productivity on Quinoa. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(6), 1687-1697. (in Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.6.13.9>
20. Malakoti, M. J., Moshiri, F., Ghaibi, M. N., & Molavi. S. (2005). Optimum levels of some nutrients in soils and some agronomic and Horticultural. *Agricultural Research*. Education Extension Organization soil and Water Research Institute. Sana Publication. No. 406.
21. Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, USA.
22. Markarian, S., Najafi, N., Aliasgharzad, N., & Oustan, S. (2015). Effects of sinorhizobium meliloti bacterium and phosphorus on leaf chlorophyll index, nitrogen and phosphorus concentrations in alfalfa shoot and root under drought stress conditions. *Water and Soil Science*, 25, 27-45. (in Persian with English abstract).
23. Modarres Sanavi, S. A., & Soroushadeh, A. (2003). Effect of row spacing and seeding rate on yield and yield components of promising wheat line M-75-10. *Journal of Agricultural Science*, 10(1), 83-97. (in Persian with English abstract).
24. Mohammadvarzi, R., Habibi, D., Wazan, S., Jazaki, A., & Noorlundi, T. (2011). The effect of growth promoting bacteria and nitrogen fertilizer on quantitative and qualitative traits of Azargol cultivar. *New Agricultural Findings*, 5(3), 301-313. (in Persian with English abstract).
25. Moradi, M., Siadat, S. A., Khavazi, K., Naseri, R., Maleki. A., & Mirzae, A. (2011). Effect of application of biofertilizers and phosphorus fertilizers on qualitative and quantitative traits of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Ecophysiology*, 15(60), 467-492. (in Persian with English abstract). https://jcepc.tabriz.iau.ir/article_518203.html
26. Mostafaei, M., Jami Al-Ahmadi, M., Salehi, M., & Shahidi, A. (2017). *Effect of different levels of irrigation and density on the functional characteristics of quinoa*. The first national conference on new opportunities for production and employment in the agricultural sector in the east of the country. (in Persian).
27. Omid, A. H., Jabbari, H., & Ramezani, Z. (2021). Effects of row-spacing and plant density on seed yield and yield components of safflower cultivars under irrigated conditions. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, 10(1), 23-32. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/rafhc.2021.126516.1200>
28. Rawson, H. M., & Turner, N. C. (1982). Recovery from water stress in five sunflower cultivars (*Helianthus annuus* L.). *Australian Journal of Plant Physiology*, 9(4), 449-460. <https://doi.org/10.1071/PP9820449>
29. Samadzadeh, A., Zamani, G., & Fallahi, H. R. (2020). Possibility of quinoa production under South-Khorasan climatic condition as affected by planting densities and sowing dates. *Applied Field Crop Research*, 33(1), 82-104. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/aj.2020.125793.1392>
30. Sepehri, A., & Shahbazi, H. (2019). Effect of planting date and chemical and biological fertilizers application on quantitative and qualitative characteristics of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Plant Ecophysiology*, 11(37), 258-280. (in Persian with English abstract).
31. Sharpe, R. R., Harper, L. A., Giddens, J. E., & Langdale, G. W. (2001). Nitrogen use efficiency and nitrogen budget for conservation tilled wheat. *Soil Science*, 52, 1349-1398. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200050035x>
32. Sivaramaiah, N., Malik, D. K., & Sindhu, S. S. (2007). Improvement in symbiotic efficiency of chickpea (*Cicer arietinum*) by coinoculation of Bacillus strains with Mesorhizobium sp. Cicer. *Indian Journal of Microbiology*, 47, 51-56. <https://doi.org/10.1007/s12088-007-0010-1>
33. Soleimani Fard, A., Naseri Rad, H., Naseri, R., & Piri, E. (2013). Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on phenological traits, grain yield and yield components of three maizes (*Zea mays* L.) cultivars. *Journal of Crop Ecophysiology*, 7(25), 71-90. (in Persian with English abstract). https://jcepc.tabriz.iau.ir/article_516836.html

34. Temel, S., & Yolcu, S. (2020). The effect of different sowing time and harvesting stages on the herbage yield and quality of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Turkish Journal of Field Crops*, 25(1): 41-49. <https://doi.org/10.17557/tjfc.737503>
35. Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.), an ancient Andean grain: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 2541-2547. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4158>
36. Venkateshwarlu, B. (2008). Role of bio-fertilizers in organic farming: Organic farming in rain fed agriculture: Central institute for dry land agriculture, Hyderabad 85-95.
37. Zhang, J., Wang, X., Wang, J., & wang, W. (2014). Carbon and nitrogen content in typical plants and soil profiles in Yanqi Basin of Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(3), 648-656. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60723-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60723-6)



Effects of Nano Silica and Salicylic Acid on Yield and Yield Components in Corn (*Zea mays* L.)-Mungbean (*Vigna radiata* L.) Monocropping and Intercropping under Drought Stress Conditions

S. Afzali¹, S. M. B. Hosseini^{2*}, L. Ma'mani³, A. Ahmadi⁴

Received: 19-08-2022

Revised: 02-10-2022

Accepted: 16-10-2022

How to cite this article:Afzali, S., Hosseini, S. M. B., Ma'mani, L., & Ahmadi, A. (2023). Effects of Nano Silica and Salicylic Acid on Yield and Yield Components in Corn (*Zea mays* L.)-Mungbean (*Vigna radiata* L.) Monocropping and Intercropping under Drought Stress Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 91-112. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.78199.1194>

Introduction

Intercropping is an ecological crop management method in which at least two plant species grow simultaneously on a field. Increased land productivity in intercropping of cereals and legumes is mainly due to the positive interaction between cereals and legumes in the rhizosphere, which increases the efficiency of soil resource utilization, especially nitrogen (N). Mixed cultivation of legumes with cereals provides higher land use efficiency, lower water consumption, and greater environmental benefits than cereal monocultures. Salicylic acid (SA) is a natural plant hormone that affects various physiological and biochemical functions in plants, because it can act as a regulatory and mediating signal in the plant's response to abiotic stresses such as drought. In recent years, nanotechnology has also been introduced into agriculture, and several benefits of nanoparticle applications such as nano-silica (nSiO₂) have been reported that can be used to increase the supply of nutrients to agricultural products. The aim of this study was to determine the possible role of growth regulators of salicylic acid and nanosilica particles (nSiO₂) on crop yield in maize and mung bean intercropping under drought stress conditions.

Materials and Methods

The experiment was conducted in 2019-2020 cropping year in the research farm of Agriculture and Natural Resources Campus, the University of Tehran, located in Karaj. The experiment was performed in the form of split-split plots based on a randomized complete block design with three replications. The main plot was drought stress at two levels of full irrigation and cessation of irrigation, the sub plots included different intercropping arrangements of maize and mung bean: (maize monoculture (C₁₀₀), maize 80: mung bean 40 (C₈₀:M₄₀), maize 80: mung bean 60 (C₈₀:M₆₀), maize 50: mung bean 50 (C₅₀:M₅₀) and mung bean monoculture (M₁₀₀) and the sub-sub plots were four treatments of silica nanoparticles +salicylic acid, silica nanoparticles, commercial salicylic acid and control. Statistical calculations were performed by SAS 9.2 and Excel software in this study. The mean comparison was performed by LSD test and the probability level was considered 95% in all analyzes.

Results and Discussion

The results showed that the highest maize grain yield was obtained in the monoculture treatment, Si + Sa

1- Ph. D. Student of Crop Ecology, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Agriculture and Natural Resources Campus, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Agriculture and Natural Resources Campus, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Research Assistant Professor, Department of Nanotechnology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

4- Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Agriculture and Natural Resources Campus, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: bhoseini@ut.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2022.78199.1194>

combined fertilizer and full irrigation, which was 179% higher than the lowest treatment ($C_{50}:M_{50}$ intercropping, control and drought stress). The highest biological yield of maize was obtained in the complete irrigation and Si + Sa fertilizer treatment under monoculture conditions. The lowest value of this index was observed in the treatments of drought stress, control without fertilizer and $C_{50}:M_{50}$ intercropping conditions. The highest yield of mung bean seeds was obtained in monoculture of mung bean, application of Si + Sa fertilizer and complete irrigation. The highest biological yield belonged to mung bean monoculture treatment, nano Si + Sa compound fertilizer and complete irrigation. The lowest was obtained in $C_{50}:M_{50}$ and $C_{80}:M_{60}$ intercropping treatments, non-fertilizer application and drought stress. Also, the highest land equivalent ratio was obtained in full irrigation and $C_{80}M_{60}$ intercropping and nano Si + Sa fertilizer treatment (1.57).

Conclusion

In general, the results of this study showed that, drought stress reduced all the studied traits. While intercropping with increasing diversity had a significant effect on important agronomic traits under both optimal irrigation and drought stress conditions. LER values were more than one in intercropping crops that indicated higher ground productivity in these planting patterns than in monoculture of crops. The highest LER value was obtained in $C_{80}:M_{60}$ intercropping treatment under non- stress and application of nano Si + Sa. Silica nanoparticles and salicylic acid fertilizers had a positive effect on grain and biological yield of both plants as well as land equivalent ratio and reduce the negative effects of drought stress on plants and can be used as suitable approach to achieve sustainable agriculture goals.

Keywords: Land equivalent, Monoculture, Nanofertilizer, Planting arrangements, Sustainable agriculture

اثرات نانو سیلیس و سالیسیلیک اسید بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد در کشت مخلوط ذرت (*Zea mays* L.) و ماش سبز (*Vigna radiata* L.) در شرایط تنش خشکی

سحر افضلی^۱، سید محمدباقر حسینی^{۱*}، لایلا مأمی^۳، علی احمدی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

چکیده

خشکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که رشد و عملکرد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. استفاده از نانو ذرات می‌تواند به‌عنوان راهکاری در تعدیل اثرات تنش خشکی مؤثر واقع شود. بنابراین به‌منظور بررسی اثر الگوی کاشت، تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس و سالیسیلیک اسید بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد ذرت و ماش آزمایشی به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۳۹۸-۹۹ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران انجام شد. عامل اصلی تنش خشکی در دو سطح آبیاری کامل (۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) و تنش خشکی (۸۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A)، عامل فرعی پنج آرایش مختلف کشت: (کشت خالص ذرت (C₁₀₀)، و تیمارهای کشت مخلوط ذرت ۸۰٪: ماش ۴۰٪ (C₈₀: M₄₀)، ذرت ۸۰٪: ماش ۶۰٪ (C₈₀: M₆₀)، ذرت ۵۰٪: ماش ۵۰٪ (C₅₀: M₅₀) و کشت خالص ماش (V₁₀₀) و عامل فرعی-چهار تیمار نانوذرات سیلیس (Si) + سالیسیلیک اسید (Sa)، نانو ذرات سیلیس (Si)، سالیسیلیک اسید تجاری (Sa) و شاهد (بدون کود: C) بود. محلول‌پاشی نانو ذرات نیز به‌صورت برگ مصرف انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بیشترین عملکرد دانه ذرت در تیمار تک‌کشتی ذرت، کود ترکیبی نانو Si + Sa و آبیاری کامل به‌دست آمد که ۱۷۹ درصد بیشتر از کمترین تیمار (کشت مخلوط C₅₀: M₅₀٪، شاهد و تنش خشکی) بود. بیشترین عملکرد دانه ماش نیز در تیمار تک‌کشتی ماش، کاربرد کود ترکیبی نانو Si + Sa و آبیاری کامل به‌دست آمد. در نتایج آزمایش مشاهده شد در شرایط تنش خشکی کاربرد تیمارهای تغذیه‌ای نسبت به عدم کاربرد آن‌ها منجر به افزایش عملکرد دانه و بیولوژیک در ذرت و ماش گردید. بیشترین میزان نسبت برابری زمین نیز در آبیاری کامل و کشت مخلوط C₈₀: M₆₀ و تیمار کودی نانو Si + Sa (۱/۵۷) حاصل شد. با توجه به این نتایج، استفاده از نانو کودها با توجه به میزان اندک کود مصرفی و کاربرد سالیسیلیک در کنترل تنش خشکی راهکار مناسبی برای کاهش نهاده‌های مصرفی و دستیابی به کشاورزی پایدار می‌باشد. از طرفی کشت مخلوط ماش و ذرت با ایجاد تنوع و بهره‌وری بالاتر در استفاده از زمین به دلیل تولید LER بیشتر از یک در شرایط تنش خشکی و آبیاری کامل، می‌تواند در شرایط تنش خشکی سودمند باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، تک‌کشتی، کشاورزی پایدار، نانو کود، نسبت برابری زمین

مقدمه

کشت مخلوط یک روش مدیریت زراعی اکولوژیکی است که در آن حداقل دو گونه گیاهی در یک مزرعه به‌طور هم‌زمان رشد می‌کنند (Wezel et al., 2014). این روش کشت که به‌طور سنتی توسط کشاورزان خرده‌پا برای افزایش تولید محصول، کاهش خطرات زیست‌محیطی و استفاده کارآمدتر از زمین استفاده می‌شود، به‌طور پایدار پتانسیل زیادی را برای افزایش تولید مدرن محصولات زراعی دارد (Bybee-Finley & Ryan, 2018). کشت مخلوط غلات با لگوها (به‌عنوان مثال، حبوبات) به دلایل زیر بسیار امیدوارکننده است (الف) اهمیت اجتماعی-اقتصادی و نقش کلیدی آن‌ها در بسیاری از رژیم‌های غذایی انسان و (ب) مکمل اصلی شناخته‌شده کشت مخلوط غلات (Bedoussac et al., 2015). بهره‌وری بیشتر زمین در کشت

- ۱- دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، ایران
 - ۲- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، ایران
 - ۳- استادیار بخش نانو تکنولوژی پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
 - ۴- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، ایران
- (*) - نویسنده مسئول:
(Email: bhoseini@ut.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78199.1194>

غلاف‌ها و جوانه‌های ماش نیز به‌صورت سبز مصرف‌شده که دارای انواع ویتامین‌ها و مواد معدنی است. ماش در دوره رشد خود با تنش خشکی مواجه شده و این تنش تقریباً تمامی جنبه‌های رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار داده که درنهایت موجب کاهش عملکرد و اجزای آن می‌شود (Sadeghipour et al., 2014).

محدودیت آب عامل اصلی بی‌ثباتی عملکرد لگوم‌ها و گره‌زایی است (Farooq et al., 2017). خشک‌سالی عامل محدودکننده قابل‌توجهی برای بهره‌وری کشاورزی است و با کاهش جذب آب و جذب عناصر غذایی، رشد گیاه را مهار می‌کند (Amanullah et al., 2010). چالش کشاورزی امروز افزایش عملکرد با استفاده از آب کمتر به‌خصوص در مناطقی با منابع آب و زمین محدود می‌باشد (Zhang et al., 2012). کشت مخلوط لگوم‌ها با غلات، کارایی استفاده از زمین بالاتر، مصرف آب کمتر و مزایای زیست محیطی بیشتری را نسبت به تک‌کشتی‌های غلات فراهم می‌کند (Amanullah et al., 2021). سامانه کشت مخلوط غلات و لگوم‌ها می‌تواند عملکرد محصولات را با به اشتراک گذاشتن منابع زیست محیطی موجود افزایش دهد، همچنین کشت مخلوط باعث افزایش بهره‌وری محصول در مقایسه با کشت خالص می‌شود (Layek et al., 2018). بررسی منابع علمی نشان می‌دهد راندمان مصرف آب در کشت‌های مخلوط بیشتر از تک‌کشتی است (Khoramivafa et al., 2011). الگوهای جذب آب در گیاهانی که به‌صورت مخلوط کشت می‌شوند با تک‌کشتی آن‌ها متفاوت است. در رابطه با مصرف آب در چندکشتی، اصل تولید رقابتی و رقابت اجزای چندکشتی برای دستیابی به آب نقش کلیدی و اهمیت فراوانی دارد. به‌نحوی که با انتخاب نامناسب اجزای چندکشتی، به‌ندرت گونه‌ها، محیط را به سود یکدیگر تغییر خواهند داد و به این دلیل محدودیت رطوبت در این چنین ترکیب‌های نادرست به غلبه یک محصول بر محصول دیگر منجر و باعث خسارت اقتصادی می‌شود، در مقابل انتخاب درست گونه‌های گیاهی منجر به کاهش رقابت و بهره‌گیری مناسب هر دو گونه از آب خواهد شد (Khoramivafa et al., 2011). معمولاً رقابت بین گونه‌ای برای آب کمتر از رقابت درون‌گونه‌ای است، زیرا گونه‌های مختلف دارای ساختار، سیستم ریشه‌ای و دوره‌های حداکثر نیاز به آب متفاوتی می‌باشند (Li-li et al., 2017). در این خصوص گزارش‌های متفاوتی در زمینه عملکرد کشت مخلوط جو (*Hordeum Vulgare* L.) با ماشک (*Vicia sativa* L.) و در مخلوط سویچ گراس (*Panicum virgatum* L.) با گون (*Astragalus onobrychis* L.) نیز وجود دارد. در شرایط تنش خشکی در تحقیق دیگری گزارش شده است که در کشت مخلوط گندم- ذرت میزان مصرف آب بیش‌تر از کشت خالص است ولی افزایش عملکرد نسبت به کشت خالص گندم (*Triticum aestivum* L.) و کشت خالص ذرت (*Zea mays* L.) موجب افزایش ۲۶ درصدی کارایی مصرف آب شد (Hu et al., 2017).

مخلوط غلات و لگوم‌ها عمدتاً به دلیل برهمکنش مثبت بین غلات و لگوم‌ها بر ریزوسفر در کشت مخلوط است که کارایی استفاده از منابع خاک، به‌ویژه نیتروژن (N) را افزایش می‌دهد (Jensen et al., 2020). تثبیت همزیستی نیتروژن (SNF)، که توسط باکتری‌های ریزوبیومی در ریشه لگوم‌ها به‌صورت گره‌زایی انجام می‌شود، یکی از خدمات مهم اکوسیستم کشاورزی است که توسط لگوم‌ها ارائه می‌شود. همچنین لگوم‌ها به دلیل این‌که منبع غنی از پروتئین می‌باشند، می‌توانند در تغذیه دام به‌خوبی مورد استفاده قرار گیرند. به‌دلیل محتوای پروتئین پایین علوفه ذرت، استفاده تنها از علوفه ذرت منجر به تولید رضایت‌بخش در بسیاری از دام‌ها نمی‌شود که کاربرد لگوم‌ها به همراه ذرت می‌تواند این مشکل را مرتفع کند (Javanmard et al., 2012). لگوم‌ها با تأمین نیتروژن برای گیاه دیگر موجب افزایش پروتئین و درشتی میوه و دانه می‌شود. هرچه غلظت نیتروژن در برگ‌ها افزایش یابد، شدت کربن‌گیری را زیادتر می‌کند. زیرا نیتروژن غیر از آن‌که به‌صورت پروتئین در گیاه وجود دارد، عنصر اصلی تشکیل‌دهنده کلروفیل نیز می‌باشد که عامل اساسی در کربن‌گیری است (Alibakhshi & Mirzakhani, 2016). غلات می‌توانند از لگوم‌ها در استفاده از نیتروژن معدنی خاک سبقت بگیرند، بنابراین می‌توانند دسترسی به نیتروژن خاک را کاهش دهند و متعاقباً تثبیت همزیستی نیتروژن لگوم‌ها را تحریک می‌کنند (Bargaz et al., 2021). این امر منجر به جذب بیشتر نیتروژن در هر واحد زمین در کشت مخلوط غلات و لگوم‌ها در مقایسه با تک‌کشتی می‌شود (Lithourgidis & Dordas, 2010). با افزایش تنوع در کشت مخلوط کارایی استفاده از آب، نیتروژن و سایر عناصر ماکرو و میکرو افزایش می‌یابد همچنین هزینه تولید محصول و ریسک‌پذیری بازار کاهش می‌یابد (Bargaz et al., 2021). باین‌وجود طیف وسیعی از لگوم‌ها به محدودیت‌های محیطی حساس هستند که می‌تواند منجر به تغییر در رشد لگوم‌ها و تثبیت همزیست نیتروژن شوند (Bargaz et al., 2021).

ذرت یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی است که اهمیت زیادی در تغذیه انسان، تعلیف دام، تغذیه طیور و صنعت دارد. سهم ذرت در تأمین غذای انسان ۲۰ تا ۲۵ درصد، خوراک دام و طیور ۶۰ تا ۷۵ درصد و به‌عنوان ماده اولیه جهت فرآورده‌های صنعتی ۵ درصد می‌باشد. کمبود رطوبت یکی از عوامل مهم محدودکننده رشد ذرت به‌شمار می‌رود (Khadim et al., 2011). ماش گیاهی از تیره لگومینوز و زیر تیره پروانه آسا می‌باشد که در بخش‌های مختلفی از دنیا کشت شده و نقش مهمی در تغذیه کشورهای درحال توسعه ایفا می‌کند. ماش دارای خصوصاتی ازجمله دوره رشد کوتاه، تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، تقویت خاک و جلوگیری از فرسایش آن است. دانه‌های ماش غنی از پروتئین بوده و به‌عنوان منبع بالارزش پروتئین گیاهی نقش مهمی در تغذیه انسان ایفا می‌کند. علاوه بر دانه،

(سالیسیلیک اسید و نانو ذرات) در مناطق نیمه خشک می تواند یک عمل موثر برای بهبود عملکرد محصول باشد که به طور کلی برای کاهش اثرات نامطلوب تنش های محیطی به کار می روند (Wang et al., 2010). املاح سازگار مولکول هایی هستند که با حفظ اسمولالیتیه درون سلولی، از سلول ها در برابر خشک شدن محافظت می کنند (Wani et al., 2013). سالیسیلیک اسید (SA) یک هورمون گیاهی طبیعی است که بر عملکردهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مختلف در گیاهان تأثیر می گذارد، زیرا می تواند به عنوان یک سیگنال تنظیمی و واسطه، در واکنش گیاه به تنش های غیرزیستی مانند خشکی نقش داشته باشد (Wang et al., 2010). بر اساس نتایج آزمایش دروژه و همکاران (Darvizheh et al., 2019) محلول پاشی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) با سالیسیلیک اسید موجب بهبود رشد این گیاه در هر دو شرایط تنش کم آبی و بدون تنش گردید. فرحبخش و حمسیدین سعید (Farahbakhsh & Hamsaddin Saied, 2011) گزارش کردند محلول پاشی گیاهان ذرت با سالیسیلیک اسید تحت تنش خشکی سبب افزایش وزن خشک گیاه، ارتفاع بوته، تعداد برگ، سطح برگ و محتوای کلروفیل برگ شد. کاربرد خارجی نانو ذرات می تواند مقاومت گیاه در برابر تنش های محیطی را در مناطق نیمه خشک بهبود بخشد، اما علی رغم پیشرفت های اخیر در درک برخی از پیامدهای زیست محیطی نانو ذرات، تحقیقات کمی در مورد تأثیر این مواد بر عملکرد گیاهان زراعی در کشت مخلوط در دسترس است. بنابراین، هدف از این پژوهش تعیین نقش احتمالی تنظیم کننده های رشد سالیسیلیک اسید و نانو ذرات سیلیس (SiO_2) بر اجزای عملکرد و عملکرد دانه گیاهان زراعی در کشت مخلوط ذرت و ماش تحت شرایط تنش خشکی بود.

مواد و روش ها

آزمایش در بهار سال زراعی ۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهرستان کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی با ارتفاع ۱۱۶۰ متر از سطح دریا اجرا شد. متوسط بلندمدت بارندگی سالانه در این منطقه ۲۵۱ میلی متر بوده که عمده پراکنش آن در فصول پاییز و زمستان است. میانگین درجه حرارت سالانه این منطقه نیز ۱۴/۴ درجه و حداقل و حداکثر مطلق دما به ترتیب ۲۰- و ۴۲ درجه سانتی گراد می باشد. داده های هواشناسی طی دوره اجرای پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

et). اگرچه در این زمینه تحقیقات متعددی انجام شده اما اطلاعات مربوط به سودمندی کشت مخلوط در به کارگیری بهتر و اصلاح شده از منابع به خصوص آب و اثبات سازوکارهای درگیر در این رابطه هنوز شناخته نشده است (Khoramivafa et al., 2011).

در مناطق نیمه خشک، که حاصلخیزی خاک ها کمتر است، ممکن است تأمین نیازهای غذایی گیاهان زراعی مشکل باشد و کاربرد کود ابزار مناسبی برای جبران کمبود عناصر غذایی و جایگزینی عناصر حذف شده توسط محصولات برداشت شده، است (Wang et al., 2010).

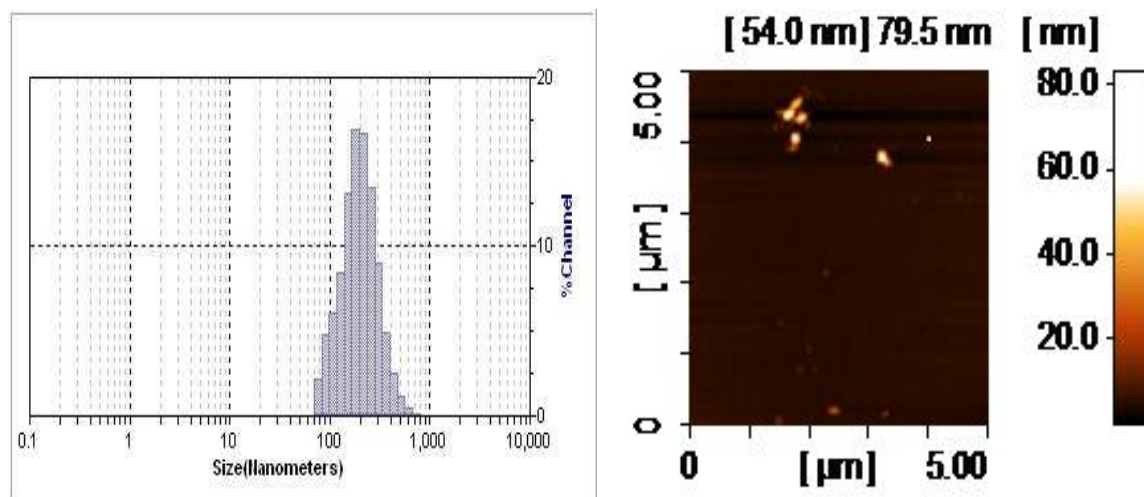
ورود فناوری های جدید به صنعت کشاورزی مهم ترین عامل در ایجاد کشاورزی مدرن است. در این میان فناوری نانو، زمینه مناسبی را در تولید محصولات غذایی و کشاورزی فراهم آورده است (Hashemi-Dehkourdi et al., 2017). کودهای تولید شده با فناوری نانو نسبت به کودهای شیمیایی متداول کارآمدتر و با محیط زیست سازگارتر هستند؛ به سرعت توسط گیاهان جذب شده و نیازهای آن ها را پاسخ می دهد. (Naderi & Abedi, 2012; Shojaei & Makarian, 2015). در سال های اخیر کاربردهای زراعی از ذرات نانو مفید در پژوهش های مزرعه ای مورد توجه قرار گرفته است، در میان نانو ذرات، نانو سیلیس مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (Janmohammadi et al., 2017). مزایای متعدد کاربردهای نانو ذرات مانند نانو سیلیس (SiO_2) گزارش شده است که می توان از آن برای افزایش عرضه عناصر غذایی به محصولات کشاورزی استفاده کرد (Sabaghnia et al., 2018). مطابق با گزارش صدیقی و همکاران (Siddiqui et al., 2015)، کاربرد محلول پاشی نانو سیلیس در طول دوره رشد مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. همچنین محلول پاشی نانو سیلیس روی گیاهان با افزایش تجمع آنزیم های آنتی اکسیدانی و افزایش کارایی دستگاه فتوسنتزی باعث بهبود رشد و عملکرد گیاه می شود (Kalteh et al., 2014). نانو ذرات سیلیس مقاومت گیاهان در مقابل تنش خشکی را با افزایش دفاع آنتی اکسیدانت، کاهش آسیب اکسیداتیو به مولکول های غشا و نگهداری بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی و فتوسنتزی زیاد می کنند. در نتیجه تنش خشکی را کنترل می کند و مقدار آسیب وارده به گیاهان را به حداقل می رسانند (Mahmoodi et al., 2020). یواکومار و همکاران (Yuvakkumar et al., 2011) مطالعه ای بر روی گیاه ذرت نشان دادند که کاربرد نانو ذرات سیلیس به صورت پودر و مخلوط با خاک منجر به افزایش رشد گیاه گردید. همچنین استفاده از تنظیم کننده های رشد و املاح سازگار

جدول ۱- آمار هواشناسی (ماهانه) ایستگاه سینوپتیک کرج طی دوره آزمایش در طول فصل رشد در سال ۱۳۹۹
Table 1- Meteorological statistics (monthly) of Karaj synoptic station during the experimental period in 2020

ماه Month	بارش Precipitation (mm)	دمای حداقل Minimum temperature	دمای حداکثر Maximum temperature (°C)	دمای میانگین Average temperature	ساعت آفتابی Sunny hours (h)
فروردین April	94.22	5.61	16.32	10.96	6.94
اردیبهشت May	56.15	11.01	21.21	16.11	9.09
خرداد June	0	16.9	34.16	25.53	11.8
تیر July	0	19.2	34.3	26.75	11.16
مرداد August	0	18.8	35.3	27.05	11.01
شهریور September	0	16.6	31.2	23.9	10.9
مهر October	9.7	10.94	24.31	17.62	7.46

شد که اندازه آن به ترتیب ۷۹/۵ و ۲۱۹ نانومتر بود (شکل ۱). قبل از اجرای آزمایش، خاک مزرعه برای تعیین خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک و تعیین نیاز کودی مورد آزمایش قرار گرفت و ویژگی‌های آن در جدول ۲ آورده شده است. ابعاد کرت‌های آزمایشی ۴/۵ در ۴ متر مربع بود. فاصله بین کرت‌ها ۱/۵۰ متر و فاصله بین بلوک‌ها دو متر در نظر گرفته شد. در کرت‌های تک‌کشتی ذرت فاصله بین ردیف‌ها ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته روی ردیف نیز ۱۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در کرت‌های تک‌کشتی گیاه ماش نیز فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بوته روی ردیف نیز ۱۰ سانتی‌متر بود. تراکم بوته‌ها در کشت خالص ذرت و ماش به ترتیب ۷/۵ و ۲۰ بوته در متر مربع بود. تیمارهای کشت مخلوط افزایشی با افزایش تراکم بوته‌ها بر روی ردیف اعمال شدند. ذرت مورد استفاده رقم FAO 450 بود که یک رقم زودرس و دارای قدرت جوانه‌زنی اولیه و عملکرد بالا می‌باشد. خصوصیات ظاهری این ذرت شامل دندان اسبی، دارای ۱۶ تا ۱۷ ردیف دانه روی بلال و ارتفاع بالا می‌باشد. بیماری است و تراکم کاشت آن معمولاً ۶۰ تا ۷۰ هزار بوته در هکتار در نظر گرفته می‌شود. همچنین ماش مورد استفاده نیز یک لاین هندی به نام سیمیت ۱ (MH421) بود که لاینی زودرس می‌باشد و دارای دانه‌های درشت تا متوسط، خوش‌پخت و تا حدودی مقاوم به تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی است و دارای تیپ بوته ایستاده می‌باشد. آبیاری تمام واحدهای آزمایشی تا مرحله ۱۰ برگی ذرت به صورت یکسان و کامل با روش آبیاری قطره‌ای انجام گرفت و از مرحله ۱۰ برگی ذرت در تیمارهای مورد نظر تنش آبی تا پایان فصل رشد اعمال شد که در این مرحله کانوپی ماش نیز به طور کامل تشکیل شده بود.

آزمایش به صورت کرت‌های دوبار خرد شده بر پایه طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. عامل اصلی تنش خشکی در دو سطح آبیاری کامل (۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) و تنش آبی (۸۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) بود که تنش خشکی در مرحله ۱۰ برگی ذرت (گیاه اصلی) تا انتهای فصل رشد اعمال شد، عامل فرعی آرایش‌های مختلف کشت مخلوط افزایشی و تک‌کشتی ذرت و ماش در پنج سطح (کشت خالص ذرت (C_{100}), کشت مخلوط ذرت ۸۰٪: ماش ۲۰٪ ($C_{80}:M_{20}$), کشت مخلوط ذرت ۶۰٪: ماش ۴۰٪ ($C_{60}:M_{40}$), کشت مخلوط ذرت ۵۰٪: ماش ۵۰٪ ($C_{50}:M_{50}$) و کشت خالص ماش (M_{100}) و عامل فرعی-فرعی چهار تیمار نانو ذرات سیلیس-سالیسیلیک اسید (nano si+sa)، نانو ذرات سیلیس (nano Si)، سالیسیلیک اسید تجاری (Sa) هر یک به میزان ۲۰۰ پی‌پی‌ام (به صورت محلول پاشی برگ مصرف) و شاهد بدون کود بود. انتخاب سطوح تنش بر اساس بررسی منابع صورت گرفته است (Ali *et al.*, 2016) که گزارش شده است این سطح تنش برای هر دو گیاه قابل تحمل بود و تنش در سطوح بالاتر منجر به کاهش بسیار زیاد تولید ذرت می‌شود بنابراین سطح بالاتر تنش انتخاب نشد. از طرفی به دلیل این که ماش گیاهی مقاوم به تنش است و همین‌طور ذرت گیاه اصلی در این پژوهش می‌باشد بنابراین برای اعمال تنش با توجه به مقاومت متفاوت دو گیاه به تنش خشکی، گیاه ذرت معیار اصلی قرار گرفت. کودهای به کار رفته در این آزمایش از پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران تهیه شد. بین دو ماده یعنی سیلیس و سالیسیلیک اسید واکنشی صورت نگرفت، سالیسیلیک اسید روی نانو سیلیس بارگذاری یا لود شد. مشخصات نانوذره با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM: Atomic Force Microscope) و پراکندگی نور دینامیکی (DLS: Dynamic Light Scattering) اندازه‌گیری



شکل ۱- اندازه ذرات نانو سالیسیلیک اسید به روش AFM (شکل سمت راست) و DLS (شکل سمت چپ)
Figure1- Size of nano salicylic acid particles by AFM (right figure) and DLS (left figure)

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2- Soil chemical and physical characteristics of the experimental site

Soil texture	Available nitrogen (%)	P (mg.kg ⁻¹)	K (mg.kg ⁻¹)	pH	EC (dS m ⁻¹)	OC (%)
لوم رسی (Clay loam)	0.081	61.4	108	7.50	1.23	0.77

ET₀: تبخیر و تعرق مرجع (میلی متر در روز) و K_c: ضریب گیاه زراعی مورد نظر می باشد. برای اندازه گیری میزان آب مصرفی در هر دور آبیاری در ابتدای هر کرت کنترلر بسته شد.

برای تعیین ضرایب گیاهی ذرت و ماش در مراحل مختلف نمو، از شیوه نامه فائو استفاده شد (Allen et al., 1998). برای محاسبه مقدار آب مصرفی در این آزمایش، به دلیل تفاوت در نیاز آبی دو گیاه، میانگین ضرایب گیاهی ذرت و ماش در نظر گرفته شد (Alizadeh & Kamali, 2007). میزان ضرایب گیاهی ذرت در مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر با ۰/۳، ۰/۲۰ و ۰/۸۵ به دست آمد. ضرایب گیاهی برای ماش نیز در مراحل ابتدای، میانی و انتهایی به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸۹ و ۰/۰۵ بود.

عملیات کاشت به صورت دستی در خردادماه سال ۱۳۹۹ برای هر دو گیاه به صورت هم زمان انجام شد. محلول پاشی کودهای سالیسیلیک اسید- سیلیس برای گیاهان ذرت و ماش قبل از اعمال تنش خشکی (دو هفته قبل از اعمال تنش خشکی) به صورت محلول پاشی برگ با سمپاش برقی پالمیک مدل V16 ساخت کشور اسپانیا در یک نوبت انجام شد. تنش خشکی در مرحله ۱۰ برگی ذرت اعمال شد.

عملیات برداشت گیاه ماش ۷۴ روز پس از کاشت و گیاه ذرت ۱۱۰ روز پس از کاشت در مرحله رسیدگی کامل هر دو گیاه به صورت دستی و در سطح یک متر مربع انجام شد. برای تعیین عملکرد دانه، با

برای تعیین میزان آب مورد نیاز و اعمال تیمارهای آبیاری با استفاده از داده های هواشناسی روزانه در محل آزمایش و روش تستک تبخیر (کلاس A) اقدام شد. میزان تبخیر به طور روزانه اندازه گیری شد و آبیاری هر تیمار، پس از رسیدن میزان تبخیر تجمعی به مقدار مورد نظر انجام شد. نیاز آبی هر گیاه، با تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش فائو پنمن موتیث و ضرایب گیاهی در منطقه مورد آزمایش، از روابط (۱) و (۲) تعیین شد (Farnia et al., 2006). ابتدا با توجه به شرایط اقلیمی محاسبه می شود که پس از چه میزان تبخیر از سطح، نیاز به آبیاری مجدد وجود دارد.

برای اندازه گیری تبخیر و تعرق مرجع میزان تبخیر از تشت در ضریب تشت مورد نظر ضرب شد. بدین صورت:

$$ET_0 = K_p * E_{pan} \quad (1)$$

که در این فرمول ET₀: تبخیر- تعرق مرجع (میلی متر در روز) و E_{pan}: تبخیر تشت (میلی متر در روز) و K_p: ضریب تشت می باشد ضریب تشت با توجه به داده های هواشناسی شامل سرعت باد (متر بر ثانیه)، فاصله تشت از پوشش گیاهی سبز بالادست در جهت وزش باد و میزان رطوبت نسبی منطقه به دست آمد و پس از محاسبه میزان تبخیر و تعرق مرجع، برای به دست آوردن میزان تبخیر و تعرق گیاه زراعی مورد نظر از رابطه (۲) استفاده شد:

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (2)$$

ET_c: تبخیر و تعرق گیاه زراعی مورد نظر (میلی متر در روز)،

رعایت حاشیه‌ها از سطح معادل ۱ متر مربع در انتهای فصل رشد، بوته‌ها را از نزدیک سطح زمین کف‌بر نموده و با کوبیدن و جدا کردن دانه‌ها عملکرد دانه تعیین شد. برای محاسبه عملکرد بیولوژیک، وزن خشک دانه‌ها با وزن خشک بقایای گیاه جمع شد. جهت محاسبه شاخص برداشت، از رابطه (۳) استفاده شد که در آن GY عملکرد دانه و BY عملکرد بیولوژیک گیاه است:

$$HI = (GY/BY) \times 100 \quad (3)$$

برای ارزیابی نسبت‌های کشت مخلوط شاخص نسبت برابری زمین بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد (Gliessman, 1990):

$$LER = (Y_{ij}/Y_{ii}) + (Y_{ji}/Y_{jj}) \quad (4)$$

که در این معادله Y_{ii} = عملکرد گونه i در کشت خالص، Y_{jj} = عملکرد گونه j در کشت خالص، Y_{ij} = عملکرد گونه i در کشت مخلوط، Y_{ji} = عملکرد گونه j در کشت مخلوط می‌باشد.

جهت محاسبات آماری در این مطالعه از نرم‌افزارهای SAS 9.2 و Excel (2010) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون LSD انجام گرفت و سطح احتمال به کار رفته در کلیه تجزیه و تحلیل‌ها ۹۵٪ در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

نتایج ذرت

عملکرد بیولوژیک: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی تنش خشکی و الگوی کشت در سطح یک درصد و کود در سطح پنج درصد بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بودند. همچنین بر همکنش دوگانه تنش خشکی × الگوی کشت در سطح یک درصد و سه عامل تنش خشکی × کود × الگوی کشت در سطح پنج درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار آبیاری کامل و کود ترکیبی نانو $Si + Sa$ در شرایط تک‌کشتی ذرت C_{100} (۲۹۹۹۵ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. کمترین میزان این شاخص نیز در تیمار سه‌گانه تنش خشکی و شاهد بدون کود در شرایط کشت مخلوط $C50:M50$ (۱۱۰۲۱ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص در میان تیمارهای مختلف برابر با ۱۷۲ درصد می‌باشد (جدول ۴). سیستم ریشه ذرت می‌تواند به عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک برسد و می‌تواند آب ذخیره شده خاک را از لایه‌های عمیق‌تر خاک استخراج کند (Ren et al., 2017) و مکملی برای دریافت آب در نتیجه افزایش کانوبی گیاهی است که منجر به افزایش تولید ماده خشک و در نتیجه افزایش عملکرد می‌شود (Zhao et al., 2020). سیلیس با کاهش تعرق گیاه و یا رسوب در زیر سلول‌های اپیدرم برگ و ساقه باعث کاهش اتلاف آب از کوتیکول می‌شود. در نتیجه باعث حفظ و

نگهداری آب در سلول و افزایش فشار تورژسانس می‌شود و منجر به افزایش سطح سبز گیاه می‌گردد. رسوب کریستال‌های سیلیکات در سلول‌های اپیدرمی مانعی را برای کاهش آب از کوتیکول‌ها ایجاد می‌کند (Arouiee et al., 2014)، که ممکن است برای گیاهان مفید باشد و در نتیجه افزایش فتوسنتز را در پی داشته باشد. محققان مختلف کاهش عملکرد بیولوژیک را در گیاهان گندم (Bukhari et al., 2021)، ذرت (Gomaa et al., 2021) در نتیجه اعمال تنش خشکی و بهبود آن را در اثر کاربرد نانو ذرات سیلیس و سالیسیلیک اسید گزارش دادند. کاهش خسارت غشاه در اثر کاربرد اسید سالیسیلیک که به‌عنوان راهی برای افزایش مقاومت به خشکی در گیاهان شناخته شده است، ممکن است با تولید آنتی‌اکسیدان برای کاهش خسارت اکسید شدن همراه باشد (Mehrabian moghadam et al., 2011). سالیسیلیک اسید بر محدوده وسیعی از فرآیندها از جمله جذب و انتقال یون‌ها، نفوذپذیری غشا و هدایت روزنه‌ای تأثیرگذار است. همچنین سالیسیلیک اسید در غلظت‌های مناسب با افزایش توان سیستم آنتی‌اکسیدانی سلول سبب کاهش اثرات مخرب تنش می‌گردد. سالیسیلیک اسید رشد و تقسیم سلولی را با تأثیر بر هورمون‌های دیگر نظیر اکسین، سیتوکینین، جیبرلین و آبسزینک اسید تنظیم می‌کند و به این ترتیب بر میزان رشد گیاه مؤثر می‌باشد (Daneshman et al., 2012).

عملکرد دانه: مطابق با نتایج تجزیه واریانس جدول ۳ مشخص شد که اثرات اصلی تنش خشکی، الگوی کشت و انواع کود در سطح یک درصد و برهمکنش‌های تنش خشکی × کود و تنش خشکی × الگوی کشت در سطح یک درصد و برهمکنش سه عامل تنش خشکی × کود × الگوی کشت در سطح پنج درصد بر عملکرد دانه ذرت معنی‌دار بودند. بیشترین عملکرد دانه (۱۴۷۵۸ کیلوگرم در هکتار) متعلق به تیمار تک‌کشتی ذرت، کود ترکیبی نانو $Si + Sa$ و آبیاری کامل بود (جدول ۳). کمترین (۵۲۹۰ کیلوگرم در هکتار) نیز در تیمار کشت مخلوط $C50:M50$ ، عدم مصرف کود و تنش خشکی به‌دست آمد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۱۷۹ درصد می‌باشد (جدول ۴). در بین کشت‌های مخلوط نیز بیشترین عملکرد دانه مربوط به تیمار $C80:M40$ (۱۰۷۰۰ کیلوگرم در هکتار) کود ترکیبی نانو $Si + Sa$ و آبیاری کامل بود. کمتر بودن عملکرد دانه ذرت در کشت مخلوط را می‌توان به کم بودن تعداد بوته در واحد سطح در این الگوی کاشت نسبت داد. در مطالعات مختلف، اثر کاهش فراهمی آب بر عملکرد دانه ذرت موردبررسی قرار گرفته است که در بیشتر این تحقیقات کاهش عملکرد دانه ذرت در شرایط آبیاری محدود به دلیل کاهش کلیه اجزای عملکرد دانه بود که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد (Xie et al., 2021). تکنیک‌های متعدد مقرون به صرفه‌ای مانند کاربرد نانوذرات سیلیس و سالیسیلیک اسید در جهت کاهش تنش خشکی وجود دارند.

حافظ و همکاران (Hafez et al., 2021) در آزمایش خود گزارش دادند که نانوذرات سیلیس به وضوح رشد گیاهان ذرت را در فواصل آبیاری مختلف افزایش داد. این محققین گزارش دادند که گیاهان تیمار شده با سیلیس برترین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و گیاه و جذب عناصر را نسبت به تیمار شاهد داشتند و در نتیجه بیشترین عملکرد در این شرایط تولید گردید (Hafez et al., 2021). سیلیس می تواند تنش آب را با کاهش تعرق و افزایش وزن و توسعه ریشه و بهبود جذب آب و عناصر، کاهش دهد (Aqaei et al., 2020). محققان اظهار داشتند که سیلیس غلظت بعضی از عناصر را در گیاه افزایش می دهند و همچنین در انتقال آن ها به اندام هوایی مؤثر می باشد. همچنین مشخص شده است که سیلیس می تواند بر ایجاد موانع آپوپلاستی در ریشه تأثیر بگذارد و مسیرهای آپوپلاستی را کنترل کند و در پی آن در انتقال عناصر از طریق آپوپلاست ریشه به اندام هوایی مؤثر باشند (Vaculikova et al., 2016). در واقع می توان گفت سیلیس با کمک به جذب عناصری مثل پتاسیم در افزایش مقاومت گیاه به تنش خشکی مؤثر است. زارعی و همکاران (Zareyi et al., 2020) افزایش فعالیت پمپ $H^+ - ATPase$ غشای پلاسمایی ریشه در اثر کاربرد سیلیسیم را عامل احتمالی افزایش جذب پتاسیم توسط گیاه معرفی نمودند. همچنین مطالعات، ارتباط نزدیکی بین سیالیت غشا و فعالیت $H^+ - ATPase$ غشای سلولی را گزارش داده است، به نظر می رسد؛ سیلیکون از طریق افزایش سیالیت غشا می تواند بر فعالیت این پمپ تأثیر بگذارد (Zareyi et al., 2020). از آن جا که سیلیسیم از جمله عناصر کم مصرف می باشد میزان کاربرد آن در سطوح کم صورت می گیرد، همچنین در تحقیقات مختلف نشان داده شده است که سیلیسیم در مقادیر کم می تواند تأثیرات قابل توجهی در خصوصیات مختلف گیاهان از جمله عملکرد خیار (*Cucumis sativus* L.) داشته باشد (Shokri et al., 2022). همچنین گزارش شده است این عنصر در شرایط تنش خشکی جذب عناصر اساسی عمده توسط گیاهان را افزایش می دهد (Shokri et al., 2022). در مطالعات مختلف گزارش شده است مصرف سالیسیلیک اسید تا ۲۰۰ پی پی ام منجر به افزایش قابل توجه عملکرد ذرت گردیده است (Raghara & Mousavi, 2018). در آزمایشی که توسط صیامی و همکاران (Siame et al., 2017) انجام شد نشان داده شد که کاربرد ۲۰۰ پی پی ام سالیسیلیک اسید منجر به افزایش ۱۳/۵ درصدی عملکرد ذرت گردید. در آزمایشی محققان عملکرد و کیفیت کاهو (*Lactuca sativa* L.) را در شرایط کاربرد سالیسیلیک اسید و سیلیس گزارش دادند (Barros et al., 2018). زمانی که سیلیس در زیر کوتیکول برگ تجزیه می گردد یک سد دو لایه را ایجاد می کند که از دست رفتن آب ممانعت می کند (Rea et al., 2022). در پژوهشی گزارش شد که کاربرد سالیسیلیک اسید به همراه سیلیس جذب سیلیس توسط گیاه را افزایش داد. قابل ذکر است

شاخص برداشت: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنها اثر اصلی الگوی کشت در سطح پنج درصد بر شاخص برداشت معنی دار بود اما سایر تیمارها اثر معنی داری بر این صفت نداشتند (جدول ۳). بیشترین میزان شاخص برداشت در تیمار کشت مخلوط $C_{50}:M_{50}$ (۴۹/۹ درصد) به دست آمد که تفاوت معنی داری با تیمار کشت خالص ذرت C_{100} نداشت. هرچند تیمارهای کشت مخلوط $C_{80}:M_{60}$ و $C_{80}:M_{40}$ از نظر شاخص برداشت تفاوت معنی داری نداشتند ولی کمترین شاخص برداشت (۴۶/۹ درصد) در تیمار کشت مخلوط $C_{80}:M_{60}$ مشاهده شد که تفاوت کمترین و بیشترین میزان این تیمارها برابر با ۶ درصد می باشد (جدول ۶). عدم تفاوت معنی دار در کاربرد کود و تنش بر شاخص برداشت ذرت را می توان ناشی از تغییر هماهنگ عملکرد بذر و عملکرد بیولوژیک تحت این تیمارها دانست. در تیمار کشت مخلوط ۵۰ درصد ماش و ۵۰ درصد ذرت اختصاص آسمیلات ها به دانه بیشتر از اندام رویشی بوده است و در نتیجه میزان شاخص برداشت در آن بالاتر از سایر تیمارها با وجود عملکرد بالاتر می باشد. که دلیل آن را می توان رقابت درون گونه ای کمتر بین بوته های ذرت در این نسبت کاشت و اختصاص منابع به تعداد بوته های ذرت کمتر و در نتیجه کارایی بالاتر آن ها در انتقال به اندام های بذری می باشد. این نتایج با نتایج به دست آمده از آزمایش قنبری و همکاران (Ghanbari et al., 2010) مطابقت داشت. این محققان نیز شاخص برداشت بالاتری در تیمارهایی که ذرت و کدو (*Cucurbita* sp.) تراکم برابری داشتند (۵۰ درصد ذرت و ۵۰ درصد کدو) نسبت به حالت تک کشتی و مخلوط افزایشی مشاهده کردند. کلانتری خاندانی و همکاران (Kalantari khandani et al., 2018) در آزمایش خود برتری شاخص برداشت ذرت را در کشت مخلوط ذرت و سویا (*Glycine max* L.) نسبت به تک کشتی ذرت گزارش دادند آن ها بیان کردند که ذرت توانایی بالایی در جذب نیتروژن داشته و کارایی جذب و استفاده نیتروژن این گیاه بالا می باشد. از طرفی، سویا از طریق تثبیت بیولوژیکی نیتروژن باعث فراهمی بهتر این عنصر غذایی شده و از این طریق منجر به بهبود شاخص برداشت ذرت در کشت مخلوط می گردد. کشت مخلوط گونه های مختلف، با توجه به وجود اختلافاتی نظیر ارتفاع بوته، می تواند از طریق جذب بیشتر نور موجب افزایش عملکرد و بهبود شاخص برداشت گونه های موجود در مخلوط شود.

بیشترین تعداد بلال (۷/۵ عدد) مربوط به تیمار کشت خالص ذرت C₁₀₀ بود. همچنین، کمترین تعداد ردیف در بلال (۳/۹ عدد) نیز در تیمار کشت مخلوط C₅₀:M₅₀ مشاهده شد (جدول ۶) که تفاوت آن‌ها برابر با ۹۲ درصد می‌باشد.

کاهش میزان اجزای عملکرد ذرت تحت تنش خشکی توسط محققین مختلف گزارش شده است (Mojadam & Modhej, 2012; Miri et al., 2016; Eskandari et al., 2019). اظهار داشتند که اثر کاهش فراهمی آب بر وزن دانه بیشتر از سایر اجزای عملکرد دانه بود به طوری که در شرایط تنش نسبت به حالت آبیاری کامل بر تمامی اجزای عملکرد ذرت مشاهده شد. ضیایی و همکاران (Ziyai et al., 2015) در آزمایش خود بیشترین میزان وزن صد دانه ذرت را در مخلوط با لوبیای خنجر، قرمز و لوبیا سبز گزارش دادند. این محققین اظهار داشتند که رقابت درون‌گونه‌ای بیشتر و نفوذ کمتر نور به تاج پوشش گیاهی یکی از دلایل پایین بودن وزن صد دانه در تک کشتی ذرت باشد. همچنین اسلامی خلیلی و همکاران (Eslami Khalili et al., 2011) در بررسی عملکرد و اجزای عملکرد دو گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) و باقلا (*Vicia faba* L.) بالاترین اجزای عملکرد را در تیمارهای جایگزینی گزارش دادند. کلانتری خاندانی و همکاران (Khandani et al., 2018) بیشترین میزان وزن صد دانه ذرت را در کشت مخلوط ۵۰ درصد ذرت و ۵۰ درصد سویا گزارش دادند. این محققین اظهار داشتند که احتمالاً در این ترکیب تیماری رقابت بین گونه‌ای در کمترین میزان خود بوده و میزان کارایی استفاده از نور و سایر عناصر محیطی افزایش یافته و وزن صد دانه نیز بیشتر شده است. همچنین در کشت‌های مخلوط، رقابت برون‌گونه‌ای سویا نسبت به رقابت درون‌گونه‌ای ذرت کاهش یافته و فضای بیشتری برای رشد ذرت فراهم شده است؛ در نتیجه منجر به افزایش اجزای عملکرد ذرت گردیده است.

نتایج ماش

عملکرد بیولوژیک: مطابق با نتایج تجزیه واریانس جدول ۷ مشخص شد که اثرات اصلی تنش خشکی، الگوی کشت و انواع کود در سطح یک درصد و برهمکنش‌های تنش خشکی × کود، تنش خشکی × الگوی کشت و کود × الگوی کشت در سطح یک درصد و برهمکنش سه عامل تنش خشکی × کود × الگوی کشت در سطح پنج درصد بر عملکرد بیولوژیک ماش معنی‌دار بودند (جدول ۷). بیشترین عملکرد بیولوژیک (۹۶۸۰ کیلوگرم در هکتار) متعلق به تیمار تک‌کشتی ماش، کود ترکیبی نانو Si + Sa و آبیاری کامل بود (جدول ۸). کمترین (۳۲۶۰ کیلوگرم در هکتار) نیز در تیمار کشت مخلوط C₅₀:M₅₀ و C₈₀:M₆₀، عدم مصرف کود و تنش خشکی به‌دست آمد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۱۹۷ درصد

اجزای عملکرد ذرت: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی تنش خشکی در سطح پنج درصد و الگوی کشت در سطح احتمال یک درصد بر وزن صد دانه معنی‌دار بودند ولی دیگر تیمارها بر روی این شاخص معنی‌دار نبودند (جدول ۳). مطابق با نتایج مقایسه میانگین بیشترین میزان وزن صد دانه (۳۱/۴ گرم) در تیمار آبیاری کامل به‌دست آمد که نسبت به تیمار تنش به میزان پنج درصد بیشتر بود (جدول ۵). همچنین، نتایج مقایسه میانگین صفات برای نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نشان داد بیشترین و کمترین میزان وزن صد دانه به‌ترتیب در تیمار کشت مخلوط C₅₀:M₅₀ (۳۲/۱ گرم) و C₈₀:M₆₀ (۲۹/۲ گرم) به‌دست آمد (جدول ۶).

همان‌طور که در جدول نشان داده شده است فقط اثر اصلی تنش خشکی در سطح یک درصد بر تعداد ردیف در بلال معنی‌دار بود ولی دیگر اثرات بر روی این شاخص تاثیر معنی‌داری نداشتند (جدول ۳). بیشترین تعداد ردیف در بلال (۱۳/۹ عدد) مربوط به تیمار آبیاری کامل بود. همچنین، کمترین تعداد ردیف در بلال (۱۲/۵ عدد) نیز در تیمار تنش خشکی مشاهده شد (جدول ۵) که تفاوت آن‌ها برابر با ۱۱ درصد می‌باشد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی تنش خشکی و نسبت‌های مختلف کشت مخلوط در سطح یک درصد بر تعداد دانه در ردیف معنی‌دار بود اما سایر تیمارها اثر معنی‌داری بر این صفت نداشتند (جدول ۳). با توجه به نتایج مقایسه میانگین صفات، با اعمال تنش بر تعداد دانه در ردیف کاسته شد که تفاوت تیمارهای عدم تنش و تنش برای تعداد دانه در ردیف برابر با ۱۶ درصد می‌باشد (جدول ۵). بیشترین تعداد دانه در ردیف در تیمار کشت مخلوط C₅₀:M₅₀ (۴۴/۱ عدد) گزارش شد. هرچند تیمارهای کشت مخلوط C₈₀:M₆₀ و C₈₀:M₄₀ از نظر تعداد دانه در ردیف تفاوت معنی‌داری نداشتند ولی کمترین (۳۵/۵ عدد) در تیمار کشت مخلوط C₈₀:M₆₀ مشاهده شد که تفاوت کمترین و بیشترین میزان این تیمارها برابر با ۲۴ درصد می‌باشد (جدول ۶).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات اصلی تنش خشکی و الگوی کشت در سطح احتمال یک درصد بر تعداد دانه در بلال معنی‌دار بودند ولی دیگر تیمارها بر روی این شاخص معنی‌دار نبودند (جدول ۳). مطابق با نتایج مقایسه میانگین، بیشترین تعداد دانه در بلال (۵۷۸ عدد) در تیمار آبیاری کامل به‌دست آمد که نسبت به تیمار تنش به میزان ۲۹ درصد بیشتر بود (جدول ۵). همچنین، نتایج مقایسه میانگین صفات برای الگوی کشت نشان داد بیشترین و کمترین تعداد دانه در بلال به‌ترتیب در تیمار کشت مخلوط C₅₀:M₅₀ (۶۰۴ عدد) و C₈₀:M₆₀ (۴۵۸ گرم) به‌دست آمد (جدول ۶).

همان‌طور که در جدول نشان داده شده است فقط اثر اصلی الگوی کشت در سطح یک درصد بر تعداد بلال معنی‌دار بود ولی دیگر اثرات بر روی این شاخص تاثیر معنی‌داری نداشتند (جدول ۳).

این محققان بیان داشتند که اثر سیلیس تنها در شرایط تنش شدید مشاهده گردید. کاربرد نانو Si و Sa با انتقال مجدد بیشتر مواد جذب شده تحت تنش و در نتیجه افزایش عملکرد بیولوژیک همراه است (Aldesuquy et al., 2012). نیاوا و همکاران (Nyawade et al., 2020) گزارش دادند که سیلیس با افزایش تولید فتوآسیمیلات‌ها منجر به افزایش تجمع مواد و در نتیجه افزایش عملکرد بیولوژیک گیاهان در کشت مخلوط سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) و لگوم‌ها گردید. این محققان اظهار داشتند که در تک‌کشتی سیب‌زمینی تیمارهایی که در آن‌ها سیلیس اعمال نشده بود منجر به توقف رشد شاخ و برگ و همچنین محدودیت رشد برگ‌ها گردید که این عوامل منجر به کاهش عملکرد بیولوژیک سیب‌زمینی شد.

می‌باشد (جدول ۸). حیدری و همکاران (Heydari et al., 2019) نیز افزایش عملکرد بیولوژیک ماش را تحت کاربرد سالیسیلیک اسید در شرایط عدم تنش خشکی نسبت به عدم کاربرد آن در شرایط تنش خشکی گزارش دادند. همچنین این محققان گزارش دادند که تحت شرایط تنش کاربرد سالیسیلیک اسید عملکرد زیستی ماش را بهبود داد. نتایج این تحقیق نیز همانند تحقیق حیدری و همکاران (Heydari et al., 2019) نشان داد که در شرایط تنش خشکی کاربرد سالیسیلیک اسید، سیلیس و ترکیب این دو منجر به بهبود عملکرد زیستی ماش نسبت به حالت عدم کاربرد کود و در شرایط تنش گردید. لطفی و همکاران (Lotfi et al., 2018) نیز افزایش عملکرد بیولوژیک را در شرایط کاربرد سالیسیلیک اسید گزارش دادند همچنین

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مربوط به ذرت تحت تاثیر تیمارهای مختلف

Table 3- Variance analysis of different traits of maize influenced by different treatments

منابع تغییر S.O. V	درجه آزادی d.f	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت Harvest index	میانگین مربعات M.S				
					وزن ۱۰۰ دانه 100- seeds weight	تعداد ردیف بلال Number of rows	تعداد دانه در ردیف Seeds in a row	تعداد دانه در بلال Seeds in corn cobs	تعداد بلال Number of corn cobs
بلوک Block	2	3608769 ^{ns}	340125 ^{ns}	2.49 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.69 ^{ns}	18.38 ^{ns}	582 ^{ns}	0.29 ^{ns}
تنش خشکی (Ir) Drought stress (Ir)	1	789830003 ^{**}	179957790 ^{**}	0.67 ^{ns}	51.92 [*]	45.93 ^{**}	809 ^{**}	412126 ^{**}	0.01 ^{ns}
خطای (Ir) Error (Ir)	2	3323639	731470	1.73	1.52	0.24	0.98	109	0.16
کود (f) Fertilizer (f)	3	9549952 [*]	2323501 ^{**}	16.53 ^{ns}	1.98 ^{ns}	0.34 ^{ns}	1.11 ^{ns}	900 ^{ns}	0.29 ^{ns}
Ir × F	3	7722948 ^{ns}	1481817 [*]	2.20 ^{ns}	0.69 ^{ns}	0.05 ^{ns}	18.52 ^{ns}	4270 ^{ns}	0.01 ^{ns}
خطای (Ir) f Error (Ir) f	12	2636086	381331	13.14	3.47 ^s	2.03	16.80	3511	0.23
الگوی کشت (pa) Planting arrangement	3	404648109 ^{**}	89616088 ^{**}	39.63 [*]	36.66 ^{**}	2.23 ^{ns}	381 ^{**}	107796 ^{**}	54.19 ^{**}
Ir × pa	3	18168620 ^{**}	3500032 ^{**}	11.73 ^{ns}	2.47 ^{ns}	0.01 ^{ns}	10.72 ^{ns}	466 ^{ns}	0.01 ^{ns}
F × pa	9	1092637 ^{ns}	454285 ^{ns}	4.31 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.23 ^{ns}	2.87 ^{ns}	414 ^{ns}	0.04 ^{ns}
Ir × F × pa	9	3779394 [*]	1006908 [*]	0.99 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.07 ^{ns}	12.29 ^{ns}	1908 ^{ns}	0.01 ^{ns}
خطای کل Error	48	1724746	446029	13.51	2.95	0.96	28.11	2886	0.21
ضریب تغییرات C.V(%)	-	7.0	7.4	7.6	5.6	7.4	13.7	10.5	7.8

ns, *, ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطوح احتمال پنج درصد و یک درصد

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

جدول ۴- اثر متقابل سه گانه تیمارهای مختلف بر صفات مختلف ذرت

Table 4- The triple interaction of different treatments on different traits of maize

کود Fertilizer	الگوی کشت Planting arrangement	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)
		آبیاری کامل Full irrigation		تنش خشکی Drought stress	
Control	C ₁₀₀	26640 ^b	12912 ^b	18720 ^{lg}	9039 ^{e-g}
	C ₈₀ :M ₄₀	20100 ^{d-f}	9600 ^{d-f}	14170 ^{i-k}	6840 ^{kl}
	C ₈₀ :M ₆₀	19500 ^{ef}	8850 ^{e-g}	12800 ^{kl}	6350 ^{lm}
	C ₅₀ :M ₅₀	16830 ^{gh}	8239 ^{g-j}	11021 ^l	5290 ^m
Sa	C ₁₀₀	27410 ^b	13212 ^b	21758 ^{cd}	10270 ^{cd}
	C ₈₀ :M ₄₀	22100 ^{cd}	10210 ^{cd}	15720 ^{h-j}	7200 ^{i-l}
	C ₈₀ :M ₆₀	21200 ^{c-e}	9560 ^{d-f}	14580 ^{i-k}	6680 ^{kl}
	C ₅₀ :M ₅₀	15684 ^{h-j}	7685 ^{h-k}	14080 ^{i-k}	6677 ^{kl}
Nano Si	C ₁₀₀	27610 ^b	13308 ^b	21981 ^{cd}	10375 ^{cd}
	C ₈₀ :M ₄₀	22063 ^{cd}	10480 ^{cd}	15638 ^{h-j}	7600 ^{h-k}
	C ₈₀ :M ₆₀	21011 ^{c-e}	9770 ^{c-e}	14170 ^{i-k}	6840 ^{kl}
	C ₅₀ :M ₅₀	16130 ^{hi}	8310 ^{g-i}	13658 ^{jk}	6897 ^{kl}
Nano Si + Sa	C ₁₀₀	29995 ^a	14758 ^a	22093 ^{cd}	10428 ^{cd}
	C ₈₀ :M ₄₀	22292 ^c	10700 ^c	16130 ^{hi}	7700 ^{h-k}
	C ₈₀ :M ₆₀	21500 ^{c-e}	9940 ^{c-e}	14500 ^{i-k}	6920 ^{kl}
	C ₅₀ :M ₅₀	16978 ^{gh}	8690 ^{f-h}	14238 ^{i-k}	7304 ^{i-l}

میانگین‌هایی، در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند. The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the LSD test at the level of 5% probability are not significantly different.

جدول ۵- اثر اصلی رژیم آبیاری بر صفات مختلف ذرت

Table 5- The main effect of irrigation regime on different maize traits

تنش خشکی Drought stress	وزن ۱۰۰ دانه 100- seeds weight (g)	تعداد ردیف بلال Number of rows	تعداد دانه در ردیف Seeds in a row	تعداد دانه در بلال Seeds in corn cobs
آبیاری کامل Full irrigation	31.4 ^a	13.9 ^a	41.6 ^a	578 ^a
تنش خشکی Deficit irrigation	29.9 ^b	12.5 ^b	35.8 ^b	447 ^b

میانگین‌هایی، در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند. The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the LSD test at the level of 5% probability are not significantly different.

جدول ۶- اثر اصلی الگوی کشت بر صفات مختلف ذرت

Table 6- The main effect of planting arrangement on different maize traits

کشت مخلوط Intercropping	شاخص برداشت Harvest index (%)	وزن ۱۰۰ دانه 100- seeds weight (g)	تعداد ردیف بلال Number of rows	تعداد دانه در ردیف Seeds in a row	تعداد بلال Number of corn cobs
C ₁₀₀	48.0 ^{ab}	30.2 ^b	39.3 ^b	519 ^b	7.5 ^a
C ₈₀ :M ₄₀	47.6 ^b	31.1 ^b	36.0 ^c	468 ^c	6.1 ^b
C ₈₀ :M ₆₀	46.9 ^b	29.2 ^c	35.5 ^c	458 ^c	6.1 ^b
C ₅₀ :M ₅₀	49.9 ^a	32.1 ^a	44.1 ^a	604 ^a	3.9 ^c

میانگین‌هایی، در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the LSD test at the level of 5% probability are not significantly different.

الگوی کشت در سطح یک درصد و برهمکنش سه عامل تنش خشکی × کود × الگوی کشت در سطح پنج درصد بر عملکرد دانه ماش معنی‌دار بودند (جدول ۷). بیشترین عملکرد دانه ماش (۲۵۲۱)

عملکرد دانه: مطابق با نتایج تجزیه واریانس جدول ۷ مشخص شد که اثرات اصلی تنش خشکی، الگوی کشت و انواع کود در سطح یک درصد و برهمکنش‌های تنش خشکی × کود و تنش خشکی ×

تیمارها برابر با ۱۵ درصد می باشد (شکل ۳). همانطور که در نتایج این آزمایش گزارش شده است مشاهده می گردد که تنش خشکی اثر کاهش بیشتری بر روی عملکرد دانه نسبت به عملکرد بیولوژیک داشت و بنابراین کاهش شاخص برداشت در این شرایط منطقی به نظر می رسد. سایر محققین نیز کاهش شاخص برداشت ماش را تحت شرایط تنش خشکی گزارش دادند (Moradi et al., 2008; Kamalvandi & Mirshekari, 2013). در این آزمایش مشاهده شده است که با افزایش تعداد بوته ماش تا ۶۰ درصد بر میزان شاخه برداشت این گیاه افزوده شده است و بعد از آن یعنی در تک کشتی از این میزان کاسته شده است که به نظر می رسد در این حالت با افزایش تعداد بوته و ایجاد رقابت درون گونه ای از شاخص برداشت ماش کاسته شده است. از طرفی تعداد بوته کمتر در کشت مخلوط ۵۰ درصد ماش و ۵۰ درصد ذرت منجر به کاهش شاخص برداشت گردیده است. قلی نژاد و همکاران (Gholi Nejad et al., 2018) نیز در آزمایش خود اظهار داشتند که در تیمارهای کشت های کشت مخلوط ماش به همراه ذرت، شاخص برداشت بیشتر از تک کشتی بود. این محققین اظهار داشتند که تراکم کمتر ماش در کشت های مخلوط منجر به افزایش فضا و به این ترتیب کاهش رقابت درون گونه ای بین بوته ها گردید و توان فتوسنتزی برای بوته ها بعد از گلدهی افزایش یافت که منجر به توزیع بیشتر مواد فتوسنتزی به دانه ها گردید و نهایتاً شاخص برداشت بیشتر را به همراه داشته است. عدم معنی داری تیمارهای کودی بر شاخص برداشت را می توان به دلیل واکنش یکسان این تیمارها بر عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه دانست.

اجزای عملکرد ماش: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی تنش خشکی، الگوی کشت در سطح یک درصد و انواع کود در سطح پنج درصد و همچنین اثرات متقابل تنش خشکی × الگوی کشت در سطح یک درصد بر وزن هزاردانه ماش معنی دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین صفات نشان داد در شرایط آبیاری کامل هرچند تیمارهای C₅₀:M₅₀ و C₈₀:M₆₀ از لحاظ وزن هزاردانه تفاوت معنی داری نداشتند ولی بیشترین میزان این شاخص در شرایط آبیاری کامل و کشت مخلوط C₅₀:M₅₀ (۴۸/۲۵ گرم) به دست آمد. کمترین میزان این شاخص نیز در شرایط تنش خشکی و در تیمار کشت خالص ماش (۳۷/۱۳ گرم) حاصل شد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برای تیمارهای مختلف برابر با ۳۰ درصد می باشد (جدول ۹).

اثرات اصلی الگوی کشت و تنش خشکی در سطح یک درصد و برهمکنش آن ها در سطح یک درصد بر تعداد دانه در غلاف ماش معنی دار بودند (جدول ۷). مقایسه میانگین صفات نشان داد بیشترین تعداد دانه در غلاف در شرایط آبیاری کامل و کشت خالص ماش (۸/۴۱ عدد) به دست آمد و کمترین میزان این شاخص در تیمار تنش خشکی در شرایط کشت مخلوط C₈₀:M₄₀ (۵/۶۹ عدد) گزارش شد

کیلوگرم در هکتار) متعلق به تیمار تک کشتی ماش، کود ترکیبی Si + Sa و آبیاری کامل بود (جدول ۸). کمترین (۸۳۳ کیلوگرم در هکتار) نیز در تیمار کشت مخلوط C₈₀:M₄₀، عدم مصرف کود و تنش خشکی به دست آمد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۲۰۳ درصد می باشد (جدول ۸). آمیور و همکاران (Amiour et al., 2012) بیان داشتند که عوامل ایجادکننده تنش منجر به بسته شدن روزنه ها می شود، در نتیجه تولید مواد فتوسنتزی در این شرایط کاهش می یابد و در نهایت کاهش فتوسنتز بر فرایندهای رشد دانه تأثیر می گذارد.

کاربرد سالیسیلیک اسید از طریق تأثیر بر مریستم های زایشی، القاء گلدهی، افزایش تقسیم و تمایز سلولی موجب بهبود عملکرد گیاه ماش شده است (Heydari et al., 2019). پژوهشگران شرح دادند که این نتیجه در اثر نگهداری بیشتر آب و شکل گیری بهتر اندام های زایشی در شرایط کاربرد سالیسیلیک اسید حاصل گردیده است (Heydari et al., 2019). کائور و همکاران (Kaur et al., 2005) گزارش کردند که فعالیت مخزن در گیاهان نخود تحت تأثیر پرایمینگ بذر با سالیسیلیک، گیاهان نخود تحت تأثیر پرایمینگ بذر با سالیسیلیک متابولیسم ساکارز مانند ساکارز سینتاز، اینورتازها و ساکارز فسفات سینتاز در مقایسه با شاهد بیشتر بود که در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه گردید. لطفی و همکاران (Lotfi et al., 2018) گزارش دادند که استفاده از ترکیب سالیسیلیک اسید و سیلیس باعث تسریع رشد دانه ماش و تولید دانه های بزرگ تر در سطوح مختلف تنش گردید. اثر مفید SA بر عملکرد دانه ممکن است به دلیل جابه جایی فتواسیمیلات های بیشتر به دانه ها در طی پر شدن دانه باشد (Aldesuquy et al., 2012). نیاواد و همکاران (Nyawade et al., 2020) در آزمایش خود در بررسی کشت مخلوط سیب زمینی و لگوم ها بیان کردند که افزایش جذب آب با واسطه سیلیس در شرایط کمبود آب، گیاهان سیب زمینی را قادر می سازد تا دوره های کوتاه تنش آبی را تحمل کنند و اثرات مضر آن بر عملکرد غده را به حداقل برساند.

شاخص برداشت: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی تنش خشکی در سطح پنج درصد و الگوی کشت در سطح یک درصد بر شاخص برداشت معنی دار بود اما سایر تیمارها اثر معنی داری بر این صفت نداشتند (جدول ۷). مقایسه میانگین صفات نشان داد با اعمال تنش از میزان شاخص برداشت کاسته شد. بیشترین میزان شاخص برداشت در آبیاری کامل (۲۸/۰۴ درصد) حاصل شد که نسبت به تیمار تنش به میزان ۴ درصد دارای شاخص برداشت بیشتری بود (شکل ۲). همچنین، بیشترین میزان شاخص برداشت در تیمار کشت مخلوط C₈₀:M₆₀ (۲۹/۷۱ درصد) به دست آمد. کمترین (۲۵/۸۷ درصد) در تیمار کشت مخلوط C₅₀:M₅₀ مشاهده شد که تفاوت معنی داری با تیمار تک کشتی ماش نداشت. تفاوت کمترین و بیشترین میزان این

که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۴۸ درصد بود (جدول ۹).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر اصلی نسبت‌های مختلف کشت مخلوط در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل تنش خشکی $\times$ الگوی کشت مخلوط بر تعداد غلاف در بوته معنی‌دار بودند ولی دیگر تیمارها بر روی این شاخص معنی‌دار نبودند (جدول ۷). مطابق با نتایج مقایسه میانگین، بیشترین تعداد غلاف در بوته (۵۵/۸۲ عدد) در تیمار آبیاری کامل و کشت مخلوط $C_{80\%}:M_{40\%}$ به‌دست آمد که نسبت به تیمار تنش و کشت خالص ماش (۲۸/۱۶ عدد) به میزان ۹۸ درصد غلاف در بوته بیشتری را دارا بود (جدول ۹).

مطابق با نتایج تجزیه واریانس جدول ۷ مشخص شد که اثرات اصلی تنش خشکی و الگوی کشت در سطح یک درصد و برهمکنش‌های تنش خشکی $\times$ الگوی کشت در سطح یک درصد بر تعداد شاخه اصلی ماش معنی‌دار بودند (جدول ۷). بیشترین تعداد شاخه اصلی (۸/۳۰ عدد) متعلق به تیمار کشت مخلوط $C_{50\%}:M_{50\%}$ و آبیاری کامل بود. کمترین (۴/۸۳ عدد) نیز در تیمار کشت مخلوط $C_{80\%}:M_{60\%}$ و تنش خشکی به‌دست آمد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۷۲ درصد می‌باشد (جدول ۹). در این آزمایش در شرایط رقابت درون گونه‌ای زیاد بین بوته‌های ماش در تک‌کشتی و محدودیت آب کاهش تعداد غلاف در این شرایط منطقی به نظر می‌رسد. سایر محققین نیز کاهش تعداد غلاف را در بررسی کشت‌های مخلوط جو-نخود (Hamzei & Seyedi, 2013) و ذرت و سویا (Undie et al., 2012) در اثر رقابت شدید در جذب منابع در شرایط کاهش منابع در دسترس گزارش دادند. کاهش میزان آب مورد نیاز در هنگام رشد رویشی باعث کاهش رشد عمومی و طول دوره رشد گیاه و تشکیل تعداد دانه کمتر می‌شود و از طرف دیگر کمبود مواد قابل انتقال در تیمار تنش خشکی در مرحله رویشی باعث تشکیل نشادن دانه در غلاف می‌شود (Zhu, 2002). امیری ده احمدی و همکاران (Amiri Deh Ahmadi et al., 2010) گزارش دادند که تنش خشکی باعث کاهش تعداد دانه در بوته نخود شد و بیشترین کاهش در زمان اعمال تنش خشکی در مرحله گلدهی به‌دست آمد. آن‌ها دلیل کاهش تعداد دانه را عدم تأمین مواد فتوسنتزی لازم برای رشد جنین و تکامل بذر گزارش کردند. محدودیت رطوبت در زمان گلدهی و غلاف‌دهی موجب کاهش انتقال مواد فتوسنتزی و در نتیجه چروکیدگی دانه‌ها می‌شود. فراهم کردن رطوبت در مرحله گلدهی باعث طولانی‌تر شدن دوره پُرسدن دانه شده و در نتیجه مواد فتوسنتزی بیشتری برای اختصاص به دانه‌ها فراهم می‌شود (Ullah et al., 2002). اسکندری و همکاران (Eskandari et al., 2019) در آزمایش خود کاهش وزن هزار دانه ماش را تا ۱۷ درصد تحت تنش خشکی گزارش دادند. محققین علت کاهش وزن دانه ماش در اثر تنش کمبود آب را کاهش طول دوره پر شدن دانه و کاهش تولید و

انتقال مواد فتوسنتزی به دانه دانسته‌اند (Noryani, 2013). تفاوت در ارتفاع گیاهان موجود در کشت مخلوط می‌تواند باعث افزایش جذب نور توسط پوشش گیاهی و در نتیجه افزایش تولید مواد فتوسنتزی و اختصاص آن‌ها به دانه‌ها شود (Banik et al., 2006). کاهش تعداد شاخه جانبی به موازات افزایش شدت تنش خشکی می‌تواند در راستای کاهش حجم رویشی گیاه برای کاهش تبخیر و ترقق باشد. اما در تیمارهای مخلوط عدم تداخل آشیان اکولوژیکی دو گیاه موجب دسترسی بیش‌تر ریشه به رطوبت شده و اثرات کاهندگی تنش خشکی را در گیاهان کم‌تر کرده است (Fallah et al., 2018) به طوری که در کشت مخلوط ۵۰ درصد ماش و ۵۰ درصد ذرت میزان رقابت بین بوته‌ها کمتر از سایر نسبت‌های کشت بود. در بررسی کشت مخلوط شنبلیله با سیاهدانه نشان داده شده است که شنبلیله در کشت مخلوط با سیاهدانه نسبت به کشت خالص از تعداد شاخه‌های جانبی بیش‌تری برخوردار بود و دلیل این برتری، استفاده بهتر از منابع توسط کشت مخلوط عنوان شده است (Fallah et al., 2018).

نسبت برابری زمین (Land Equivalent Ratio): با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثرات اصلی کود و الگوی کشت در سطح یک درصد و اثرات متقابل تنش خشکی $\times$ الگوی کشت در سطح یک درصد و همچنین اثر سه‌گانه تنش خشکی $\times$ کود $\times$ الگوی کشت در سطح پنج درصد برای شاخص نسبت برابری زمین معنی‌دار بودند (جدول ۱۰). نتایج مقایسه صفات نشان داد بیشترین مقدار نسبت برابری زمین در شرایط آبیاری کامل و کشت مخلوط $C_{80\%}:M_{60\%}$ و با حضور تیمار کودی نانو $Si + Sa$ (۱/۵۷) گزارش شد. همچنین، کمترین میزان این شاخص در تیمار شرایط تنش و کشت مخلوط $C_{50\%}:M_{50\%}$ و شاهد بدون کود (۱/۱۰) مشاهده شد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۴۳ درصد می‌باشد (جدول ۱۱). در تمامی تیمارهای کشت مخلوط میزان شاخص نسبت برابری زمین هم در شرایط تنش خشکی و هم آبیاری کامل بالاتر از یک بود که نشان‌دهنده‌ی مزیت کشت مخلوط نسبت به کشت خالص است. تیمار شاهد (بدون کاربرد کود) کشت مخلوط جایگزینی (ذرت ۵۰٪ و ماش ۵۰٪) نسبت برابری زمین بیش‌تری داشت و با کاربرد کود به‌خصوص کود نانو کشت مخلوط افزایشی نسبت برابری زمین بالاتری ایجاد نمود، بنابراین می‌توان با استفاده از نانوکودها تراکم و عملکرد را حتی در شرایط کمبود آب افزایش داد. افزایش جذب عناصر غذایی و آب به‌وسیله سیستم ریشه‌ای متفاوت در کشت مخلوط (Stolz & Nadeau, 2014) در شرایط تنش خشکی باعث شد که LER افزایش یابد که با نتایج سایر محققین مطابقت داشت (Mabudi & Zehtab Salmasi, 2017; Mohavieh Assadi et al., 2020).

جدول ۷- تجزیه واریانس صفات مربوط به ماش تحت تاثیر تیمارهای مختلف
 Table 7- Variance analysis of different traits of Mung bean influenced by different treatments

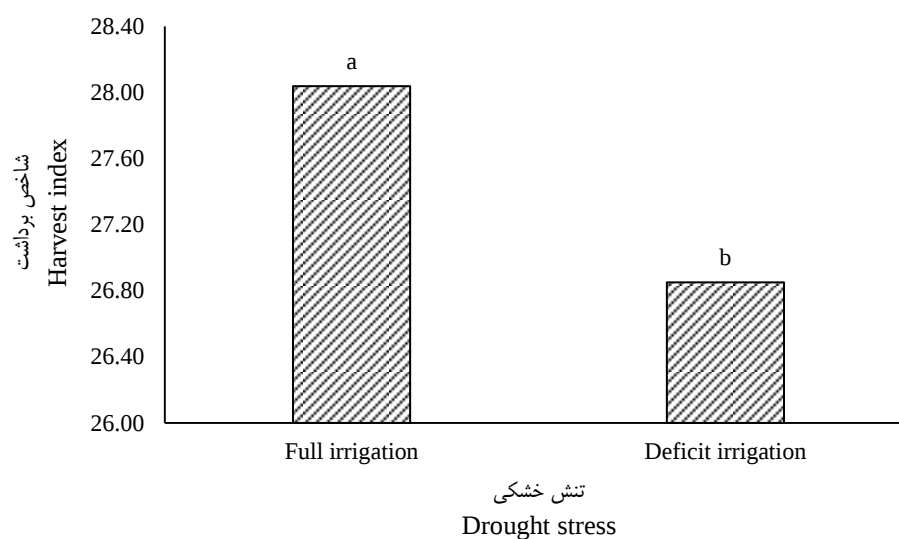
منابع تغییر S.O. V	درجه آزادی d.f	M.S میانگین مربعات						شاخه اصلی Branch
		عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت Harvest index	وزن ۱۰۰۰ دانه 1000- seeds weight	تعداد دانه در غلاف Number of seeds per pod	تعداد غلاف در بوته Number of pods per plant	
بلوک Block	2	206365 ^{ns}	7485 ^{ns}	0.56 ^{ns}	0.72 ^{ns}	0.24 ^{ns}	2.32 ^{ns}	0.38 ^{ns}
تنش خشکی (Ir) Drought stress (Ir)	1	62568333 ^{**}	5829233 ^{**}	33.84 [*]	953.19 ^{**}	52.22 ^{**}	39.53 ^{ns}	40.82 ^{**}
خطای (Ir) Error (Ir)	2	248038	17136	0.40	2.34	0.08	10.76	0.41
کود (f) Fertilizer (f)	3	772161 ^{**}	122248 ^{**}	10.09 ^{ns}	34.01 [*]	0.49 ^{ns}	11.40 ^{ns}	0.60 ^{ns}
Ir × F	3	1116933 ^{**}	84222 ^{**}	3.02 ^{ns}	9.82 ^{ns}	0.45 ^{ns}	11.59 ^{ns}	0.14 ^{ns}
خطای (Ir) f Error (Ir) f	12	127486	13139	3.19	7.25	0.54	15.26	0.23
الگوی کشت (Pa) Planting arrangement	3	45853056 ^{**}	2900627 ^{**}	64.71 ^{**}	62.99 ^{**}	8.73 ^{**}	2086 ^{**}	21.94 ^{**}
Ir × Pa	3	4183594 ^{**}	259890 ^{**}	5.98 ^{ns}	50.66 ^{**}	2.04 ^{**}	146.02 [*]	2.47 ^{**}
F × Pa	9	545623 ^{**}	22024 ^{ns}	3.20 ^{ns}	2.79 ^{ns}	0.09 ^{ns}	7.20 ^{ns}	0.11 ^{ns}
Ir × F × Pa	9	333606 [*]	29553 [*]	1.00 ^{ns}	4.45 ^{ns}	0.03 ^{ns}	14.64 ^{ns}	0.07 ^{ns}
خطای کل Error	48	153051	13251	3.39	5.70	0.27	19.30	0.29
ضریب تغییرات (%) C.V		7.5	8.1	6.7	5.6	7.4	11.1	8.5

ns, *, ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطوح احتمال پنج درصد و یک درصد
 ns, *, ** are non significant and significant at 5% and 1% of probability levels, respectively

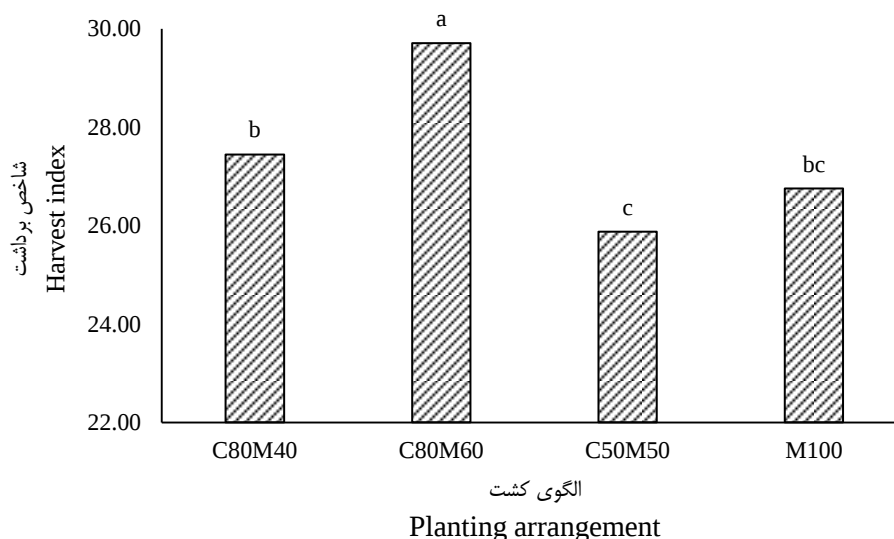
 جدول ۸- اثر متقابل سه گانه تیمارهای مختلف بر صفات مختلف ماش
 Table 8- The triple interaction of different treatments on different traits of Mung bean

کود Fertilizer	الگوی کشت Planting arrangement	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)
		آبیاری کامل Full irrigation		تنش خشکی Drought stress	
Control	C ₈₀ :M ₄₀	4760 ^{g-k}	1300 ^{g-j}	3332 ^{pq}	833 ^o
	C ₈₀ :M ₆₀	4890 ^{f-j}	1430 ^{e-g}	3260 ^q	898 ^{m-o}
	C ₅₀ :M ₅₀	4970 ^{f-h}	1360 ^{f-i}	3260 ^q	840 ^{n-o}
	M ₁₀₀	7887 ^b	2160 ^b	5500 ^{d-f}	1399 ^{e-h}
Sa	C ₈₀ :M ₄₀	4608 ^{i-m}	1292 ^{g-j}	4147 ^{k-o}	1100 ^{kl}
	C ₈₀ :M ₆₀	5290 ^{e-h}	1640 ^{cd}	3940 ^{n-p}	1093 ^{kl}
	C ₅₀ :M ₅₀	5660 ^{c-e}	1500 ^{d-f}	4200 ^{k-o}	1000 ^{l-o}
	M ₁₀₀	8470 ^b	2256 ^b	6028 ^{cd}	1579 ^{c-e}
Nano Si	C ₈₀ :M ₄₀	4401 ⁱ⁻ⁿ	1242 ^{g-k}	4004 ^{m-o}	1131 ^{j-l}
	C ₈₀ :M ₆₀	5380 ^{e-g}	1650 ^{cd}	3732 ^{o-q}	1120 ^{j-l}
	C ₅₀ :M ₅₀	5660 ^{cd}	1570 ^{c-e}	4050 ^{l-o}	1028 ^{l-n}
	M ₁₀₀	8360 ^b	2232 ^b	5852 ^{c-e}	1624 ^{cd}
Nano Si + Sa	C ₈₀ :M ₄₀	4680 ^{l-l}	1296 ^{g-j}	4301 ^{j-o}	1219 ^{h-k}
	C ₈₀ :M ₆₀	5380 ^{e-g}	1710 ^c	4000 ^{m-o}	1173 ^{i-l}
	C ₅₀ :M ₅₀	6030 ^{cd}	1560 ^{c-e}	4450 ⁱ⁻ⁿ	1086 ^{k-m}
	M ₁₀₀	9680 ^a	2521 ^a	6215 ^c	1711 ^c

میانگین‌هایی، در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی داری ندارند.
 The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the LSD test at the level of 5% probability are not significantly different.



شکل ۲- اثر اصلی تنش خشکی بر روی شاخص برداشت ماش
Figure 2- The main effect of drought stress on mung bean harvest index



شکل ۳- اثر اصلی الگوی کشت بر روی شاخص برداشت ماش
Figure 3- The main effect of planting arrangement on mung bean harvest index

سالیسیلیک اسید به دست آمد. این نتایج همچنین مطابق با نتایج عزیز و همکاران (Aziz et al., 2012) و حمدالله و همکاران (Hamd Nyawade et al., 2014) بود. نیاواد و همکاران (2020) نیز افزایش قابل توجه LER را در کشت مخلوط سیب زمینی با لگومها همراه با کاربرد سیلیس گزارش دادند. این محققین اظهار داشتند که نسبت های برابری زمین ثبت شده در سیستم های کشت مخلوط بیشتر از یک بود، که نشان می دهد ادغام لگومها در سیستم های کشت مبتنی بر سیب زمینی باعث بهبود رشد و عملکرد

برتری نسبت برابری زمین در نسبت های مخلوط تحت شرایط تنش نشان دهنده بهره وری بهتر از رطوبت در کشت مخلوط و تا حدودی کاهش اثرات تنش خشکی می باشد (Fallah et al., 2018). تأثیر کاربرد کودهای به کار برده شده در آزمایش و جذب بیشتر آنها در کشت مخلوط را در افزایش نسبت برابری زمین در شرایط تنش و آبیاری نمی توان نادیده گرفت. سعید و حمدالله (Said & Hamd- 2018) در آزمایش نشان داده شده که بیشترین میزان نسبت برابری زمین در الگوی کشت مخلوط ۲:۲ ذرت و سویا و کاربرد

بین تیمارهای مختلف کشت مخلوط نیز از نظر نسبت برابری زمین تفاوت معنی داری وجود داشت. تصور می شود که افزایش میزان بوته ماش در مخلوط با ذرت در افزایش نسبت برابری زمین مؤثر بوده است. علت بالا بودن نسبت برابری زمین بیش تر از یک در شرایط کاربرد بیشتر بقولات را می توان تثبیت و جذب نیتروژن در بقولات دانست (Fallah et al., 2018). به طور کلی برای صفت مذکور مجموع دو گیاه در کشت مخلوط از رابطه مکملی مثبت پیروی می کنند.

محصولات در مخلوط می شود. همچنین بیان کردند که شاخص بهره وری سیستم مخلوط بیشتر از تک کشتی سیب زمینی بود، که نشان دهنده این موضوع بود که تسهیلات در رقابت بین گونه ای بیشتر از رقابت درون گونه ای بود (Nyawade et al., 2020) و نشان دهنده این مطلب که کشت مخلوط منجر به بهره وری بیشتر در استفاده از زمین و بهره وری منابع می گردد (Machiani et al., 2018). این توانایی کشت مخلوط با کاربرد سیلیس با توجه به مقادیر بالاتر LER در اثر کاربرد آن افزایش یافت (Nyawade et al., 2020).

جدول ۹- اثر متقابل دوگانه تنش خشکی × الگوی کشت بر صفات مختلف ماش

Table 9- Dual interaction of drought stress × planting arrangement on different mung bean traits

تنش خشکی Drought stress	الگوی کشت Planting arrangement	وزن ۱۰۰۰ دانه 1000- seeds weight (g)	تعداد دانه در غلاف Number of seeds per pod	تعداد غلاف در بوته Number of pods per plant	شاخه اصلی Branch
آبیاری کامل Full irrigation	C ₈₀ :M ₄₀	44.40 ^b	7.58 ^{bc}	55.82 ^a	6.14 ^c
	C ₈₀ :M ₆₀	47.65 ^a	7.93 ^b	35.44 ^e	5.60 ^d
	C ₅₀ :M ₅₀	48.25 ^a	7.44 ^c	41.97 ^c	8.30 ^a
	M _{100%}	44.17 ^b	8.41 ^a	31.11 ^f	7.57 ^b
تنش خشکی Deficit irrigation	C ₈₀ :M ₄₀	42.05 ^c	5.69 ^e	47.73 ^b	5.42 ^d
	C ₈₀ :M ₆₀	41.15 ^c	5.88 ^e	37.11 ^{de}	4.83 ^e
	C ₅₀ :M ₅₀	38.93 ^d	6.32 ^d	40.30 ^{cd}	6.49 ^c
	M ₁₀₀	37.13 ^d	7.57 ^{bc}	28.16 ^f	5.66 ^d

میانگین هایی، در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی داری ندارند.

The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the LSD test at the level of 5% probability are not significantly different.

جدول ۱۰- تجزیه واریانس صفات مربوط به نسبت برابری زمین تحت تاثیر تیمارهای مختلف

Table 10 - Analysis of variance of traits related to LER the influence of different treatments

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات M.S LER
Block بلوک	2	0.016 ^{ns}
Drought stress (Ir) (Ir) تنش خشکی	1	0.002 ^{ns}
Error (Ir)(Ir) خطای	2	0.013
Fertilizer (f) (f) کود	3	0.13 ^{**}
Ir × F	3	0.04 ^{ns}
Error (Ir) f (Ir) f خطای	12	0.014
الگوی کشت (Pn)	2	0.078 ^{**}
Planting arrangement		
Ir × Pn	2	0.034 ^{**}
F × Pn	6	0.001 ^{ns}
Ir × F × Pn	6	0.006 [*]
Error کل خطای	32	0.004
C.V(%) ضریب تغییرات	-	4.80

ns, *, ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطوح احتمال پنج درصد و یک درصد

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

جدول ۱۱- اثر متقابل سه گانه بر روی شاخص LER

Table 11- Triple interaction on LER

کود Fertilizer	الگوی کشت Planting arrangement	نسبت برابری زمین LER	نسبت برابری زمین LER
		آبیاری کامل Full irrigation	تنش خشکی Drought stress
Control	C ₈₀ :M ₄₀	1.17 ^{hi}	1.35 ^{c-f}
	C ₈₀ :M ₆₀	1.17 ^{hi}	1.35 ^{c-f}
	C ₅₀ :M ₅₀	1.19 ^{g-i}	1.10 ⁱ
Sa	C ₈₀ :M ₄₀	1.34 ^{c-f}	1.41 ^{b-e}
	C ₈₀ :M ₆₀	1.45 ^{bc}	1.35 ^{c-f}
	C ₅₀ :M ₅₀	1.25 ^{f-h}	1.29 ^{lg}
Nano Si	C ₈₀ :M ₄₀	1.35 ^{c-f}	1.43 ^{b-d}
	C ₈₀ :M ₆₀	1.48 ^{ab}	1.35 ^{c-f}
	C ₅₀ :M ₅₀	1.33 ^{d-f}	1.30 ^{ef}
Nano Si + Sa	C ₈₀ :M ₄₀	1.43 ^{b-d}	1.45 ^{bc}
	C ₈₀ :M ₆₀	1.57 ^a	1.35 ^{c-f}
	C ₅₀ :M ₅₀	1.40 ^{b-e}	1.34 ^{c-f}

میانگین‌هایی، در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.
The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the LSD test at the level of 5% probability are not significantly different

نتیجه‌گیری

استفاده بر رابطه بین تنوع درون گونه‌ای در محصولات مخلوط و عملکرد تحت تنش خشکی تأثیر گذاشت. این مطالعه اثر مفید کشت مخلوط ماش با ذرت و کاربرد سیلیس و سالیسیلیک اسید را بر بهره‌وری منابع نشان داد. کاربرد کود نانوذرات سیلیس و سالیسیلیک اسید تأثیر مثبتی بر عملکرد دانه و بیولوژیک هر دو گیاه و همین‌طور نسبت برابری زمین داشت به طوری که کاربرد این ترکیبات در کنار هم در شرایط تنش منجر به افزایش میزان صفات فوق گردید و از اثرات منفی تنش خشکی بر گیاه کاست. به‌طور کلی، با توجه به این که میزان نسبت برابر زمین در شرایط تنش خشکی و آبیاری کامل بیشتر از یک بود بنابراین می‌توان سودمند بودن کشت مخلوط ذرت و ماش را نسبت به تک‌کشتی در هر دو شرایط تنش و عدم تنش گزارش داد. با توجه به نتایج به‌دست آمده جهت دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار و همین‌طور کاهش اثرات مضر تنش خشکی که عامل اصلی محدودیت تولید در ایران می‌باشد کاربرد نانو کودهایی مانند نانو ذرات سیلیس و تنظیم‌کننده‌های رشد از قبیل سالیسیلیک اسید به همراه الگوهای کشت مخلوط می‌تواند روش کارآمدی در این شرایط باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد که به‌طور کلی تنش خشکی باعث کاهش تمامی صفات مورد بررسی گردید. در حالی که کشت مخلوط با افزایش تنوع، تأثیر قابل‌توجهی بر صفات مهم زراعی هم در شرایط آبیاری مطلوب و هم تنش خشکی داشت. اگرچه میزان عملکرد محصولات در حالت تک‌کشتی بیشتر از کشت‌های مخلوط بود که دلیل آن کاهش تراکم بوته هر یک از گیاهان در کشت مخلوط نسبت به حالت تک‌کشتی آن است اما میزان LER بالاتر از یک در کشت‌های مخلوط نشان‌دهنده بهره‌وری بالاتر از زمین در این الگوهای کاشت نسبت به تک‌کشتی بود. با توجه به این که ماش سبب تثبیت بیولوژیکی نیتروژن شده و ذرت نیز از این نیتروژن استفاده بهینه را نموده است، کاشت این دو گیاه در کشت مخلوط سبب بهبود رشد گیاه و بهره‌وری از زمین در ذرت و ماش شده است. در این آزمایش افزایش نسبت ماش تأثیر مطلوبی در افزایش نسبت برابری زمین و در نتیجه بهره‌وری منابع داشت به طوری که بالاترین میزان LER در تیمار مخلوط C₈₀:M₆₀ در شرایط عدم تنش و کاربرد نانو Si + Sa به‌دست آمد. به احتمال زیاد، متغیرهای آزمایشی متعدد، مانند تراکم گیاه، گونه‌های کشت مخلوط، تنش و نوع کودهای مورد

References

1. Aldesuquy, H. S., Abbas, M. A., Abo-Hamed, A. A., Elhakem, A. H., & Alsokari, S. S. (2012). Glycine betaine and salicylic acid induced modification in productivity of two different cultivars of wheat grown under water stress. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 8, 72-89.
2. Alibakhshi, E., & Mirzakhani, M. (2016). Mixed cropping of legumes and maize by the use of urea. *Journal of*

- Crop Ecophysiology*, 10(3), 567-583.
3. Alizadeh, A., & Kamali, G. A. (2007). *Water Needs of Plants in Iran*. Imam Reza Publications, Mashhad, Iran.
4. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300(9), D05109.
5. Amanullah, R., Khalid, S. H., Khalil, F., Elshikh, M. S., Alwahibi, M. S., Alkahtani, J., Imranuddin, & Imran. (2021). Growth and dry matter partitioning response in cereal-legume intercropping under full and limited irrigation regimes. *Scientific Reports*, 11, 12585. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92022-4>
6. Amanullah, R., Lidman, C., Rubin, D., Aldering, G., Astier, P., Barbary, K., Burns, M. S., Conley, A., Dawson, K. S., Deustua, S. E., Doi, M., Fabbro, S., Faccioli, L., Fakhouri, H. K., Folatelli, G., Fruchter, A. S., Furusawa, H., Garavini, G., Goldhaber, G., Goobar, A., Groom, D. E., Hook, I., Howell, D. A., Kashikawa, N., Kim, A. G., Knop, R. A., Kowalski, M., Linder, E., Meyers, J., Morokuma, T., Nobili, S., Nordin, J., Nugent, P. E., Östman, L., Pain, R., Panagia, N., Perlmutter, S., Raux, J., Ruiz-Lapuente, P., Spadafora, A. L., Strovink, M., Suzuki, N., Wang, L., Wood-Vasey, W. M., & Yasudal, N. (2010). Spectra and Hubble Space Telescope light curves of six type Ia supernovae at $0.511 < z < 1.12$ and the Union compilation. *Journal of Astrophys*, 716, 712.
7. Amiour, N., Imbaud, S., Clement, G., Agier, N., Zivy, M., Valot, B., Balliau, T., Armengaud, P., Quillere, I., Canas, R., Tercet-Laforgue, T., & Hirel, B. (2012). The use of metabolomics integrated with transcriptomic and proteomic studies for identifying key steps involved in the control of nitrogen metabolism in crops such as maize. *Journal of Experimental Botany*, 63, 5017-33. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers186>.
8. Amiri Deh Ahmadi, S. R., Parsa, M., & Ganjeali, A. (2010). The effects of drought stress at different phenology stage on morphological traits and yield components of a chickpea (*Cicer arietinum* L.) under greenhouse conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8, 301-317. <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i1.7406>
9. Aqaei, P., Weisany, W., Diyanat, M., Razmi, J., & Struik, P. C. (2020). Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress, *Journal of Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727508>
10. Arouiee, H., Nasser, M., Neamati, H., & Kafi, M. (2014). Effects of silicon on salinity tolerance in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 104, 165-172.
11. Aziz, A., Abou-Elela, M., Usama El-Razek, A. A., & Khalil, H. E. (2012). Yield and its components of maize/soybean intercropping systems as affected by planting time and distribution. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6, 238-245.
12. Banik, P., Midya, A., Sarkar, B. K., & Ghose, S. S. (2006). Wheat and chickpea intercropping systems in additive series experiment: advantages and smothering. *Agronomy Journal*, 24, 324-332.
13. Bargaz, A., Nasielski, J., Isaac, M. E., Jensen, E. S., & Carlsson, G. (2021). Faba bean variety mixture can modulate faba bean-wheat Intercrop Performance Under Water Limitation. *Frontiers in Agronomy*, 3, 655973. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.655973>
14. Barros, T. C., De Mello Prado, R., Garcia Roque, C., Ribeiro Barzotto, G., & Wassolowski, C. R. (2018). Silicon and salicylic acid promote different responses in legume plants. *Journal of Plant Nutrition*, 41, 2116-2125.
15. Bedoussac, L., Journet, E., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., Prieur, L., & Justes, E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 911-935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>
16. Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M., Jatoti, W. N., Malghani, N. A., Shah, A. N., & Shah, A. (2021). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. *Silicon*, 13, 4757-4772. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4>
17. Bybee-Finley, K., & Ryan, M. R. (2018). Advancing intercropping research and practices in industrialized agricultural landscapes. *Agriculture*, 8, 80. <https://doi.org/10.3390/agriculture8060080>
18. Daneshman, F., Arvin, M. J., Keramat, B., & Momeni, N. (2012). Interactive effects of salt stress and salicylic acid on germination and plant growth parameters of maize (*Zea mays* L.) under field conditions. *Plant Process and Function*, 1(1), 56-70.
19. Darvizheh, H., Zahedi, M., & Abbaszadeh, B. (2019). Effects of foliar application of salicylic acid and spermine on the growth and root morphological characteristics of purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.) under drought stress. *Journal of Plant Process and Function*, 8(30), 225-242.
20. Eskandari, H., Alizadeh Amrai, A., & Kazemi, K. (2019). The effect of drought stress due to partial root irrigation on water use efficiency and grain yield of corn (*Zea mays* L.) and mung bean (*Vigna radiate* L.) in different intercropping patterns. *Environmental Stress in Crop Science*, 12(1), 29-40. <https://doi.org/10.22077/escs.2018.1133.1233>
21. Eslami Khalili, F., Pirdashti, H., & Motaghian, A. (2011). Evaluation of barley (*Hordeum vulgare* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.) yield in different density and mixture intercropping via competition indices. *Journal of Agroecology*, 25, 94-105.

22. Fallah, S., Kakoulvand, R., & Abasi souraki, A. (2018). Effect of plant competition on yield and yield components of black cumin and fenugreek under drought stress conditions. *Journal of Plant Production Science*, 25(2), 35-51. <https://doi.org/10.22069/jopp.2018.12836.2154>
23. Farahbakhsh, H., & Shamsaddin Saiid, M. (2011). Effect of seed priming with NaCl on maize germination under different saline conditions. *African Journal of Agricultural Research*, 66095-6099.
24. Farnia, A., Noormohammadaei, G., Naderi, A., Darvish, F., & Majidi-Hervan, I. (2006). Effect of drought stress and strains of *Bradyrhizobium japonicum* on grain yield and associated characteristics in soybean in Borujerd. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 8(3), 201-214.
25. Farooq, M., Gogoi, N., Barthakur, S., Baroowa, B., Bharadwaj, N., Alghamdi, S. S., & Siddique, K. H. M. (2017). Drought stress in grain legumes during reproduction and grain filling. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203, 81-102. <https://doi.org/10.1111/jac.12169>
26. Ghanbari, A., Ghadiri, H., Ghafari Moghadam, M., & Safari, M. (2010). Study of intercropping of corn (*Zea mays* L.) and squash (*Cucurbita* sp.) and its effect on weed control. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 41(1), 43-55. (in Persian).
27. Gholi Nejad, A., Yadavi, A., Movahhedi Dehnavi, M., & Farajee, H. (2018). The effect of additive intercropping on yield and yield components of sweet corn (*Zea mays* L.var. Saccharata) and mungbean (*Vigna radiata* L.) and weed biomass. *Journal of Agroecology*, 10(1), 120-134. <https://doi.org/10.22067/jag.v10i1.54036>
28. Gliessman, S. R. (1990). *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. Springer-Verlag, New York 380 pp.
29. Gomaa, M. A., Kandil, E. E., El-Dein, A. A. M. Z., Abou-Donia, M. E. M., Ali, H. M., & Abdelsalam, N. R. (2021). Increase maize productivity and water use efficiency through application of potassium silicate under water stress. *Scientific Reports*, 11, 224. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80656-9>
30. Hafez, E. M., Osman, H. S., Gawayed, S. M., Okasha, S. A., Omara, A. E. -D., Sami, R., Abd El-Monem, A. M. & Abd El-Razek, U. A. (2021). Minimizing the adversely impacts of water deficit and soil salinity on maize growth and productivity in response to the application of plant growth-promoting rhizobacteria and silica nanoparticles. *Agronomy*, 11, 676. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040676>
31. Hamd Alla, W. A., Shalaby, E. M., Dawood, R. A., & Zohry, A. A. (2014). Effect of cowpea (*Vigna sinensis* L.) with maize (*Zea mays* L.) intercropping on yield and its components. World Academy of Science, Engineering and Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(11), 1170-1176.
32. Hamzei, J., & Seyed, M. (2013). Evaluation of barley (*Hordeum vulgare* L.) and chickpea (*Cicer arietinum* L.) intercropping systems using advantageous indices of interference conditions. *Journal of Agriculture Science*, 6, 1-12.
33. Hashemi Dehkourdi, E., Mousavi, M., Moallemi, N., & Ghafariyan moghareb, M. H. (2017). Effect of nanoparticles of titanium dioxide (anatase) on physiological characteristics of strawberry (*Fragaria ananassa* c.v. Queen Elisa) in hydroponic condition. *Journal of Plant Process and Function*, 5(16), 1-8.
34. Heydari, H., Alizadeh, Y., & Fazeli, A. (2019). Effect of seed pretreatment and foliar application of salicylic acid on some physiological characteristics and yield of mung bean (*Vigna radiata* L.) under drought stress conditions. *Journal of Plant Production*, 26(2), 127-141. <https://doi.org/10.22069/jopp.2019.14863.2327>
35. Hu, F., Feng, F., Zhao, C., Chai, Q., Yu, A., Yin, W., & Gan, Y. (2017). Integration of wheat-maize intercropping with conservation practices reduces CO₂ emissions and enhances water use in dry areas. *Journal of Soil Tillage Research*, 169, 44-53.
36. Janmohammadi, M., Yousefzadeh, S., Dashti, Sh., & Sabaghnia, N. (2017). Effects of exogenous application of nano particles and compatible organic solutes on sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Botanica Serbica*, 41(1), 37-46.
37. Javanmard, A., Dabbagh Mohammadi Nasab, A., Javanshir, A., Moghaddam, M., & Janmohammadi, H. (2012). Effects of Maize Intercropping with legumes on forage yield and quality. *Sustainable Agricultural and Production Science*, 22(3), 137-149. (in Persian).
38. Jensen, E. S., Carlsson, G., & Hauggaard-Nielsen, H. (2020). Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: a global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>
39. Kalantari khandani, A., Kocheiki, A. R., & Nasiri Mahalati, M. (2018). Effects of maize-soybean cultivars as replacement series in intercropping on yield and land equivalent ratio. *Journal of Applied Crop Research*, 31(2), 21-45.
40. Kalteh, M., Alipour, Z. T., Ashraf, S., Aliabadi, M. M., & Nosratabadi, A. F. (2014). Effect of silica nanoparticles on basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress. *Journal of Chemical Health Risks*, 4, 49-55.
41. Kamalvandi, S., & Mirshekari, F. (2013). Effect of drought stress on yield and yield components of mung cultivars. *Journal of Plant Production Science*, 4(2), 14-18.
42. Kaur, S., Gupta, A. K., & Kaur, N. (2005). Seed priming increases crop yield possibly by modulating enzymes of sucrose metabolism in chickpea. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 191, 81-87.

43. Khadim, S. A., Ramroudi, M., Golavi, M., & Rusta, M. J. (2011). The effect of drought stress and different proportions of manure and superabsorbent polymer application on yield and yield components of grain corn (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 42(1), 115-123.
44. Khoramivafa, M., Eftekharinasab, N., Sayyadian, K., & Najafy, A. (2011). Water use efficiency in medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo* L. var. *styriac*)/ chickpea (*Cicer arietinum* L.)- lentil (*Lens esculenta* Moench.) intercropping system associated with several nitrogen levels. *Journal of Agroecology*, 3(2), 245-253. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v3i2.13533>
45. Layek, J., Das, A., Mitran, T., & Nath, C. (2018). Cereal+legume intercropping: an option for improving productivity and sustaining soil health. in *Legumes for Soil Health and Sustainable Management* (eds. Meena et al.) 347-386 (Springer, 2018). https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_11
46. Li-li, M., Li-Zhen, Z., Si-ping, Z., Evers, J. B., Vanderwerf, W., Jiug, W. J., Hong-quang, S., Zhi Cheng, S., & Spiertz, H. (2017). Resource use efficiency, ecological intensification and sustainability of intercropping systems. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(8), 1542-1550.
47. Lithourgidis, A. S., & Dordas, C. A. (2010). Forage yield, growth rate, and nitrogen uptake of faba bean intercrops with wheat, barley, and rye in three seeding ratios. *Crop Science*, 50, 2148-2158. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.12.0735>
48. Lotfi, R., Ghassemi-Golezani, K., & Najafi, N. (2018). Grain filling and yield of mung bean affected by salicylic acid and silicon under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1457686>
49. Mabudi Bileusar, H., & Zehtab Salmasi, S. (2017). Evaluation of yield and advantages of corn (*Zea mays* L.) and sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) intercropping. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science*, 27(1), 1-11.
50. Machiani, M. A., Javanmarda, A., Morshedloo, M. A., & Maggi, F. (2018). Evaluation of competition, essential oil quality and quantity of peppermint intercropped with soybean. *Industrial Crops and Products*, 111, 743-754. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.052>
51. Mahmoodi, K., Alizadeh, Y., Abdul-Hamid, H., & Naji, H. R. (2020). Effect of nano SiO₂ on physiological features of *Pistacia atlantica* subsp. *Mutica* under drought stress. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 26(4), 85-100. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2020.13986.1715>
52. Mazaheri, D., Madani, A., & Oveysi, M. (2006). Assessing the land equivalent ratio (LER) of two corn (*Zea mays* L.) varieties intercropping at various nitrogen levels in Karaj, Iran. *Central European Agriculture*, 7(2), 359-364.
53. Mehrabian moghadam, N., Arvin, M. J., Khajouinejad, G. H., & Maghsoudi, K. (2011). Effect of salicylic acid on growth and forage and grain yield of maize under drought stress in field conditions. *Seed and Plant Production*, 27(2), 41-55.
54. Miri, H. R., Shokani, M. M., & Armin, M. (2016). Reaction of yield and yield components of maize under relative drought of root and potassium fertilizer. *Journal of Agronomy*, 111, 35-43.
55. Mohavieh Assadi, 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. <https://doi.org/10.22067/ijpr.v11i2.78361>
56. Mojadam, M., & Modhej, A. (2012). Effect of nitrogen level on water use efficiency yield and yield component of maize in optimum and drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 10(3), 546-554.
57. Moradi, A., Ahmadi, A., & Hossein Zadeh, A. (2008). Agro-Physiological Responses of Mung Bean (cv. Partov) to Severe and Moderate Drought Stress Applied at Vegetative and Reproductive Growth Stages. *Journal of Water and Soil Science*, 12(45), 659-671.
58. Naderi, M. R., & Abedi, A. (2012). Application of Nanotechnology in agriculture and refinement of environmental pollutants. *Journal of Nanotechnology*, 11(1), 18-26. (in Persian).
59. Noryani, H. (2013). Effect of water deficit stress on yield and yield components of mung bean in different planting densities. *Crop Physiology Journal*, 18, 35-47.
60. Nyawade, S., Gitari, H. I., Karanja, N. N., Gachene, C. K. K., Schulte-Geldermann, E., Sharma, K., & Parker, M. L. (2020). Enhancing Climate Resilience of Rain-Fed Potato Through Legume Intercropping and Silicon Application. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 566345. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.566345>
61. Raghara, H., & Mousavi, S. G. H. (2018). The effect of drought stress and application of humic and salicylic acid on physiological traits, yield and yield components of corn (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Environmental Physiology*, 13(50), 87-101. (in Persian).
62. Rea, R. S., Islam, M. R., Rahman, M. M., Nath, B., & Mix, K. (2022). Growth, Nutrient Accumulation, and Drought Tolerance in Crop Plants with Silicon Application: A Review. *Sustainability*, 14, 4525. <https://doi.org/10.3390/su14084525>
63. Ren, Y., Wang, X., Zhang, S., Palta, J. A., & Chen, Y. (2017). Influence of spatial arrangement in maize-soybean intercropping on root growth and water use efficiency. *Plant and Soil*, 415, 131-144.
64. Renwick, L. L. R., Kimaro, A. A., Hafner, J. M., Rosenstock, T. S., & Gaudin, A. C. M. (2020). Maize-Pigeonpea Intercropping Outperforms Monocultures Under Drought. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 562663.

- <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.562663>
65. Sabaghnia, N., Javanmard, A., Janmohammadi, M., & Nouraein, M. (2018). The Influence of nano-TiO₂ and Nano-Silica Particles Effects on Yield and Morphological Traits of Sunflower. *Helia Journal*, 41(69), 213-225. <https://doi.org/10.1515/helia-2018-0010>
 66. Sadeghipour, A., & Mr, P. (2014). Investigating the effect of drought stress and application of magnetic water on mung bean yield and yield components. *Crop Production Research Journal*, 6(1), 79-86.
 67. Said, M. T., & Hamd-Alla, W. A. (2018). Impact of Foliar Spraying with Antioxidant and Intercropping Pattern of Maize and Soybean on Yields and its Attributes. *Journal of Plant Production* 9(12), 1069-1073.
 68. Shojaei, H., & Makarian, H. (2015). Effect of nano and non-nano zinc oxide spraying on mung bean (*Vigna radiata* L.) yield and yield components under drought stress condition. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4), 727-737.
 69. Shokri, S., Hooshmand, A., Golabi, M., Alemzadeansari, N., & Struve, D. (2022). Effect of sSilica nNanoparticles on Yield of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) in Ahvaz region. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(1), 279-292. (in Persian).
 70. Siame, R., Mirshekari, B., Farah Vash, F., Rashidi, V., and Tarinzhad, A. R. (2017). The effect of seed priming with salicylic acid and water deficit tension on enzyme activity and yield of grain corn. *Crop Physiology Journal*, 9(34): 23-35. (in Persian).
 71. Siddiqui, M. H., Al-Waibibi, M. H., Firoz, M., & Al-Khaishany, M. Y. (2015). Role of nanoparticles in plants. In: Siddiqui, M.H., Al-Waibibi, M.H., Mohamed, H., Mohammad, F. (eds) *Nanotechnology and Plant Sciences*, Springer International Publishing, Berlin, pp. 19-35.
 72. Stolz, E., & Nadeau, E. (2014). Effect of intercropping on yield, weed incidence, forage quality and soil residual N inorganically grown forage maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Research*, 169, 21-29.
 73. Ullah, A., Bakht, J., Shafi, M., & Islam, W. A. (2002). Effect of various irrigation levels on different chickpea varieties. *Asian Journal of Plant Science*, 4, 355-357.
 74. Undie, U. L., Uwah, D. F., & Attoe, E. E. (2012). Effect of intercropping and crop arrangement on yield and productivity of late season maize/soybean mixtures in the humid environment of south southern Nigeria. *Journal of Agriculture Science*, 4, 37-50.
 75. Vaculikova, M., Tandy, M., Vaculik, S., Luxova, M., & Schulin, R. (2016). Alleviation of antimonate (SbV) toxicity in maize by silicon (Si). *Environmental and Experimental Botany*, 128, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.04.001>
 76. Wang, G. P., Li, F., Zhang, J., Zhao, M. R., Hui, Z., & Wang, W. (2010). Overaccumulation of glycine betaine enhances tolerance of the photosynthetic apparatus to drought and heat stress in wheat. *Photosynthetica*, 48, 30-41.
 77. Wani, S. H., Singh, N. B., Haribhushan, A., & Mir, J. I. (2013). Compatible solute engineering in plants for abiotic stress tolerance-role of glycine betaine. *Current Genomics*, 14: 157-161.
 78. Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J. F., Ferrer, A., & Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>
 79. Xie, J., Wang, L., Li, L., Anwar, S., Luo, Z., Zechariah, E., & Kwami Fudjoe, S. (2021). Yield, economic benefit, soil water balance, and water use efficiency of intercropped maize/potato in responses to mulching practices on the semiarid loess plateau. *Agriculture*, 11, 1100. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111100>
 80. Yuvakkumar, R., Elango, V., Rajendran, V., Kannan, N., & Prabu, P. (2011). Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea Mays* L.). *International Journal of Green Nanotechnology*, 3, 180-190.
 81. Zareyi, B., Kiarostami, Kh., Hosseinzadeh Namin, M., & Sorahinobar, M. (2020). Effect of silicon nanoparticles on some physiological parameters of saffron corm (*Crocus sativus*). *Journal of Applied Biology*, 33(2), 52-77.
 82. Zhang, F. Y., Zhao, P. T. W. X. N., & Cheng, X. F. (2012). Water-saving mechanisms of intercropping system in improving cropland water use efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 1400-1406.
 83. Zhao, C., Fan, Z., Coulter, J. A., Yin, W., Hu, F., & Yu, A. (2020). High maize density alleviates the inhibitory effect of soil nitrogen on intercropped pea. *Agronomy*, 10, 248.
 84. Zhu, J. K. (2002). Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annual Reviews Plant Biology*, 53, 247-316.
 85. Ziyai, H., Pirdashti, H., Zare, S., & Motaghian, A. (2015). Evaluation of grain yield and competitive indices in intercropping of grain maize (*Zea mays* L.) with different bean cultivars (*Phaseolus* spp.). *Journal of Agroecology*, 7(1), 52-61.



Agronomic and Physiological Characteristics of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under Water Deficit Stress and Silicon Fertilizer

E. Rezaei¹, H. R. Larijani^{2*}, P. Kasraie², H. R. Tohidi Moghadam², F. Ghooshchi²

Received: 20-09-2022

Revised: 28-10-2022

Accepted: 09-11-2022

How to cite this article:

Rezaei, E., Larijani, H. R., Kasraie, P., Tohidi Moghadam, H. R., Ghooshchi, F. (2023). Agronomic and Physiological Characteristics of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under Water Deficit Stress and Silicon Fertilizer. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 113-126. (in Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78887.1198>

Introduction

The quantity and quality of forage plants are beneficial and useful due to their role in animal husbandry, reproduction and other livestock products. Due to the limitation of water resources, water-deficit as a significant biotic stress is the most severe threat to world food security and is responsible for many yield losses. Plants constantly modify their physiological processes in response to various biotic and abiotic stress to regulate the balance between plant growth and defense response. Many researchers have documented that plant nutrients are involved in biological processes of plants. It has been stated that the use of silicon by increasing the ability to absorb water can be useful to improve drought tolerance of sorghum, sorghum can with the help of silicon extract more water from dry soil and maintain more stomatal conductance.

Materials and Methods

In order to evaluate the effect of silicon fertilizer on the quantitative and qualitative yield of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under water-deficit stress, a split-plot experiment was performed in a randomized complete block design in at the research farm of Varamin, Iran in 2017-2018. The treatments included irrigation in three levels irrigation in field capacity and irrigation at 60% and 45% of field capacity (which were named as full irrigation, moderate and severe water-deficit stress, respectively) as the main plot and silicon fertilizer (Potassium Silicate) in three levels, non-use (control), silicon foliar spraying (three per thousand), and silicon fertigation (10 L ha⁻¹) as the subplot. Silicon spraying with a ratio of three per thousand and silicon irrigation fertilizer at the rate of 10 liters per hectare were considered in three stages.

Results and Discussion

The highest (4.51) and lowest (2.88) leaf area index were achieved in silicon fertigation treatment under full irrigation and none fertilizer treatment and severe water-deficit conditions, respectively. Based on the obtained results, the highest total chlorophyll content (1.73 mg g⁻¹ FW), relative water content of leave (88.08%), stomatal conductance (2.46 cm s⁻¹) were achieved in fertigation treatment under full irrigation conditions. The results show that the amount of electrolyte leakage increased due to water-deficit stress, but silicon fertilizer decreased the adverse effect of stress conditions. The lowest level of electrolyte leakage (341.3 μS cm⁻¹) was obtained from the full irrigation and fertigation treatment. The highest crude protein (11.41%) which was higher than full irrigation condition by 1.39% related to severe water-deficit stress. Water-deficit stress caused the increase of cyanuric acid in shoot and increased the content of cyanuric acid by 41.8% compared to full irrigation conditions. Silicon fertilizer led to a decrease in digestible dry matter under water stress conditions, but on the other hand, it led to an increase in the amount of crude protein and also a decrease in the amount of toxic cyanide

1- Ph.D. graduated student, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Varamin, Iran

2- Assistant Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Varamin, Iran

(*- Corresponding Author Email: Hamidrezalarijani@yahoo.com)

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78887.1198>

acid in the shoot production. The results of this study show that the use of silicon fertilizer in all irrigation regimes increased the auxin content compared to the non-use of silicon fertilizer. The highest content of auxin was achieved in the conditions of full irrigation and fertigation treatment ($131.4 \text{ nmol g}^{-1}$ of protein) followed by foliar fertilizer treatment ($128.2 \text{ nmol g}^{-1}$ of protein). The highest sorghum dry matter production was obtained from the full irrigation treatment with an average of 23.7 ton ha^{-1} , which was 20 and 54% higher than the treatment of moderate and severe water-deficit treatment, respectively.

Conclusion

In general, it can be concluded that silicon fertilizer in the form of foliar spraying should be considered by farmers to maintain the natural growth and development of sorghum plant, especially in areas arid and semi-arid. However, its widespread use in other farm crops needs to be investigated.

Keywords: Auxin, Chlorophyll, Crude protein, Cyanidric acid, Dry matter digestibility

بررسی خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) تحت تأثیر تنش کم‌آبی و کود سیلیس

احسان رضایی^۱، حمیدرضا لاریجانی^{۱*}، پورنگ کسرائی^۲، حمیدرضا توحیدی مقدم^۲، فرشاد قوشچی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

چکیده

به منظور ارزیابی کود سیلیس بر عملکرد کمی و کیفی سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) در شرایط تنش کم‌آبی، آزمایشی به صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک‌های تصادفی در سال ۱۳۹۷ در شهرستان ورامین اجرا گردید. تیمارهای مورد بررسی شامل آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (آبیاری مطلوب) و آبیاری در ۶۰ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی (به ترتیب کم‌آبیاری متوسط و کم‌آبیاری شدید) به عنوان عامل اصلی و کود سیلیس (سیلیکات پتاسیم در سه مرحله) به صورت عدم مصرف، محلول‌پاشی و کودآبیاری به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین محتوی کلروفیل کل ($1/73 \text{ mg g}^{-1} \text{ FW}$)، محتوی نسبی آب برگ ($8/08\%$) و هدایت روزنه‌ای ($2/46 \text{ cm s}^{-1}$) در تیمار آبیاری مطلوب و استفاده از کود سیلیس در آب آبیاری به دست آمد. بیشترین میزان پروتئین خام ($1/41\%$) در تیمار کم‌آبی شدید برآورد گردید به طوری که نسبت به آبیاری مطلوب $1/39$ درصد بیشتر بود. تنش کم‌آبی باعث افزایش اسید سیانیدریک اندام هوایی شد به نحوی که باعث افزایش $4/1/8$ درصد محتوی اسید سیانیدریک نسبت به شرایط مطلوب آبیاری گردید. بیشترین عملکرد اندام هوایی خشک سورگوم در تیمار آبیاری مطلوب با میانگین $23/7$ تن در هکتار به دست آمد که نسبت به تیمار تنش متوسط و شدید کم‌آبی، به ترتیب ۲۰ و ۵۴ درصد بیشتر بود. کود سیلیس (محلول‌پاشی سه در هزار، کود آبیاری ۱۰ لیتر در هکتار) منجر به کاهش ماده خشک قابل هضم گردید ولی از طرف دیگر منجر به افزایش میزان پروتئین خام و همچنین کاهش ماده سمی اسید سیانیدریک در اندام هوایی شد و در این بین محلول‌پاشی کود سیلیس موثر تر از مصرف در آب آبیاری بود. بنابراین می‌توان پیشنهاد نمود که محلول‌پاشی کود سیلیس برای حفظ رشد و نمو گیاه سورگوم به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مد نظر کشاورزان قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اسید سیانیدریک، پروتئین خام، کلروفیل، ماده خشک قابل هضم، هورمون اکسین

مقدمه

از خسارات در گیاه است. گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) بعد از گندم (*Triticum aestivum* L.)، برنج (*Oryza sativa* L.)، ذرت (*Zea mays* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.) پنجمین غله مهم دنیاست (FAO, 2020).

گیاه سورگوم این قابلیت را دارد که خود را با شرایط نامساعد محیطی مطابقت دهد و بر همین اساس بیشتر در مناطق گرم و خشک که برای کشت سایر گیاهان علوفه‌ای نظیر ذرت مناسب نیست، کشت می‌شود (Hadebe et al., 2017). تنش کم‌آبی، باعث ایجاد تغییراتی در میزان آب نسبی برگ، میزان آب نسبی از دست رفته، محتوی کلروفیل، تجمع پرولین، تنظیم اسمزی و پارامترهای دیگر نظیر تبادل روزنه‌ای (CO_2) در ارتباط می‌باشند (Keshavarz & Khodabin, 2019). به‌طور کلی تنش کم‌آبی از طریق کاهش

کمیت و کیفیت گیاهان علوفه‌ای در تغذیه و پرورش دام سایر فرآورده‌های آن بسیار مفید و مؤثر می‌باشد (Hayes et al., 2013). با توجه به کمبود منابع آبی، کم‌آبی به عنوان یک عامل تنش‌زا، شدیدترین تهدید برای امنیت غذایی جهان می‌باشد و مسئول بسیاری

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه زراعت، گروه کشاورزی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

۲- استادیار، گروه زراعت، گروه کشاورزی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: Hamidrezalarijani@yahoo.com)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78887.1198>

خصوصیات کمی و کیفی گیاه سورگوم انجام شده است.

مواد و روش‌ها

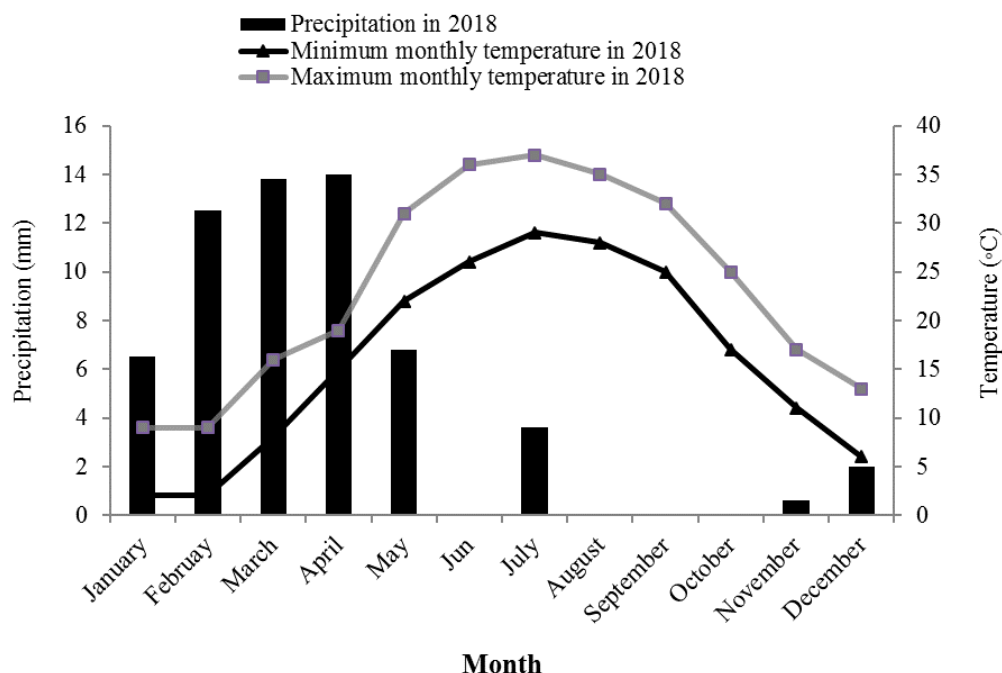
این آزمایش در سال ۱۳۹۷ در شهر ورامین- ایران واقع در عرض جغرافیایی ۳۵/۲۱ شرقی و طول جغرافیایی ۵۱/۳۸ شمالی و در ارتفاع ۹۲۷ از سطح دریا قرار انجام پذیرفت. آب و هوای این منطقه خشک و نیمه خشک و میانگین بارش ۳۸ سال گذشته آن ۲۵۱ میلی متر بوده است، میانگین سالانه درجه حرارت هوا آن $16/5^{\circ}\text{C}$ ، میانگین درجه حرارت خاک $15/5^{\circ}\text{C}$ می باشد (شکل ۱).

پیش از انجام آزمایش برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه برداری از عمق ۰-۳۰ سانتی متری خاک صورت پذیرفت. نتایج حاصل از تجزیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش به صورت اسپلیت پلات بر پایه بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای مورد بررسی شامل سه سطح آبیاری به عنوان عامل اصلی شامل آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (آبیاری مطلوب)، مصرف ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک در عمق توسعه ریشه و سپس آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (کم آبیاری متوسط) و مصرف ۵۵ درصد رطوبت قابل استفاده خاک در عمق توسعه ریشه و سپس آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (کم آبیاری شدید) و استفاده از کود سیلیس به عنوان عامل فرعی شامل (۱) عدم استفاده از سیلیس (شاهد)، (۲) محلول پاشی سیلیس با نسبت سه در هزار، (۳) کود آبیاری سیلیس به میزان ۱۰ لیتر در هکتار در نظر گرفته شد.

تا مرحله چهار برگی سورگوم، آبیاری تمامی کرت ها به صورت یکسان انجام شد و سطوح مختلف آبیاری پس از این مرحله اعمال گردید. آبیاری این آزمایش به صورت قطره ای و قطر هر نوار آبیاری ۱۶ mm، فاصله هر قطره چکان ۱۵ cm و سرعت جریان ۲ لیتر در ساعت بود. برای تعیین سطوح مختلف آبیاری از روابط ارائه شده توسط بهرا و پاندا (Behera & Panda, 2009) استفاده شد که برنامه زمان بندی آبیاری بر اساس درصد تخلیه آب خاک در منطقه ریشه تعیین می شود. مقدار آب خاک با استفاده از دستگاه انعکاس سنجی زمانی (Time Domain Reflectometry, TDR) در عمق ذکر شده تعیین شد. نسبت به نقطه ظرفیت زراعی از منحنی های کالیبراسیون برای تعیین رابطه بین مقدار عددی ارائه شده توسط دستگاه و مقدار حجمی رطوبت خاک استفاده گردید (Keshavarz Mirzamohammadi et al., 2021a).

سطح برگ، بسته شدن روزنه ها، کاهش قابلیت هدایت روزنه ها، کاهش آبیگری کلروپلاست و سایر بخش های پروتوپلاسم و کاهش ساخت پروتئین و کلروفیل، سبب تقلیل فرآیند فتوسنتز و در نهایت سبب کاهش رشد و عملکرد گیاه می شود (Rizal et al., 2014). در بررسی اثر تنش خشکی بر سورگوم مشاهده شد که علاوه بر عملکرد، ویژگی های کیفی ذرت نیز تحت تأثیر تنش قرار می گیرد، به طوری که میزان پروتئین افزایش و نشاسته کاهش یافت (Jabereldar et al., 2017). نتایج آزمایش دیگری نیز حاکی از کاهش هیدرات های کربن دانه در تیمار تنش کم آبی بود (Menezes et al., 2015). شاخص سطح برگ نیز تحت تأثیر تنش کم آبی قرار می گیرد و به شدت کاهش می یابد به طوری که یک دوره تنش کم آبی باعث کاهش ۲۰ درصدی شاخص سطح برگ سورگوم شد (Ahmed et al., 2016). اگرچه سیلیس از عناصر تشکیل دهنده پوسته زمین می باشد اما به دلیل ترکیب با سایر عناصر، تنها به شکل سیلیسیک اسید $\text{OH}_4(\text{Si})$ برای گیاهان قابل جذب است. این عنصر جزو عناصر ضروری برای گیاهان نمی باشد اما نتایج مطالعات حاکی از تأثیر مثبت سیلیکون در رشد و عملکرد گیاه در هر دو شرایط مطلوب و تنش بوده است (Tahir et al., 2006). از طرف دیگر بیان شده است که کاربرد سیلیس با افزایش توانایی جذب آب می تواند برای بهبود تحمل به خشکی سورگوم مفید باشد، سورگوم با کمک سیلیس می تواند مقدار بیشتری آب را از خاک خشک استخراج کرده و هدایت روزنه بیشتری را حفظ کند (Ghanem et al., 2019). سیلیس با بهبود ویژگی های مورفولوژیک برگ و گل مانند افزایش سطح برگ، ضخامت برگ، قطر گل، سطح گلبرگ و ضخامت گلبرگ باعث افزایش وزن تر و خشک نیز می شود (Ahmed & Rajab, 2017). سیلیس با افزایش رنگیزه های فتوسنتزی، افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو و ظرفیت فتوسنتزی، کاهش تنش اکسیداتیو و حفاظت ماکرو مولکول هایی نظیر پروتئین ها و غشای کلروپلاستی و غشای سلولی باعث افزایش فتوسنتز شده و در نتیجه میزان قندهای محلول و پروتئین خام موجود در گیاهان را افزایش می دهد (Amin et al., 2018). در گزارش دیگر بیان شد که استفاده از سیلیس فشار تورم را از طریق بهبود کارایی مصرف آب و محتوی نسبی آب برگ افزایش می دهد (Kalteh et al., 2014). سایر بررسی ها حاکی از افزایش کربوهیدرات های محلول برگ گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor*) تحت تأثیر مصرف سیلیس بود (Yin et al., 2013).

لذا با توجه به اهمیت معضل کم آبی در کشاورزی و گستردگی روزافزون آن و همچنین نیاز به تولید علوفه با کیفیت بالا در کشور این تحقیق با هدف بررسی تأثیر کود سیلیس در شرایط کم آبی بر



شکل ۱- میزان بارندگی ماهانه، حداکثر و حداقل دما در منطقه ورامین در سال ۱۳۹۷-۹۸
Figure 1- Precipitation and maximum and minimum temperatures in Varamin in 2018

جدول ۱- تجزیه فیزیکی-شیمیایی خاک
Table 1- Soil physico-chemical analysis

Table 1- Soil physico-chemical analysis							
عمق خاک Depth (cm)	بافت خاک Soil texture	اسیدیته خاک pH	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (dS m ⁻¹)	نقطه پژمردگی دائم PWP (%)	ظرفیت زراعی مزرعه Field Capacity (%)		
0-30	clay	7.3	3.8	10.78	16		
نیتروژن N (ppm)	پتاسیم K (ppm)	فسفر P (ppm)	مس Cu (ppm)	منگنز Mg (ppm)	روی Zn (ppm)	آهن Fe (ppm)	کربن آلی Organic carbon (%)
1.1	210	10	2.2	2.5	1.1	1.5	0.8

کرج) طبق نقشه آزمایشی به روش دستی کشت گردید. در طول دوره رشد عملیات داشت شامل سله‌شکنی در فاروهای آبیاری، تنک و واکاری، وجین علف‌های هرز و آبیاری انجام گردید. کلیه متغیرهای مورد بررسی این آزمایش در مرحله گلدهی گیاه سورگوم اندازه‌گیری شد. شاخص سطح برگ (یک متر مربع) با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (Delta-T area meter; Delta-T) (Devices Ltd., Cambridge, UK) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. محتوی نسبی آب برگ (RWC) با استفاده از رابطه (Levitt 1980) اندازه‌گیری شد (رابطه ۱).

$$RWC = (FW - DW) / (SW - DW) \times 100 \quad (1)$$

در این معادله، FW وزن تر، DW وزن خشک و SW وزن آماس

زمان استفاده از کود سیلیس از منبع سیلیکات پتاسیم (K_2O - 20% SiO_2) در سه مرحله شامل مرحله پنج برگی (مرحله رشدی ۲) و قبل از اولین گلدهی (مرحله رشدی ۵) (Eastin, 1980) و ۲۰ روز پس از برداشت اول سورگوم اجرا گردید. زمین آزمایش با انجام شخم، دیسک و ماله برای کاشت آماده گردید. به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌عنوان کود اولیه استفاده شد. خطوط کاشت به‌وسیله فاروئر ایجاد و نقشه آزمایش پیاده‌سازی گردید. فاصله خطوط از هم ۶۰ سانتی‌متر و هر تیمار شامل چهار خط به طول پنج متر آماده شد. در زمان کاشت (هفته اول خرداد ماه) به میزان ۱۰ کیلوگرم در هکتار بذر سورگوم (رقم Speedfeed، تهیه شده از مؤسسه تحقیقات نهال و بذر

علوفه سورگوم می‌باشد.

اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای برگ‌ها با استفاده از دستگاه Mk3 T-Delta Porometer مدل AP3 ساخت کشور آمریکا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۰ درصد در ساعت ۱۱ تا ۱۲ صبح صورت گرفت. جهت اندازه‌گیری نشت یونی از روش شی و همکاران (Shi et al., 2006) مورد ارزیابی قرار گرفت. اندازه‌گیری کلروفیل کل نیز از روش لیچنتال (Lichtenthaler, 1987) انجام پذیرفت (رابطه ۲).

$$\text{Chlorophyll total (mg.g}^{-1}\text{)} = [12.7(A_{663}) - 2.69(A_{645})] \times \frac{V}{1000W} \quad (2)$$

V: حجم نهایی عصاره؛ W: وزن نمونه برگ.

وزن خشک و تر علوفه سورگوم از مجموع دو چین علوفه در زراعی محاسبه گردید (چین اول ۲۶ مرداد و چین دوم ۲۵ آبان). بر همین اساس با حذف یک خط کاشت به‌عنوان حاشیه، مساحت دو متر مربع از هر کرت برداشت گردید و نمونه هر تیمار توزین و به‌عنوان عملکرد علوفه تر بر حسب تن در هکتار محاسبه شد. سپس جهت اندازه‌گیری وزن خشک علوفه از هر تیمار به‌طور تصادفی یک نمونه یک کیلوگرمی تهیه گردید و به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه آون با دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. سپس عملکرد علوفه خشک برای سطح یک هکتار بر حسب تن محاسبه شد.

پس از محاسبه وزن خشک هر چین سورگوم برای تعیین خصوصیات کیفی سورگوم، از مجموع دو مرحله برداشت، یک نمونه ۵۰۰ گرمی علوفه خشک به‌طور تصادفی انتخاب و از آن برای تعیین ماده خشک قابل‌هضم (Dry matter digestibility)، پروتئین خام (Crude protein) استفاده شد (Jafari et al., 2003). هورمون اکسین (Indole acetic acid) از روش ونگ و همکاران (Wang et al., 2015) به‌دست آمد. بدین صورت که ۱ گرم بافت برگ در ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد جوشانده و سپس به‌وسیله سانتریفیوژ صاف شد و یک میلی‌لیتر از عصاره به‌دست آمده با ۲ میلی‌لیتر از معرف سالکوفسکی (He et al., 2002) مخلوط شد. ترکیب به‌دست آمده به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب گرم ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا رنگ آن به رنگ صورتی تغییر یابد. در پایان، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۳۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (Varian Cary Win UV 6000i, Australia) خوانده شد. در نهایت با استفاده از نمودار استاندارد، میزان اکسین نمونه‌ها محاسبه شد. به‌منظور تهیه معرف سالکوفسکی، ۱ میلی‌لیتر محلول کلریدفری ۰/۵ مولار با ۵۰ میلی‌لیتر اسید پرکلریک ۳۵ درصد مخلوط و هم زده شد. میزان اسید سیانیدریک و به روش تیتراسیون به‌دست آمد (Blaney, 2002). محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین با آزمون حداقل تغییرات معنی‌دار (LSD) انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان‌دهنده آن بود که علاوه بر اثرات ساده، اثر متقابل تنش خشکی در کود سیلیس بر شاخص سطح برگ معنی‌دار ($p \leq 0.01$) گردید. بیشترین شاخص سطح برگ با میانگین ۴/۵۱ در شرایط آبیاری مطلوب همراه با کاربرد کود سیلیس در آب آبیاری و کمترین شاخص سطح برگ (۲/۸۸) در تیمار تنش شدید کم‌آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس حاصل شد که اختلافی ۳۶٪ داشتند (جدول ۳).

در ساعات اولیه تنش کم‌آبی، سلول‌های گیاهی آب خود را از دست داده و چروکیده می‌شوند. اگرچه در مراحل بعدی، سلول‌ها حجم واقعی خود را بازیابند اما سرعت رشد سلول کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش سرعت رشد برگ می‌شود. حتی ممانعت از رشد ساقه‌های جانبی در شرایط تنش منجر به مرگ تعدادی از برگ‌ها می‌شود (Lauriault et al., 2012). به نظر می‌رسد تنش کم‌آبی با ایجاد تغییرات در پتانسیل آب برگ و تقسیمات سلولی و تأمین نشدن مواد پرورده مورد نیاز برای رشد برگ منجر به کاهش شاخص سطح برگ شده است. اما استفاده از سیلیس منجر به تجمع آن در برگ‌ها شد که در نتیجه استحکام کششی بیشتری به برگ‌ها داده است (Asadpour et al., 2022) که این حالت در شرایط تنش نیز نمود پیدا کرده است. گزارش شده که افزایش اندازه برگ در سورگوم تیمار شده با سلیکون به دلیل افزایش ابعاد سلول بوده است و نه تعداد سلول که بیانگر اثر سلیکون روی طول سلول و نه تقسیم سلولی است (Ahmed et al., 2011).

محتوی نسبی آب

نتایج تجزیه واریانس مندرج در جدول ۲ نشان داد که علاوه بر اثرات ساده، اثر متقابل تنش خشکی در کود سیلیس بر محتوی نسبی آب معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود. بر اساس نتایج این تحقیق (جدول ۳) بیشترین محتوی نسبی آب برگ (۸۸٪/۰۸) در تیمار آبیاری مطلوب و کاربرد سیلیس به‌صورت کود آبیاری سیلیس به‌دست آمد. در همین شرایط آبیاری، محلول‌پاشی کود سیلیس نیز افزایش معنی‌داری در میزان محتوی نسبی آب برگ نسبت به عدم مصرف کود داشت. از طرف دیگر کمترین میزان محتوی نسبی آب برگ در تیمار تنش متوسط کم‌آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس با میانگین ۶۵/۰۵ درصد به‌دست آمد. نتیجه قابل‌توجه دیگر این بود که استفاده از کود سیلیس به‌صورت آب آبیاری و همین‌طور به‌صورت محلول‌پاشی در تیمار تنش متوسط کم‌آبیاری به‌ترتیب با میانگین‌های ۷۸/۳۲٪ و ۷۹/۹۸٪ با تیمار شرایط مطلوب آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس با

میانگین ۸۰/۳٪ در یک گروه آماری قرار گرفتند که این نشان‌دهنده می‌دهد. اهمیت کود سیلیس در حفظ رطوبت در شرایط تنش کم‌آبی را نشان

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و کودی
Table 2- Results of analysis of variance (mean of squares) of studied traits affected by irrigation regimes and fertilizer treatments

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	شاخص سطح برگ LAI	محتوی نسبی آب برگ RWC	نشت یونی Electrolyte leakage	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	کلروفیل کل Chlorophyll
Block بلوک	2	0.11ns	138.5ns	28014ns	0.12ns	0.014ns
Irrigation آبیاری	2	9.75**	1610.5*	298024**	3.57**	6.62**
Main error خطای اصلی	4	0.28	126.9	4657	0.037	0.0022
Fertilizer تیمار کودی	2	1.96**	774.9**	40363**	1.65**	0.20**
Irrigation×Fertilizer آبیاری×کود	4	0.65**	223.2**	7705**	0.31**	0.021**
Error خطای کل	66	0.054	18.8	986.8	0.037	0.0043
CV (%) ضریب تغییرات		6.3	5.8	6.6	9.3	6.0

ns و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.
ns, * and **: Non-significant and, significant at 1% and 5% probability level, respectively.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و کودی
Table 3- Results of analysis of variance (mean of squares) of studied traits affected by irrigation regimes and fertilizer treatments

آبیاری Irrigation	کوددهی Fertilization	شاخص سطح برگ LAI	محتوی نسبی آب برگ RWC (%)	نشت یونی Electrolyte leakage ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance (cm s^{-1})	کلروفیل کل Chlorophyll ($\text{mg g}^{-1} \text{FW}$)
آبیاری کامل (بدون تنش) Full irrigation	عدم مصرف No application	4.02b	80.3b	377.8d	2.36abc	1.47c
	محلول پاشی Foliar spray	4.14b	82.43b	363.3de	2.43ab	1.67b
	آب آبیاری Fertigation	4.51a	88.08a	341.3e	2.46a	1.73a
	عدم مصرف No application	3.13cd	61.46e	551.3b	1.76e	0.95f
تنش متوسط کم‌آبی Moderate deficit stress	محلول پاشی Foliar spray	4.07b	79.98b	535.9b	2.20c	1.04e
	آب آبیاری Fertigation	3.95b	78.32b	423.7c	2.25bc	1.12d
	عدم مصرف No application	2.88e	65.05de	600.1a	1.2f	0.59h
	محلول پاشی Foliar spray	3.24c	72.6c	559.4b	1.92de	0.65gh
تنش شدید کم‌آبی Severe water deficit stress	آب آبیاری Fertigation	2.96de	67.87de	537.5b	1.95d	0.67g
LSD value (5%)		0.24	4.69	32.5	0.18	0.061

حروف مشابه در ستون میانگین، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (براساس آزمون LSD) می‌باشند.
Means having similar letters have no significant difference at 5% probability level by LSD test.

حرکت آب از ریشه به بخش‌های بالاتر گیاهان، باعث پسابیدگی شدن شدید برگ و سایر قسمت‌ها می‌شود. بنابراین می‌توان این گونه

تنش کم‌آبی منجر به تولید و ارسال اسید آسزیک به قسمت‌های بالایی گیاه شده که در نتیجه با انسداد روزنه‌های برگ و ممانعت از

تحت تأثیر اثرات اصلی و متقابل رژیم‌های آبیاری و کود سیلیس قرار گرفت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین بیانگر آن بود که بیشترین هدایت روزنه‌ای در شرایط آبیاری مطلوب و به همراه کاربرد کود سیلیس در آب آبیاری ($2/46 \text{ cm s}^{-1}$)، محلول‌پاشی ($2/43 \text{ cm s}^{-1}$) و عدم کاربرد سیلیس ($2/36 \text{ cm s}^{-1}$) به‌دست آمد. از طرف دیگر تیمار تنش شدید کم‌آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس کمترین میزان هدایت روزنه‌ای با میانگین $1/2 \text{ cm s}^{-1}$ به‌دست آمد (جدول ۳). به نظر می‌رسد که کود سیلیس در شرایط تنش مانع بسته شدن روزنه‌ها شده و این امر منجر به افزایش و حفظ آسمیلاسیون CO_2 می‌گردد. نتایج مشابهی در خصوص کاهش هدایت روزنه‌ای گیاه در شرایط تنش کم‌آبیاری و افزایش آن با کاربرد عناصر در گیاهان مختلف گزارش شده است (Min *et al.*, 2013).

کلروفیل کل

در این تحقیق اثر متقابل تنش کم‌آبی در کود سیلیس تأثیر معنی‌داری ($p \leq 0.01$) بر محتوی کلروفیل کل به همراه داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و کود سیلیس بر کلروفیل کل بیانگر آن بود که کاربرد کود سیلیس در کلیه تیمارهای آبیاری بر محتوی کلروفیل گیاه سورگوم تأثیرگذار بود، به‌طوری که بیشترین میزان کلروفیل کل در تیمار آبیاری مطلوب و استفاده کود سیلیس به‌صورت کود آبیاری ($1/73 \text{ mg g}^{-1} \text{ FW}$) به‌دست آمد (جدول ۳). کمترین میزان کلروفیل کل در تیمار عدم مصرف کود سیلیس در تنش شدید کم‌آبیاری ($0/59 \text{ mg g}^{-1} \text{ FW}$) مشاهده شد (جدول ۳). در همین راستا گزارش شده که تیمار سیلیس با تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش نفوذپذیری غشاء پلاسمایی و در نتیجه کاهش آثار مخرب تنش‌های محیطی می‌شود (Mouss, 2006). گزارش شده است که تیمار سیلیکون باعث افزایش در فعالیت‌های فتوسنتزی تحت شرایط تنش کم‌آبی می‌گردد که ناشی از افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز و گلیسرآلدئید-۳ فسفات دهیدروژناز می‌باشد. سیلیکون علاوه بر استحکام برگ، باعث تولید بافت ناهمواری در دو سطح برگ می‌شود (Balakhnina *et al.*, 2012) که در نتیجه باعث به تأخیر انداختن مرگ برگی و افزایش در محتوای کلروفیل می‌گردد. به نظر می‌رسد که کود سیلیس با کاهش اثر مخرب تنش کم‌آبیاری مانع تولید پراکسیداسیون لیپید و محتوای H_2O_2 گردیده و باعث حفظ محتوی کلروفیل شده است. این نتایج با یافته‌های سایر محققین در رابطه با گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) (Maghsoudi *et al.*, 2013) همخوانی دارد.

بیان کرد که با بسته شدن روزنه‌ها حرکت آب از آپوپلاست و سیمپلاست کاهش پیدا می‌کند. گزارش شده که استفاده از سیلیکون می‌تواند منجر به استحکام آوندهای چوبی (ساختارهای مسئول انتقال آب به گیاه)، شود که در نهایت منجر به افزایش جذب آب می‌گردد (Ahmadi *et al.*, 2015). از آن‌جا که آوندهای آبکش می‌تواند موجب افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی گردد (Ali *et al.*, 2019) می‌توان این‌گونه استنباط کرد که سیلیکون با رسوب در کوتیکول برگ موجب کاهش خروج رطوبت از طریق تبخیر می‌گردد. در این خصوص تأثیر مثبت کود سیلیس بر محتوی نسبی آب در شرایط دمای بالای ناشی از کشت دیر هنگام توسط دیگر محققین نیز گزارش شده است (Asadpour *et al.*, 2022).

نشت یونی

نشت یونی به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) تحت تأثیر اثرات ساده و متقابل تنش کم‌آبی و کود سیلیس قرار گرفت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳) نشان‌دهنده‌ی آن بود که با اعمال تنش کم‌آبیاری میزان نشت یونی سلول‌های گیاه سورگوم افزایش یافت ولی با کاربرد کود سیلیس میزان خسارت کاهش نشان داد، به‌طوری که کمترین میزان نشت یونی در تیمار آبیاری مطلوب و مصرف کود سیلیس به‌صورت کود آبیاری با میانگین ($341/3 \mu\text{S cm}^{-1}$) و بیشترین میزان نشت یونی حاصل در تیمار تنش شدید کم‌آبیاری و عدم مصرف کود سیلیس با میانگین ($600/1 \mu\text{S cm}^{-1}$) به‌دست آمد که اختلافی ۴۳ درصدی با هم داشتند. گزارش شده که بروز تنش‌های محیطی از طریق افزایش نشت یونی منجر به کاهش فعالیت فتوسنتزی می‌گردد (Keshavarz Mirzamohammadi *et al.*, 2021a) اما مصرف سیلیس و رسوب آن در غشای سلولی باعث سخت‌تر شدن سلول و در نهایت کاهش میزان نشت یونی می‌شود (Moussa, 2006). در این رابطه نتایج تحقیقی بر روی لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) نشان داد که مقدار نشت یونی با افزایش تنش به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد افزایش داشت که محققان علت آن را غیر فعال شدن آنزیم‌های غشایی و تخریب چربی‌های غشای سلولی عنوان کردند (Keshavarz & Khodabin, 2019). از آن‌جا که سلیکون باعث افزایش جذب پتاسیم و در نتیجه تغییر در نسبت پتاسیم به سدیم می‌شود (Artyszak, 2018)، می‌توان چنین استنباط کرد که چنین آسیبی به خاطر مکانیسم‌های متنوع شامل اکسیداسیون و مهار پروتئین‌های غشایی (H^+ -ATPase) یا تغییر در ترکیب و سیالیت لیپیدهای غشاء باشد و سلیکون با حفظ فعالیت H^+ -ATPase از خسارات ناشی از تنش می‌کاهد.

هدایت روزنه‌ای

در این مطالعه هدایت روزنه‌ای به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$)

ماده خشک قابل هضم

ماده خشک قابل هضم گیاه شد به طوری که بیشترین میزان ماده خشک قابل هضم در تنش‌های متوسط و شدید کم‌آبی به ترتیب با میانگین‌های ۷۱/۲ و ۷۳/۸ درصد مشاهده شد (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده‌ی آن بود که تنها اثرات ساده رژیم‌های آبیاری و کود سیلیس بر میزان ماده خشک قابل هضم معنی‌دار ($p \leq 0.01$) شد (جدول ۴). تنش کم‌آبی منجر به افزایش

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و کودی
Table 4- Results of analysis of variance (mean of squares) of studied traits affected by irrigation regimes and fertilizer treatments

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	ماده خشک قابل هضم Dry matter digestibility	پروتئین خام Crude protein	اکسین Auxin	اسید سیانیدریک Cyanic acid	وزن تر علوفه Forage fresh weight	وزن خشک علوفه Forage dry weight
Block بلوک	2	9.72ns	0.23ns	33.93ns	701ns	74.2ns	19.2ns
Irrigation آبیاری	2	1402**	16.25*	34978**	64253**	19984**	1156**
Main error خطای اصلی	4	36.7	0.97	123.6	516	25.02	5.88
Fertilizer تیمار کودی	2	358.08**	18.34**	2884.7**	909ns	976.9**	108.7**
آبیاری×کود Irrigation×Fertilizer	4	56.94ns	1.39ns	337.1**	809ns	19.5ns	11.2ns
Error خطای کل	66	26.88	2.58	45.003	681.7	66.48	8.27
CV (%) ضریب تغییرات		7.6	14.7	7.2	14.1	11.0	16.1

ns, * and **: Non-significant and, significant at 1% and 5% probability level, respectively.
ns, * and **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر اصلی آبیاری و کودی بر صفات مورد بررسی
Table 5- Main effect comparison of irrigation and fertilizer on studied traits

آبیاری Irrigation	ماده خشک قابل هضم Dry matter digestibility (%)	پروتئین خام Crude protein	اسید سیانیدریک Cyanic acid ($\mu\text{mol g}^{-1}$ of protein)	وزن تر علوفه Forage fresh weight (ton ha^{-1})	وزن خشک علوفه Forage dry weight
آبیاری مطلوب Full irrigation	60.2b	10.02b	129.8c	97.8a	23.7a
تنش متوسط کم‌آبی Moderate water- deficit stress	71.2a	11.32a	200.9b	79.5b	18.9b
تنش شدید کم‌آبی Severe water- deficit stress	73.8a	11.41a	223.2a	44.3c	10.7c
LSD value (5%)	4.58	0.74	17.1	3.78	1.83
کود Fertilization					
عدم مصرف No application	71.7a	10.04b	189.8a	67.1b	15.5b
محلول‌پاشی Foliar spray	68.9b	11.03a	185.7a	75.9a	18.6a
آب آبیاری Fertigation	64.5c	11.68a	178.4a	78.6a	19.2a
LSD value (5%)	2.81	0.87	14.1	4.43	1.56

حروف مشابه در هر ردیف و در ستون میانگین، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (براساس آزمون LSD) می‌باشند.
Means having similar letters have no significant difference at 5% probability level by LSD test.

از طرف دیگر، کود سیلیس در شرایط مختلف آبیاری درصد ماده خشک قابل هضم را کاهش داد و بر همین اساس بیشترین و کمترین میزان ماده خشک قابل هضم در تیمار عدم مصرف و مصرف کود سیلیس به صورت کود آبیاری با مقادیر به ترتیب ۷۱/۷ و ۶۴/۵ درصد حاصل گردید (جدول ۵). با توجه به این نتایج به نظر می‌رسد که تنش کم‌آبی به واسطه ممانعت از توسعه ساقه که درصد لیگنین و سلولز بیشتری نسبت به سایر اندام گیاه دارد، باعث بالا رفتن قابلیت هضم ماده خشک در گیاه سورگوم شده است. از طرف دیگر استفاده از کود سیلیس در آب آبیاری و محلول‌پاشی با توجه به افزایش رشد رویشی گیاه سورگوم منجر به کاهش درصد ماده خشک قابل هضم شده است. گزارش‌های مشابه در این رابطه نشان داده است که با افزایش میزان کود سیلیس در محیط ریشه، از میزان ماده خشک قابل هضم علوفه کاسته می‌شود (Samklong et al., 2010).

درصد پروتئین خام

نتایج تجزیه واریانس مندرج در جدول ۴ نشان داد که اثرات ساده رژیم‌های آبیاری و کود سیلیس بر درصد پروتئین خام معنی‌دار گردید و اثرات متقابل برای این صفت معنی‌دار نشد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین (جدول ۵) در شرایط تنش کم‌آبی، میزان پروتئین خام نسبت به آبیاری مطلوب افزایش یافت و هر دو تیمار تنش متوسط و شدید کم‌آبی با حدود یک درصد افزایش نسبت به تیمار آبیاری مطلوب، در گروه برتر قرار گرفتند. استفاده از کود سیلیس به صورت محلول‌پاشی و آب آبیاری منجر به افزایش پروتئین علوفه گردید به طوری که بیشترین درصد پروتئین خام با کاربرد کود سیلیس به صورت محلول‌پاشی (میانگین ۱۱/۰۳٪) و آب آبیاری (میانگین ۱۱/۶۸٪) به دست آمد که اختلافی ۰/۶۵ درصدی داشتند (جدول ۵). به نظر می‌رسد که افزایش در میزان پروتئین خام در تیمار تنش کم‌آبی، به دلیل تولید پروتئین‌های جدید و یا افزایش سطح پروتئین‌های مرتبط با سازگاری و تطابق گیاه با شرایط تنش می‌باشد که می‌توان به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان اشاره کرد. در همین رابطه گزارش شده است که کاربرد کود سیلیس باعث افزایش محتوی پروتئین محلول، اسید آمینه آزاد و کل نیتروژن، فسفر، پتاسیم و در نهایت افزایش تولید محصول می‌گردد (Li et al., 2012).

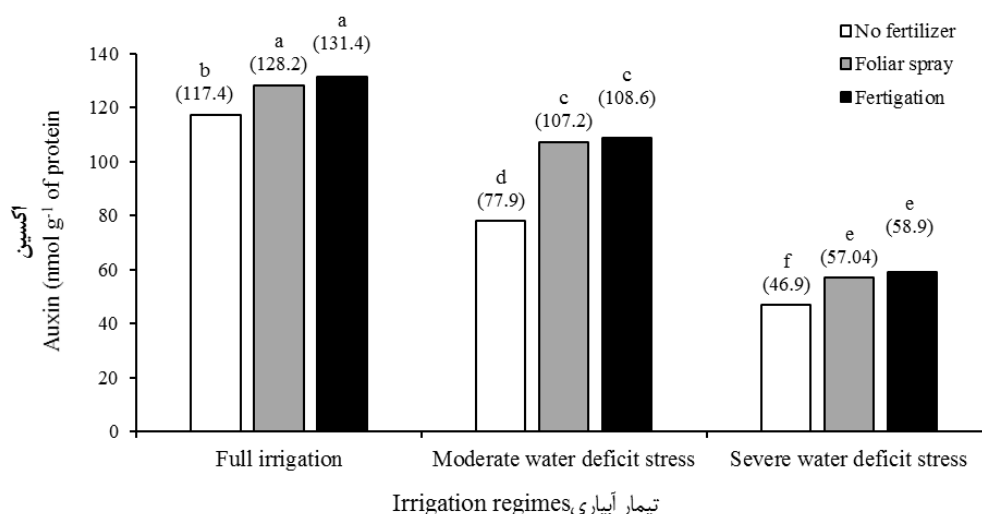
محتوی هورمون اکسین

یکی از دلایل اختلالات رشدی گیاه در شرایط تنش بر هم خوردن تعادل هورمون‌ها به ویژه اکسین می‌باشد (Keshavarz Mirzamohammadi et al., 2021b). بر اساس نتایج تجزیه واریانس محتوی هورمون اکسین به طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل رژیم‌های آبیاری و کود سیلیس قرار گرفت (جدول ۴). نتایج

این مطالعه نشان‌دهنده آن بود که استفاده از کود سیلیس در کلیه تیمارهای رژیم‌های آبیاری دارای بیشترین میزان هورمون اکسین نسبت به تیمارهای عدم مصرف کود سیلیس بود به طوری که بیشترین غلظت در شرایط آبیاری مطلوب و استفاده از کود سیلیس به صورت کود آبیاری با میانگین (۱۳۱/۴ nmol g⁻¹ of protein) و محلول‌پاشی سیلیس (۱۲۸/۲ nmol g⁻¹ of protein) به دست آمد که هر دو با اختلافی به ترتیب ۱۰/۶۵ و ۸/۴۲ درصدی نسبت به تیمار عدم مصرف در گروه برتر قرار گرفتند. همچنین کمترین میزان اکسین به ثبت رسیده (۴۶/۹ nmol g⁻¹ of protein) در تیمار تنش شدید کم‌آبیاری و عدم مصرف سیلیس به دست آمد (شکل ۲). از آنجا که هورمون اکسین سبب تحریک ریشه‌زایی و ترغیب و توسعه سیستم ریشه‌ای می‌شود، بنابراین کاهش میزان اکسین برگ در شرایط تنش دور از انتظار نیست. در واقع اکسین از برگ (محل تولید) به سمت ریشه منتقل شده تا باعث افزایش سیستم ریشه‌ای و مقابله با تنش کم‌آبی شود. نتایج مشابه این بحث بیانگر آن بود که تنش کم‌آبی باعث کاهش غلظت هورمون اکسین در مقابل تیمار آبیاری مطلوب می‌گردد درحالی که بهره‌گیری از کود سیلیس منجر به بهبود هورمون اکسین گردید (Helaly et al., 2017; Ryu et al., 2015). اگرچه در تحقیق حاضر، میزان عنصر روی در محیط ریشه و اندام گیاهی سنجیده نشد اما بر اساس گزارشات سایر محققین عنصر روی برای سنتز هورمون اکسین مورد نیاز است و پس از افزودن کود سیلیس در محیط کشت، مقدار عنصر روی در گیاه افزایش می‌یابد (Kazan, 2013). بر اساس گزارش دیگر افزودن کود سیلیس به افزایش سنتز هورمون اکسین در گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) از طریق افزایش جذب عنصر روی موجب حفظ رشد گیاهان در شرایط تنش نیز می‌گردد (Tripathi et al., 2012).

اسید سیانیدریک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنها اثر اصلی رژیم‌های آبیاری ($p \leq 0.01$) بر محتوی اسید سیانیدریک معنی‌دار گردید (جدول ۴). نتایج این مطالعه بیانگر آن بود که با افزایش اعمال تنش کم‌آبی بر محتوی اسید سیانیدریک افزوده شده به طوری که بیشترین میزان آن با میانگین (۲۲۳/۲ nmol g⁻¹ of protein) در تیمار تنش شدید کم‌آبیاری به دست آمد که ۴۲/۲۹٪ کمتر از تیمار آبیاری مطلوب بود (جدول ۵). در همین رابطه سایر محققین گزارش دادند که در شرایط تنش‌زا مانند کم‌آبی بلند مدت منجر به افزایش غلظت اسید سیانیدریک در سورگوم می‌گردد (Sher et al., 2016).



شکل ۲- مقایسه محتوی اکسین برگ تحت تأثیر برهمکنش تیمار آبیاری و کودی. حروف مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (براساس آزمون LSD) می‌باشند.

Figure 2- Interaction between irrigation and fertilizer treatment on auxin content. Means having similar letters, have no significant difference at 5% probability level by LSD test.

نشت یونی، حفظ شاخص سطح برگ گیاه، محتوی کلروفیل و هدایت روزنه‌ای منجر به افزایش عملکرد علوفه سورگوم می‌گردد. نتایج مشابه دیگر در این رابطه گزارش شده است که کاربرد سیلیس در شرایط تنش کم‌آبی گیاه ذرت (Amin et al., 2018) و گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) (Balakhnina et al., 2012) به علت افزایش فتوسنتزی و کاهش تعرق باعث بهبود رشد و عملکرد می‌شود. (Artyszak, 2018) اثربخشی کود سیلیس بر عملکرد گیاه را به کارکرد بهتر غشاهای زیستی با تغذیه سیلیکون نسبت دادند. بیشترین وزن خشک علوفه نیز در تیمار آبیاری مطلوب (۲۳/۷ تن در هکتار) به دست آمد که نسبت به تنش متوسط و شدید کم‌آبی افزایشی ۲۰/۲٪ و ۵۴/۸٪ داشت (جدول ۵). یکی از دلایل کاهش عملکرد در شرایط تنش را می‌توان به کاهش فتوسنتز حاصل از کاهش آب قابل دسترس در محدوده ریشه نسبت داد که این مسأله می‌تواند منجر به کاهش هدایت روزنه (کمتر شدن ورود دی‌اکسید کربن) و همچنین کاهش سطح برگ باشد (Zegada-Lizarazu & Iijima, 2005).

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش نشان داد که بروز تنش کم‌آبی از طریق تأثیر بر شاخص سطح برگ، محتوی نسبی آب برگ، نشت یونی، کاهش هدایت روزنه‌ای و همچنین شاخص‌های کلروفیل کل منجر به کاهش وزن تر و خشک علوفه سورگوم گردید. از طرف دیگر بهره‌گیری از

وزن تر و خشک علوفه سورگوم

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن بود که تنها اثرات ساده تنش کم‌آبی و کود سیلیس تأثیر معنی‌داری ($p \leq 0.01$) بر وزن تر علوفه سورگوم و وزن خشک علوفه سورگوم داشته است (جدول ۴). با افزایش شدت تنش کم‌آبی از مقادیر وزن تر علوفه کاسته شد به نحوی که تنش متوسط و شدید کم‌آبی به ترتیب با میانگین‌های ۷۹/۵ و ۴۴/۳ تن در هکتار، ۱۸ و ۵۴ درصد عملکرد کمتری نسبت به شرایط مطلوب آبیاری داشتند (جدول ۵). استفاده از کود سیلیس موجب افزایش وزن تر علوفه گیاه شد به طوری که بیشترین وزن تر سورگوم به ترتیب با میانگین ۷۸/۶ و ۷۵/۹ تن در هکتار به ترتیب در تیمارهای کود سیلیس به صورت محلول‌پاشی و کود سیلیس در آب آبیاری به دست آمد که نسبت به عدم کاربرد به ترتیب ۱۴/۶ و ۱۱/۵ درصد افزایش داشت. مشابه نتایج پژوهش حاضر، بهبود رشد گیاهان در شرایط تنش خشکی در اثر کاربرد سیلیس در گیاه گندم (Neu et al., 2017; Martin et al., 2017) و گیاه ذرت (*Zea mays* L.) (Asadpour et al., 2022) گزارش شده است.

همچنین در خصوص وزن خشک علوفه سورگوم نتایج این مطالعه نشان داد که بهره‌گیری از کود سیلیس منجر به افزایش عملکرد وزن خشک علوفه نسبت به عدم مصرف شد به نحوی که دو سطح کودی محلول‌پاشی و کود آبیاری نسبت به تیمار عدم مصرف افزایشی ۱۶/۶ و ۱۹/۲ داشتند (جدول ۵). در این رابطه چنین استدلال می‌گردد که کاربرد سیلیس به دلیل افزایش و بهبود محتوی نسبی آب و کاهش

محلول پاشی کود سیلیس موثر تر از مصرف در آب آبیاری بود و بیشترین تأثیر را در تخفیف تنش کم آبی داشت. بنابر نتایج حاصله می توان توصیه نمود که کود سیلیس برای حفظ رشد و نمو طبیعی گیاه علوفه ای سورگوم به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک مد نظر کشاورزان قرار گیرد. با این حال، استفاده گسترده آن در سایر محصولات زراعی نیاز به بررسی دارد.

کود سیلیس از طریق پایداری غشا و حفظ محتوای نسبی آب بگر و کاهش نشت یونی سبب حفظ ساختار رویشی گیاه شد. کود سیلیس در شرایط تنش کم آبی منجر به کاهش ماده خشک قابل هضم گردید اما از طرف دیگر منجر به افزایش میزان پروتئین خام و همچنین کاهش میزان ماده سمی اسید سیانیدریک در علوفه تولیدی شد. نکته قابل توجه دیگر این است که استفاده از کود سیلیس می تواند در افزایش عملکرد و وزن خشک سورگوم تأثیر گذار باشد و در این بین

References

- Ahmadi Najafabadi, M., Askari, H., & Soltani Najafabadi, M. (2015). Study of Hydrogen Cyanide Effects on Salt Stress Induction in *Aeluropus litoralis*. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, 4(1), 55-66.
- Ahmed, A. A., Hassan, M. S. M., & El Naim, A. M. (2016). Evaluation of some local sorghum genotypes in north Kordofan of Sudan semi-arid agro-ecological environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 6(1), 54-57.
- Ahmed, I. M., & Rajab, M. N. (2017). Estimate of Genetic Parameters and Correlation Coefficient in Sudan Grass (*Sorghum sudanense* (Piper) Staff). *Journal of Plant Production*, 8(9), 935-938. <https://doi.org/10.21608/jpp.2017.40915>
- Ahmed, M., Qadeer, U., & Aslam, M. A. (2011). Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research*, 6(3), 594-607.
- Ali, E., Iqbal, A., Hussain, S., Shah, J. M., Said, F., & Imtiaz, M. (2019). Selection criteria to assess drought stress tolerance in wheat genotypes using physiological and biochemical parameters. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 16(4), 751-762. <https://doi.org/10.13005/bbra/2791>
- Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., & Lee, D. J. (2018). Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*, 10(2), 177-183. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x>
- Artyszak, A. (2018). Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality-A literature review in Europe. *Plants*, 7(3), 54. <https://doi.org/10.3390/plants7030054>
- Asadpour, S., Madani, H., Nour Mohammadi, Gh., Majidi Heravan, I., & Heidari Sharif Abad, H. (2022). Improving maize yield with advancing planting time and nano-silicon foliar spray alone or combined with zinc. *Silicon*, 14, 201-209. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00815-5>
- Balakhnina, T. I., Matichenkov, V. V., Wlodarczyk, T., Borkowska, A., Nosalewicz, M., & Fomina, I. R. (2012). Effects of silicon on growth processes and adaptive potential of barley plants under optimal soil watering and flooding. *Plant Growth Regulation*, 67(1), 35-43. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9658-6>
- Behera, S. K., & Panda, R. K. (2009). Effect of fertilization and irrigation schedule on water and fertilizer solute transport for wheat crop in a sub-humid sub-tropical region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 130, 141-155. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.12.009>
- Blaney, B. J., & Dodman, R. L. (2002). Production of zearalenone, deoxynivalenol, nivalenol, and acetylated derivatives by Australian isolates of *Fusarium graminearum* and *F. pseudograminearum* in relation to source and culturing conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53(12), 1317-1326. <https://doi.org/10.1071/AR02041>
- Eastin, J. D. (1980). Sorghum development and yield. In s. Yoshida (ed) symp. On potential productivity of field crops under different environments. Losbanos, Philippines. 22-26 sept.
- FAO (Food and Agriculture of United Nation). 2020. World food situation, FAO cereal supply and demand brief, 7 September, Retrieved from <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>
- Ghanem, H. E., Aldesuquy, H. S. & Elshafii, H. A. (2019). Silicon Alleviates Alkalinity Stress of Sorghum (*Sorghum Bicolor* L.) Plants by Improving Plant Water Status, Pigments, Protein, Nucleic Acids and Carbohydrates Contents. *AATPS*, 2(2), 180027.
- Hadebe, S. T., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2017). Drought tolerance and water use of cereal crops: A focus on sorghum as a food security crop in sub-Saharan Africa. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(3), 177-191. <https://doi.org/10.1111/jac.12191>
- Hayes, B. J., Lewin, H. A., & Goddard, M. E. (2013). The future of livestock breeding: genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation. *Trends in genetics*, 29(4), 206-214. <https://doi.org/10.1016/i.tig.2012.11.009>
- He, Y., Oyaizu, H., & Suzuki, S. (2002). Indole-3-acetic acid production in *Pseudomonas fluorescens* HP72 and its association with suppression of creeping bentgrass brown patch. *Current Microbiology*, 47, 138-143.

- <https://doi.org/10.1007/s00284-002-3968-2>
18. Helaly, M. N., El-Hoseiny, H., El-Sheery, N. I., Rastogi, A., & Kalaji, H. M. (2017). Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant Physiology and Biochemistry*, 118, 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.021>
19. Hou, Sh., Zhu, J., Ding, M., & Guohua, L.V. (2008). Simultaneous determination of gibberellic acid, indole-3-acetic acid and abscisic acid in Wheat extracts by solid-phase extraction and liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry. *Talanta*, 76(4), 798-802. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.04.041>
20. Jabereldar, A. A., El Naim, A. M., Abdalla, A. A., & Dagash, Y. M. (2017). Effect of water stress on yield and water use efficiency of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in semi-arid environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*, (1), 1-6.
21. Jafari, A., Connolly, V., Frolich, A., & Walsh, E. K. (2003). A note on estimation of quality in perennial ryegrass by near infrared spectroscopy. *Irish Journal of Agriculture and Food Research*, 42, 293-299.
22. Kalteh, M., Alipour, Z. T., Ashraf, S., Marashi Aliabadi, M., & Falah Nosratabadi, A. (2018). Effect of silica nanoparticles on basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress. *Journal of Chemical Health Risks*, 4(3), 251-259
23. Kazan, K. (2013). Auxin and the integration of environmental signals into plant root development. *Annals of Botany*, 112(9), 1655-1665. <https://doi.org/10.1093/aob/mct229>
24. Keshavarz Mirzamohammadi, H., Modarres-Sanavy, S. A. M., Sefidkon, F., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Mirjalili, M. H. (2021a). Irrigation and fertilizer treatments affecting rosmarinic acid accumulation, total phenolic content, antioxidant potential and correlation between them in peppermint (*Mentha piperita* L.). *Irrigation Science*, 39, 671-683. <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00729-z>
25. Keshavarz Mirzamohammadi, H., Tohidi-Moghadam, H. R., & Hosseini, S. J. (2021b). Is there any relationship between agronomic traits, soil properties and essential oil profile of peppermint (*Mentha piperita* L.) treated by fertiliser treatments and irrigation regimes? *Annual Applied Biology*, 179(3), 331-344. <https://doi.org/10.1111/aab.12707>
26. Keshavarz, H., & Khodabin, Gh. (2019). The role of uniconazole in improving physiological and biochemical attributes of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) subjected to drought stress. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 22(2), 161-168. <https://doi.org/10.1007/s12892-019-0050-0>
27. Lauriault, L., M.A. Marsalis and D.M. VanLeeuwen. 2012. Planting date affects rainfed sorghum forage yields in semiarid, subtropical environments. *Forage and Grazinglands*, 10(1): 27-35. <https://doi.org/10.1094/FG-2012-0416-01-RS>
28. Levitt, J. (1980). *Responses of Plants to Environmental Stress, Volume 1: Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-445501-6.50016-6>
29. Li, P., Song, A., Li, Z., Fan, F., & Liang, Y. (2012). Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, 354(1-2), 407-419. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1076-4>
30. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
31. Maghsoudi, K., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2016). Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 39(7), 1001-1015. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1109108>
32. Martin, T. N., Nunes, U. R., Stecca, J. D. L., & Pahins, D. B. (2017). Foliar application of silicon on yield components of wheat crop. *Revista Caatinga*, 30(3), 578-585. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n305rc>
33. Menezes, C. B., Saldanha, D. C., Santos, C. V., Andrade, L. C., Mingote Júlio, M. P., Portugal, A. F., & Tardin, F. D. (2015). Evaluation of grain yield in sorghum hybrids under water stress. *Genetics and Molecular Research*, 14(4), 12675-12683. <https://doi.org/10.4238/2015.October.19.11>
34. Moussa, H. R. (2006). Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed Maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*, 2, 293-297.
35. Moussa, H. R. (2006). Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed Maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*, 2, 293-297.
36. Neu, S., Schaller, J., & Dudel, E. G. (2017). Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, 7(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/srep40829>
37. Rizal, G., Karki, S., Alcasid, M., Montecillo, F., Acebron, K., Larazo, N., Garcia, R., Slamet-Loedin, I. H., & Quick, W. P. (2014). Shortening the breeding cycle of sorghum, a model crop for research. *Crop Science*, 54(2), 520-529. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.07.0471>
38. Ryu, H., & Cho, Y. G. (2015). Plant hormones in salt stress tolerance. *Journal of Plant Biology*, 58(3), 147-155. <https://doi.org/10.1007/s12374-015-0103-z>
39. Sarnklong, C., Cone, J. W., Pellikaan, W., & Hendriks, W. H. (2010). Utilization of rice straw and different

- treatments to improve its feed value for ruminants: a review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 23(5), 680-692. <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.80619>
40. Sher, A., Ansar, M., Ijaz, M., & Sattar, A. (2016). Proximate analysis of forage sorghum cultivar with different doses of nitrogen and seed rate. *Fields Crops Turkish Journal*, 21, 276-285. <https://doi.org/10.17557/tjfc.60032>
 41. Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., Ying, Q., & Qian, Q. (2006). Effects of different treatments of salicylic acid on heat tolerance, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzyme activity in seedlings of *Cucumis sativa* L. *Plant Growth Regulation*, 48(2), 127-135. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-5482-6>
 42. Tahir, M. A., Rahmatullah, T., Aziz, M., Kanwal, A. S., & Maqsood, M. A. (2006). Beneficial effects of Silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Pakistan Journal of Botany*, 38(5), 1715-1722.
 43. Tripathi, D. K., Singh, V. P., Kumar, D., & Chauhan, D. K. (2012). Rice seedlings under cadmium stress: effect of silicon on growth, cadmium uptake, oxidative stress, antioxidant capacity and root and leaf structures. *Chemistry and Ecology*, 28(3), 281-291. <https://doi.org/10.1080/02757540.2011.644789>
 44. Wang, Y., Chen, P., Sun, L., Li, Q., Dai, S., Sun, Y., Kai, W., Zhang, Y., Liang, B., & Len, P. (2015). Transcriptional regulation of PaPYLs, PaPP2Cs and PaSnRK2s during sweet cherry fruit development and in response to abscisic acid and auxin at onset of fruit ripening. *Plant Growth Regulation*, 75, 455-464. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-0006-x>
 45. Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., & Oka, M. (2013). Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(11), 3099-3107. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1343-5>
 46. Yin, L., Wang, S., Tanaka, K., Fujihara, S., Itai, A., Den, X., & Zhang, S. (2016). Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. *Plant, Cell and Environment*, 39(2), 245-258. <https://doi.org/10.1111/pce.12521>
 47. Zegada-Lizarazu, W., & Iijima, M. (2005). Deep root water uptake ability and water use efficiency of pearl millet in comparison to other millet species. *Plant Production Science*, 8, 454-460. <https://doi.org/10.1626/pps.8.454>

Contents

Research Articles

- Response of Cumin (*Cuminum cyminum* L.) Ecotypes to Drought Stress During Germination Stage at Low Temperature** 1
E. Boroumand Rezazadeh, A. Nezami, Z. Khorasani, M. Khajeh Hosseini
- Effect of Deficit Irrigation in Different Stages on Physiological Traits and Water Use Efficiency of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in Two Planting Methods** 11
F. Mashhadi, H. R. Khazaei, M. R. Ramazani Moghaddam
- Investigation of Physiological and Yield Characteristics of Quinoa as Affected by Different Levels of Irrigation and Plant Density** 29
M. Mostafaei, M. Jami Al-Ahmadi, M. Salehi, A. Shahidi
- Quinoa Phenological Development Modeling Based on Field Data** 47
Sh. Eghbali, M. Nassiri-Mahallati, M. Jahan, M. Salehi
- Photosynthetic Metabolism and Antioxidant System of Spike and Flag Leaf of Bread Wheat under Drought Stress** 61
S. Navabpour, S. GolCheshmeh, A. Mazandarani, H. Ahmadi-Ochtapeh
- Effect of Deficit Irrigation, Planting Date and Biofertilizers on Agro- Morphological Traits, Leaf Nitrogen and Carbon Concentration and Seed Yield on Quinoa under Ardabil conditions** 75
M. Jabbari-oranj, H. Moghadam, M. R. Jahansouz, A. Ahmadi, B. Motesharezadeh
- Effects of Nano Silica and Salicylic Acid on Yield and Yield Components in Corn (*Zea mays* L.)- Mungbean (*Vigna radiata* L.) Monocropping and Intercropping under Drought Stress Conditions** 91
S. Afzali, S. M. B. Hosseini, L. Ma'mani, A. Ahmadi
- Investigation of Agronomic and Physiological Characteristics of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under Water Deficit Stress and Silicon Fertilizer** 113
E. Rezaei, H. Larijani, P. Kasraie, H. Tohidi Moghadam, F. Ghooshchi

Iranian Journal of Field Crops Research

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

Vol. 21

No. 1

2023

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

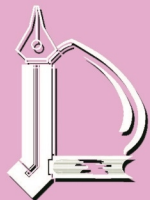
AghaAlikhani, M.	Weed-Crop Ecophysiology	Prof., Tarbiat Modares University, Tehran
Ehsanzadeh, P.	Plant Physiology	Prof., Isfahan University of Technology
Emam, Y.	Crop Physiology	Prof., Shiraz University
Bagheri, A.	Genetic and Plant Breeding	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Behdani, M.A.	Crop Ecology	Prof., University of Birjand
Banayan Awal, M.	Agro-Environment Modeling	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Jami Alahmadi, M.	Crop Physiology	Assoc. Prof., University of Birjand
Raei, Y.	Plant Eco physiology	Prof., Tabriz University
Rahimian-Mashhadi, H.	Crop Physiology	Prof., Tehran University
Zamani, Gh.R.	Crop Physiology	Assoc. Prof., University of Birjand
Zare- Feizabadi, A.	Crop Ecology	Prof., Agriculture and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi Province
Shahriari-Ahmadi, F.	Genetic and Plant Breeding	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Kafi, M.	Crop Physiology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Nezami, A.	Crop Physiology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khazaei, H.R.	Crop Physiology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Eyshi Rezaei, E.	Crop modeling	Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research: Müncheberg, Brandenburg, Germany
Lashakri, A.	Environmental Plant Physiology	(CIMMYT-Henan Collaborative Innovation Centre), Henan Agricultural University, Zhengzhou, China

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.21 No.1

2023

Iranian Journal of Field Crops Research

ISSN:2008-1472

Contents

Research Articles

- Response of Cumin (*Cuminum cyminum* L.) Ecotypes to Drought Stress During Germination Stage at Low Temperature..... 1**
E. Boroumand Rezazadeh, A. Nezami, Z. Khorasani, M. Khajeh Hosseini
- Effect of Deficit Irrigation in Different Stages on Physiological Traits and Water Use Efficiency of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in Two Planting Methods..... 11**
F. Mashhadi, H. R. Khazaei, M. R. Ramazani Moghaddam
- Investigation of Physiological and Yield Characteristics of Quinoa as Affected by Different Levels of Irrigation and Plant Density 29**
M. Mostafaei, M. Jami Al-Ahmadi, M. Salehi, A. Shahidi
- Quinoa Phenological Development Modeling Based on Field Data 47**
Sh. Eghbali, M. Nassiri-Mahallati, M. Jahan, M. Salehi
- Photosynthetic Metabolism and Antioxidant System of Spike and Flag Leaf of Bread Wheat under Drought Stress..... 61**
S. Navabpour, S. GolCheshmeh, A. Mazandarani, H. Ahmadi-Ochtapeh
- Effect of Deficit Irrigation, Planting Date and Biofertilizers on Agro- Morphological Traits, Leaf Nitrogen and Carbon Concentration and Seed Yield on Quinoa under Ardabil conditions 75**
M. Jabbari-oranj, H. Moghadam, M. R. Jahansou, A. Ahmadi, B. Motesharezadeh
- Effects of Nano Silica and Salicylic Acid on Yield and Yield Components in Corn (*Zea mays* L.)-Mungbean (*Vigna radiata* L.) Monocropping and Intercropping under Drought Stress Conditions 91**
S. Afzali, S. M. B. Hosseini, L. Ma'mani, A. Ahmadi
- Investigation of Agronomic and Physiological Characteristics of Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under Water Deficit Stress and Silicon Fertilizer 113**
E. Rezaei, H. Larijani, P. Kasraie, H. Tohidi Moghadam, F. Ghooshchi