

- ۱ تأثیر محلول پاشی سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم بر عملکرد دانه، رنگدانه‌های فتوسنتزی و غلظت عناصر معدنی دانه گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) در شرایط دیم
علی شادروز، مصطفی حیدری، مهدی برادران فیروزآباد
- ۱۹ تجزیه چند متغیره ژنوتیپ‌های جدید گندم دوروم (*Triticum durum* L.) در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهایی فصل
راشین طاهری، زهرا خدارحم پور، منوچهر خدارحمی، محمد مرادی
- ۳۹ شناسایی و تعیین عوامل مؤثر بر خلأ عملکرد جو دیم در شرایط تنش خشکی انتهایی فصل رشد
رضا عطایی عظیمی، علی راحمی کاریزکی، عباس بیابانی، معصومه نعیمی
- ۵۳ ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و اسانس گیاه دارویی مرزه جنگلی (*Satureja mutica* Fisch.) تحت تأثیر محرک‌های رشدی و دورهای آبیاری
مهراب یادگاری
- ۷۷ اثر تنش خشکی، کود آلی و پتاسیم بر عملکرد کمی و کیفی دانه و بهره‌وری آب کلزا
حمدلله اسکندری، کامیار کاظمی
- ۹۱ ارزیابی محلول پاشی سولفات آهن بر عملکرد کمی و کیفی ارقام ذرت دانه‌ای
میلاذ سلطانی نژاد، مهدی دهمرده، عیسی خمیری
- ۱۰۵ ارزیابی لاین‌های امیدبخش گندم نان با عملکرد بالا و خصوصیات زراعی مطلوب با استفاده از شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل در جنوب استان فارس
علیرضا عسکری کلستانی، محسن اسماعیل زاده مقدم، سیروس طهماسبی، منوچهر دست‌قال
- ۱۲۵ ارزیابی پارامترهای ژنتیکی عملکرد و صفات مهم زراعی ژنوتیپ‌های گلرنگ حاصل از تلاقی رقم امید بخش ۹۳ × آمریکایی تحت تنش خشکی
سیده عصمت هاشمی فدکی، نفیسه مهدیه نژاد، قاسم محمدی نژاد، فاطمه ابراهیمی، براتعلی فاخری
- ۱۳۹ بررسی تاثیر خصوصیات فیزیولوژیک گندم دوروم بر عملکرد تحت شرایط دیم با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره
هوشنگ رحمتی، علی نخ‌زری مقدم
- ۱۵۷ تأثیر مصرف نانوسیلیکون و نانوآکسید روی بر عملکرد کمی، کیفی و کارایی مصرف آب و روی در سویا (*Glycine max* L.) تحت رژیم‌های آبیاری
حشمت اله عزیزی، عباس ملکی، محمد میرزائی حیدری، فرزاد بابایی، علی حاتمی

نخود (*Cicer arietinum* L.): دستاوردها و فرصت‌ها در تحمل به تنش‌های غیرزنده و انعطاف‌پذیری در شرایط متغیر آب و ۱۷۹

هوایی

بهمن فاضلی نسب، سعیدرضا وصال، عبدالرضا باقری، سعید ملک زاده شفارودی

ارزیابی رنگدانه‌های فتوسنتزی، عملکرد و اجزای عملکرد ماش (*Vigna radiate* L.) در پاسخ به کاربرد اسید هیومیک و قطع ۲۱۷

آبیاری

آمنه حق شناس، خسرو عزیزی، ناصر بختیاری، سعید حیدری

نشریه تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک

جلد هفتم، شماره اول، بهار ۱۴۰۴

این نشریه که با همکاری انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران و انجمن علمی دانش کشاورزی گرمسیری ایران منتشر می‌گردد بر اساس آیین نامه نشریات علمی مصوب ۹۸/۰۲/۰۹ در ارزیابی سال ۱۴۰۳ موفق به کسب رتبه الف شده است و در پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC) نیز نمایه می‌شود.

صاحب امتیاز و ناشر: دانشگاه زابل

سردبیر: دکتر محمد رضا اصغری پور، استاد گروه زراعت، دانشگاه زابل

مدیر مسئول: دکتر اسماعیل سیدآبادی، دانشیار گروه زراعت، دانشگاه زابل

هیأت تحریریه:

دکتر سیدجلال طباطبائی، استاد گروه باغبانی، دانشگاه شاهد

دکتر ناصر مجنون حسینی، استاد گروه زراعت، دانشگاه تهران

دکتر محمدرضا شکیبا، استاد گروه اکوفیزیولوژی گیاهی، دانشگاه تبریز

دکتر سیدمحسن موسوی نیک، استاد گروه زراعت، دانشگاه زابل

دکتر محمد صدقی، استاد گروه زراعت، دانشگاه اردبیل

دکتر خسرو عزیزی، استاد گروه زراعت، دانشگاه لرستان

دکتر عبدالعلی غفاری، دانشیار موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور

دکتر محمد رضا اصغری پور، استاد گروه زراعت، دانشگاه زابل

دکتر بهنام کامکار، استاد گروه زراعت، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر رضا صدرآبادی حقیقی، استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

دکتر محمود رمرودی، استاد گروه زراعت دانشگاه زابل

دکتر مهدی دهمرده، دانشیار گروه زراعت دانشگاه زابل

هیأت مشاوران بین المللی:

دکتر آریا دولت آبادیان، دانشگاه وسترن استرالیا، استرالیا

دکتر هاوارد چارلزلی، دانشگاه کالج هادلو، انگلستان

دکتر آمیت کساروانی، دانشگاه پانتناگار، هندوستان

دکتر شهزاد مقصود احمد بصرا، دانشگاه کشاورزی فیصل آباد، پاکستان

دکتر مراد تورج تورک، دانشگاه وان یوزونجی ییل، ترکیه

ویراستاران: دکتر اسماعیل سیدآبادی، دکتر عباس نصیری ده سرخی

صفحه آرا: فاطمه فتحی

نشانی: سیستان و بلوچستان، زابل، جاده بنجار، دانشگاه زابل، دانشکده کشاورزی، دفتر نشریات، کد پستی ۹۸۶۱۳۳۵۸۵۶

تلفن: ۰۵۴)۳۱۲۳۲۱۰۲، فاکس: ۰۵۴)۳۱۲۳۲۱۰۰

راهنمای تهیه مقاله برای نشریه "تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک"

نشریه تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک از کلیه نویسندگان گرامی درخواست می‌نماید تا هنگام نگارش مقاله خود، کلیه موارد و نکات ذیل را مد نظر قرار دهند و رعایت نمایند. با توجه به اینکه نشریه در فرآیند نمایه‌سازی در پایگاه‌های معتبر بین‌المللی قرار دارد، در صورت عدم نکات و شرایط مندرج در زیر، مقاله شما پیش از ارسال به داوری رد خواهد شد و تا زمانی - که همه موارد زیر رعایت نشده باشند به درخواست شما ترتیب اثر داده نخواهد شد.

چه مقالاتی را می‌توان ارسال نمود؟

مقالات پژوهشی: آن دسته از مقالاتی که شامل نتایج نوین از یک کار پژوهشی باشد را مقالات پژوهشی می‌خوانند. در این گونه از مقالات، نویسندگان باید پس از گردآوری داده‌های اصیل با روش‌های دقیق و معتبر پژوهشی و علمی به تحلیل یافته‌های خود بپردازند و نتایج یافته‌ها و مشاهدات علمی خود را ارائه نمایند.

مقالات مروری: آن دسته از مقالاتی که با دیدگاه مرور تخصصی ادبیات انتشار یافته علمی و پژوهشی روز دنیا در زمینه‌های مرتبط با موضوع نشریه باشند و توسط افراد متخصص و صاحب‌نظر در آن زمینه نگارش یافته باشند جزو مقالات مروری طبقه‌بندی می‌شوند و قابل ارسال برای داوری هستند.

دستورالعمل و راهنمای تهیه مقاله

نگارش مقاله باید با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Word 2007 یا نسخه‌های بالاتر صورت بگیرد. تنظیمات صفحات مقاله باید در حالت صفحه A4 با ۲/۵ سانتی‌متر (یک اینچ) حاشیه به صورت تک‌ستونه باشد و متن مقاله با فاصله ۱/۱۵ بین خطوط نگارش شود.

کلیه متون مقاله باید با استفاده از فونت (B Nazanin) درج شوند. عنوان مقاله باید با سایز ۱۴ ضخیم و متن مقاله با سایز ۱۳ و ضخامت عادی درج شوند. عناوین اصلی مقاله مانند چکیده، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث و غیره با قلم ضخیم سایز ۱۳ درج شوند. عناوین جداول و اشکال با سایز ۹ پررنگ به صورت وسط چین و اطلاعات جداول با سایز ۹ ضخامت نرمال درج می‌گردند (در خصوص عنوان جداول و شکل‌ها، همچنین اطلاعات داخل آنها، سایز ۸ برای کلمات انگلیسی استفاده شود). نام‌های غیرفارسی در متن با فونت Times New Roman سایز ۱۱ درج می‌شوند.

مشخصات مقاله و نویسندگان

عنوان مقاله، نام و نام‌خانوادگی نویسندگان، سمت نگارندگان مقاله به همراه مرتبه علمی آنان، نام دانشگاه یا مؤسسه پژوهشی که نویسنده در آن اشتغال دارد به همراه آدرس ایمیل، نشانی پستی و تلفن نویسنده مسئول باید به دقت بر روی صفحه‌ای جداگانه به فارسی و انگلیسی درج گردند و به همراه برگه تعهدنامه امضاء شده اسکن و ارسال شود.

مقاله به طور کلی باید شامل بخش‌های زیر باشد:

عنوان: باید کوتاه و شفاف باشد و موضوع مقاله را به خوبی مشخص سازد. حداکثر طول عنوان ۲۰ واژه است. **چکیده:** باید به‌طور گویا و شفاف خلاصه‌ای از مقاله را به خواننده ارائه نماید و طول آن از ۲۵۰ واژه بیشتر نشود. بهتر است در جمله اول چکیده، ضرورت و اهداف انجام پژوهش درج گردد. در جمله دوم، مکان و زمان انجام پژوهش نوشته شود. **واژه‌های کلیدی:** باید بین ۴ تا ۶ واژه که در دسته‌بندی موضوع مقاله کمک می‌نماید باشد. واژگان گزیده شده نباید در عنوان مقاله وجود داشته باشند و باید بر اساس حروف الفبا مرتب گردند.

مقدمه: بایستی علاوه بر تعریف موضوع مقاله و بیان کلیات پژوهش حاوی اطلاعات مربوط به اهمیت موضوع، پیشینه پژوهشی، فرضیه‌ها و هدف از اجرای تحقیق باشد. نام‌های علمی در متن مقاله و همچنین در بخش فهرست منابع، به صورت ایتالیک نوشته شوند. اصول سجاوندی یا نقطه‌گذاری و همچنین صفحه‌آرایی رعایت شود. قسمت‌های مختلف مقاله، پاراگراف-بندی شوند، به‌طور مثال در قسمت مقدمه به جای اینکه مطالب در یک پاراگراف طولانی آورده شوند بهتر است پاراگراف‌بندی موضوعی صورت گیرد.

در پاراگراف آخر بخش مقدمه، می‌بایست جنبه‌های نوآوری، ضرورت و اهداف انجام پژوهش به‌طور کامل شرح داده شود.

مواد و روش‌ها: بایستی به مشخصات منطقه آزمایش و کلیه مواد، روش‌ها و تکنیک‌های مورد استفاده در آزمایش به‌طور شفاف اشاره شود. در صورتی که یک روش از منبعی گرفته شده باشد، فقط به ذکر منبع اکتفا شود. نام دستگاه‌های مورد استفاده کاملاً ذکر شود. همچنین محل تهیه بذر، تاریخ کاشت و برداشت نیز نوشته شوند. فرمول‌ها و روابط می‌بایست شماره‌گذاری شوند و شماره آنها در متن ذکر گردد. از به کار بردن اصطلاح‌هایی مانند "فرمول زیر" یا "رابطه زیر" خودداری شود.

نتایج و بحث: نتایج و بحث به صورت توأم نوشته شود. نتایج آزمایش می‌تواند بصورت جدول، شکل، عکس و غیره نشان داده شود ولی در هر حال بایستی از ارائه نتایج به‌صورت تکراری در دو شکل مجزا (برای مثال هم به‌صورت شکل و هم جدول) خودداری گردد. هر جدول از شماره، عنوان، سرستون و متن تشکیل می‌شود. عنوان جداول باید مختصر و گویا بوده، به‌نحوی-که نیازی به مراجعه به متن مقاله نباشد. عنوان جداول و اشکال به فارسی و انگلیسی تایپ شود. عنوان شکل در زیر آن درج گردد و عنوان جدول در بالای آن نوشته شود. هر جدول با یک خط افقی از شماره و عنوان متمایز می‌شود. همچنین سرستون با یک خط افقی از متن جدول جدا شده و در زیر متن جدول نیز یک خط افقی ترسیم می‌شود. جداول و اشکال مقاله باید به صورت دو زبانه تهیه شوند. یعنی باید عنوان جدول‌ها، عناوین ستون‌ها و ردیف‌ها در جداول، توضیح عکس‌ها، تصاویر و نمودارها به‌صورت فارسی و انگلیسی و اعداد جداول و اشکال به زبان انگلیسی آورده شوند. برای نوشتن معادل انگلیسی کلمات داخل جدول، نیازی به ایجاد ردیف جداگانه در جدول نمی‌باشد بلکه معادل انگلیسی باید زیر فارسی نوشته شود. سطر اول جدول که عناوین ستون‌ها را شامل می‌شود به‌صورت پررنگ (Bold) باشد.

واحدهای داخل جداول و شکل‌ها فقط باید به انگلیسی نوشته شوند و نیازی به نوشتن واحدها به فارسی نمی‌باشد. همچنین زیرنویس جداول و شکل‌ها نیز باید به صورت دوزبانه (فارسی و انگلیسی) تهیه شود. جداول باید از چپ به راست، تنظیم شوند. کادر اطراف شکل‌ها، حذف شوند.

جداول و اشکال می‌بایست در جای مناسب در داخل متن اصلی مقاله قرار داده شوند و به‌طور مناسب و هماهنگ شماره‌گذاری گردند. لازم است نویسندگان گرامی از ارسال جداول و نمودارها به صورت عکس خودداری نمایند. همچنین، کلیه تصاویر و مدارک آزمایشگاهی باید از کیفیت و وضوح قابل قبول برخوردار بوده و با رزولوشن ۳۰۰ پیکسل ذخیره شده و ارسال گردند. **نتیجه‌گیری کلی:** این بخش به‌صورت مستقل از نتایج و بحث، در پاراگرافی جداگانه ذکر شود.

سپاس‌گزاری: در این بخش باید از همکاری‌های علمی، پژوهشی، مالی اشخاص حقیقی و حقوقی که در به انجام رسیدن پژوهش به شما کمک نموده‌اند سپاس‌گزاری نمایید.

تعارض منافع: در صورتی که بخشی از پژوهش شما به دیگر فعالیت‌های حرفه‌ای و اقتصادی یا مسئولیت‌های شما مرتبط می‌باشد باید این موارد را در این بخش اظهار نمایید. برای مثال چنانچه شما در شرکتی فعال هستید که محصولی را در زمینه زراعت یا کشاورزی تولید می‌نماید یا اگر اختراعی دارد که مرتبط با موضوع پژوهش شما می‌باشد باید در این بخش مسائل از

این دست را اظهار نمایید. در غیر این صورت، می‌توانید از عبارت "نویسندگان اظهار می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در رابطه با نشر این مقاله وجود ندارد." استفاده کنید.

منابع: ارجاع به منبع در متن مقاله پس از ذکر یک مطلب غیر بدیهی که نیازمند استناد برای ارزیابی درستی آن است صورت می‌گیرد. منبع مورد نظر که برای بررسی درستی آن مطلب به آن ارجاع داده می‌شود، در پایان جمله و در داخل پرانتز با ذکر اسم نویسنده و سال آورده می‌شود (در صورتی که منبع فارسی است باید معادل انگلیسی نام نویسنده و سال میلادی ذکر گردد). از آوردن اسم نویسنده منبع در اول جمله خودداری نمایید.

نویسندگان محترم توجه داشته باشند در متن، "پرانتزهایی" که برای منابع به کار برده می‌شوند به "فارسی" باشند. در خصوص منابع فارسی، توجه داشته باشید اسامی نویسندگان، عنوان مقاله و نام مجله به درستی به انگلیسی برگردانده شود. برای این منظور می‌توانید به سایت مجله مورد نظر رفته و در بخش انگلیسی سایت مجله، مشخصات مقاله مورد نظر خود را پیدا کنید. فهرست منابع به صورت انگلیسی و بر اساس حروف الفبا به شرح نمونه‌های زیر تنظیم شود. لازم است تمام منابع فارسی مورد استفاده نیز به زبان انگلیسی نوشته شده و در پایان به شکل استاندارد (یعنی کامل، یکدست و در کروشه) از عبارت [In Persian] استفاده شود. در ضمن در انتهای هر منبع آدرس doi و یا dor نیز ارائه گردد.

Arshadi, M., Parsa, M., Lakzian, A. and Kafi, M., 2021. Evaluation of root traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under treatments of rhizobium, arbuscular mycorrhiza and pseudo-endomycorrhiza on conditions of sterilized and non-sterile soil. *Crop Science Research in Arid Regions*, 2(2), pp.241-254. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/csrr.2021.268645.1080>

Mahlooji, M. and Nasiri Dehsorkhi, A., 2021. Agrophysiological of barley genotypes responses to zinc fertilization and water saline irrigation. *Agriculture, Environment & Society*, 1(1), pp.19-25. <https://doi.org/10.22034/aes.2021.144192>

Safaripour, M., 2022. Environmental impact assessment of corn, wheat and sunflower production using life cycle assessment methodology in Kermanshah province. PhD Thesis, Faculty of Agriculture, University of Zabol [In Persian].

Ferrari, E.D., Ferreira, V.A., Grassi, E.M., Picca, A.M.T. and Paccapelo, H.A., 2018. Genetic parameters estimation in quantitative traits of a cross of triticale (*X Triticosecale* W.). *Open Agriculture*, 3(1), pp.25-31. <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0003>

چکیده انگلیسی: در پایان مقاله و پس از اتمام بخش منابع در صفحه‌ای جداگانه عنوان و چکیده انگلیسی آورده شود. چکیده انگلیسی مقاله باید به صورت مبسوط (حداقل ۶۰۰ کلمه) و دارای تمام بخش‌های زیر به شکل تفکیک شده باشد.

1. Introduction
2. Materials and Methods
3. Results and Discussion
4. Conclusion
5. Keywords

واژه‌های کلیدی بر اساس حروف الفبا مرتب شوند و حرف اول کلمات به صورت حرف بزرگ باشد. تاریخ‌های به کار برده شده در چکیده انگلیسی، باید به میلادی درج گردند.

تعهدنامه

نویسندگان گرامی جهت چاپ مقالات خود در نشریه تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک بایست فرم تعهدنامه را تکمیل و پس از اخذ رضایت و امضای نویسندگان مقاله فایل اسکن شده آن را به دفتر نشریه ارسال نمایند. در صورتی که تعداد

نویسندگان مقاله بیش از تعداد جداول در نظر گرفته بود، نویسندگان می‌توانند از صفحات مورد نیاز بیش از یک کپی تهیه نمایند و اطلاعات خود را به طور کامل و با دقت پر نمایند.

نکات مهم دیگر

- ✓ مسئولیت محتوای منتشر شده در یک مقاله تنها با نویسندگان آن مقاله می‌باشد.
- ✓ تمامی نگارندگان باید به منظور تایید اصالت محتوای مقاله و همچنین تعیین نویسنده مسئول برگ مشخصات مقاله را امضا نمایند.
- ✓ دانشجویان بایستی تایید استاد یا استادان راهنمای خود را ارسال نمایند. (در صورت عدم ارسال تعهدنامه، مقاله مورد بررسی قرار نمی‌گیرد).
- ✓ نویسنده مسئول باید حتماً ایمیل آکادمیک خود را درج نماید.
- ✓ هیات تحریریه از پذیرش مقالاتی که قبلاً در سایر نشریات چاپ شده و یا برای بررسی ارسال گردیده، معذور است.
- ✓ مقالاتی که بخشی از آن در کنگره‌ها، سمینارهای داخلی یا خارجی و سمپوزیوم‌ها آرایه و چاپ شده‌اند با ذکر این مطلب و در صورت عدم وجود موانع حقوق مؤلف (کپی رایت) از این قاعده مستثنی هستند.
- ✓ هیات تحریریه در رد، پذیرش یا ویرایش مقالات و همچنین تصمیم نهایی برای چاپ مقاله اختیار تام دارد.
- ✓ تمام مقالات باید با رعایت اخلاق در تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی و با توجه به بیانیه‌های مشخص در اخلاق پژوهش انجام شده باشد.
- ✓ به نویسندگان توصیه می‌شود تا پس از دریافت نظرات داوران، تغییرات و اصلاحات انجام شده را در نسخه اصلاحی با هایلایت کردن مطالب ویرایش شده مشخص نمایند. همچنین در برگه‌ای جداگانه ابهامات طرح شده توسط داوران را پاسخ دهند.
- ✓ حداقل نیمی از منابع ارجاع داده شده در مقاله مربوط به پژوهش‌های منتشر شده در ۱۰ سال اخیر باشند.
- ✓ تعداد مراجع ذکر شده در مقاله باید متناسب با نوع مقاله باشد. به طور متعارف مقالات پژوهشی بین ۱۰ تا ۳۰ ارجاع و مقالات مروری حداقل ۵۰ ارجاع دارند.

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 1-17

Effects of foliar application of potassium silicate and calcium nitrate on grain yield, photosynthetic pigments and concentration of mineral elements of in seed of safflower at a dry condition

Ali Shadrooz ^a, Mostafa Heidari ^{*b}, Mehdi Baradaran Firouzabadi ^b

^a Master's student, Agronomy and Plant Breeding Department, Agricultural Collage, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

^b Agronomy and Plant Breeding Department, Agricultural Collage, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

*Corresponding Author: haydari2005@gmail.com

Received: 13 October 2023 Accepted: 8 February 2024

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.420599.1375

How to cite this article:

Shadrooz, A., Heidari, M. and Baradaran Firouzabadi, M., 2025. Effects of foliar application of potassium silicate and calcium nitrate on grain yield, photosynthetic pigments and concentration of mineral elements of in seed of safflower at a dry condition. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 1-17. <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.420599.1375>

Abstract

Introduction: Water is a limiting factor in agriculture, deficit of water reducing plant development and yield. The need to maintain quality in water scarcity condition, mineral nutrition plays a beneficial role in developing environmental stress tolerance in crop plants. Potassium (K^+) is a phyto-beneficial macro-element that performs a pivotal role in organizing physio-biochemical processes to support plant survival against abiotic stresses. Also Silicate fertilization is a promising technology because silicon (Si) has been used as an elicitor of resistance in plants under conditions of abiotic stress, such as saline, heavy metal poisoning or water stress. The accumulation of Si in transpiration organs causes the formation of a double layer of silic, with a subtle decrease in opening of the stomata, reducing leaf transpiration, which restricts the loss of water without influencing growth. Calcium is an essential element for plants, functioning as a second messenger in cells, and can influence aquaporin on membrane structures, helping plants resist many kinds of environmental stress. It is widely accepted that Calcium ions (Ca^{2+}) can facilitate plants resist drought stress. Among exogenous substances discovered to alleviate plant stresses, calcium ion has proven to be more effective and the cost/benefit efficient, not only as an essential nutrient for the plant growth actively involving in a various metabolic activities and as an intracellular messenger for many signal transductions, such as abscise acid (ABA), reactive oxygen species (ROS), nitric oxide.

Materials and Methods: In order to investigate foliar application application of calcium nitrate and potassium silicate on photosynthetic pigments and concentration of mineral elements in seed of safflower in a dry condition, a factorial experiment as randomized complete block design with threereplications, was conducted. The treatments included potassium silicate at three level: (PS): 0, 1, and 2 and calcium nitrate at three level: (CaN): 0, 1, and 2 kg per thousand liters of water. Foliar application was done in two times. The first time at the beginning of the spring growing season. The second foliar application was done two weeks after the first one.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Results and Discussion: The results showed that the interaction between CaN and PS had a significant effect on grain yield and yield components. The highest grain yield was related to the second level of PS and CaN (1034 kg ha^{-1}). Maximum biological yield (31.6%) and the number of branches in per plant (28.1%) were obtained at the second level of PS and the third level of CaN. Except flavonoid, interaction between PS and CaN had a significant effect on the chlorophyll “a”, “b”, carotenoid and anthocyanin in leaves. The highest amount of chlorophyll “a” and carotenoid was in the third level of CaN and PS, and about anthocyanin, it was in the third level of CaN and the second level of PS. The concentration of nitrogen and potassium in the seed were increased by increasing the concentration of PS and CaN. The highest concentration of nitrogen was at the third level of PS and CaN (5.01%), and about potassium, it was 4.97% in the third level of PS and the second level of CaN.

Conclusion: The use of compounds that help plants in low humidity conditions can partially reduce the adverse effects of dehydration on plants and prevent the reduction of production performance in these conditions. Based on the results obtained in this experiment, it can be stated that calcium nitrate and potassium silicate had a positive role in the safflower plant in dry conditions, so that the use of these two compounds improved the grain yield and grain yield components. This increase was due to the improvement of photosynthetic pigments and physiological parameters.

Keywords: Dry farming, Nutrient elements, Physiological characteristics, Quantitative yield

تأثیر محلول پاشی سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم بر عملکرد دانه، رنگدانه‌های فتوسنتزی و غلظت عناصر معدنی دانه گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) در شرایط دیم

علی شادروز^۱، مصطفی حیدری^{۲*}، مهدی برادران فیروزآبادی^۲

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

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

* مسئول مکاتبه: haydari2005@gmail.com

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.420599.1375

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۱

چکیده

به منظور بررسی محلول پاشی نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر گیاه گلرنگ در شرایط دیم، آزمایشی بصورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم هر یک در سه سطح صفر، ۱ و ۲ کیلوگرم در هزار لیتر آب بودند. نتایج نشان داد اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه، عملکرد زیستی، تعداد شاخه جانبی و وزن هزار دانه داشت و سبب افزایش آنها شد. بیشترین عملکرد دانه در سطح یک کیلوگرم در هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم (۱۰۳۴ کیلوگرم در هکتار) بود. بجز فلاونوئید اثر متقابل سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم تأثیر معنی‌داری بر مقدار کلروفیل a، b، کارتنوئید و آنتوسیانین در برگ داشت. بیشترین مقدار کلروفیل a و کارتنوئید در سطح دو کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بود. غلظت نیتروژن و پتاسیم دانه همراه با افزایش غلظت سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم افزایش یافت بطوریکه بیشترین درصد نیتروژن دانه در سطح دو کیلوگرم در هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم (۵/۰۱ درصد) و در مورد پتاسیم دانه در سطح دو و یک کیلوگرم در هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم (۴/۹۷ درصد) حاصل شد. براساس نتایج این آزمایش می‌توان بیان کرد که محلول پاشی یک کیلوگرم سیلیکات پتاسیم و دو کیلوگرم نیترات کلسیم در هزار لیتر آب برای گلرنگ در شرایط دیم مناسبتر است.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات فیزیولوژیکی، دیمکاری، عملکرد کمی، عناصر غذایی

مقدمه

گیاه، کاهش سطح برگ و پیری زودرس برگ‌ها و در نتیجه کاهش عملکرد اقتصادی در گیاهان شود (Anjum et al., 2011). علاوه بر کمبود رطوبت، مطالعات صورت گرفته نشان داده که اکثر خاک‌های ایران دارای pH بالاتر از ۷ و همچنین دارای مقادیر بالای آهک هستند. این امر منجر به کاهش قابلیت در دسترس بودن عناصر غذایی و بخصوص عناصر کم مصرف برای گیاهان در صورت نبود آب کافی یا در اثر تنش خشکی می‌شود. با تغذیه خاکی و یا محلول پاشی عناصر غذایی می‌توان تا حدی اثرات کمبود آنها در گیاهان را کاهش داد (Flagella et al., 2002).

بدلیل اهمیت آب به عنوان یکی از عوامل محدود کننده تولید در مناطق خشک و نیمه خشک، استفاده از ترکیبات مختلف برای کاهش میزان آب مصرفی در گیاهان یکی از اولویتهای مهم می‌باشد. سیلیکون عنصری غیر ضرور برای رشد گیاهان است. با این حال پژوهش‌های متعددی نشان داده

گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L) از دانه‌های روغنی بومی ایران، سازگار با شرایط آب و هوایی با بارندگی زمستانه و بهاره کم و هوای خشک بخصوص در دوره گلدهی و پر شدن دانه است. ریشه‌های این گیاه طویل و دارای توان جذب آب از بخش‌های عمیق خاک است. از این رو به عنوان یک گیاه مقاوم به کمبود آب به حساب می‌آید (Hussain et al., 2016; Shahrokhnia and Khadem Hamzeh, 2022). امروزه ارقام متعددی از این گیاه تولید و در مناطق مختلف و سازگار با آب و هوای گوناگون ارایه شدند. در آزمایشی در منطقه یاسوج بر روی چهار رقم گلرنگ گلدشت، اصفهان ۱۴، محلی اصفهان و سینا، مشخص شد رقم گلدشت از نظر مقاومت به کم آبی نسبت به سایر رقم‌های مورد مطالعه، مناسبتر بود (Merajipour et al., 2013). کم شدن آب قابل دسترس به سبب نبود آب کافی در طی دوره رشد می‌تواند منجر به کوتاه شدن طول دوره رشد

فرآیندهای فیزیولوژیک گیاهان داشته و صفات مورفولوژیک و بیوشیمیایی گیاهانی که تحت تنش قرار گرفته‌اند را بهبود می‌دهد. در آزمایشی بر روی کنجد مشخص شد که محلول پاشی کلسیم با تأثیر بر اجزای عملکرد سبب افزایش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی شد (Ahmadi et al., 2012).

هر چند سیلیسیم به عنوان یک عنصر غیر ضرور برای گیاهان به شمار می‌رود اما نقش مفیدی در مقاومت گیاهان بخصوص در شرایط بروز آفات نباتی و نیز کمبود آب در گیاهان دارد. با توجه به اینکه گزارشی در مورد تأثیر محلول پاشی هم‌زمان دو عنصر کلسیم و پتاسیم بصورت نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم در گیاه گلرنگ در شرایط دیم ارایه نشده، این آزمایش با هدف بررسی اثرات محلول پاشی این دو عنصر بر عملکرد کمی و برخی خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه گلرنگ در شرایط دیم صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در منطقه تخته باغلق شهرستان راز و جرگلان واقع در استان خراسان شمالی با طول جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۱۱ درجه و ۸۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۱۸۱ متر از سطح دریا انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. تیمارهای آزمایش شامل سیلیکات پتاسیم در سه سطح صفر، ۱ و ۲ کیلوگرم در هزار لیتر آب و نیترات کلسیم سه سطح صفر، ۱ و ۲ کیلوگرم در هزار لیتر آب بودند (Khayat Moghadam et al., 2021). هر کرت آزمایشی شامل پنج ردیف کاشت به طول پنج متر و فواصل بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر بود. فاصله بین بلوک‌ها از یکدیگر دو متر و فاصله کرت‌ها از هم یک متر لحاظ گردید. قبل از کاشت، نمونه برداری از خاک در عمق ۳۰ سانتی‌متر جهت تجزیه شیمیایی و فیزیکی صورت و به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج آن در جدول ۱ ارایه شده است.

قطعه زمین مورد نظر برای این طرح ابتدا توسط گاو آهن برگرداندار شخم، سپس برای نرم کردن کلوخه‌ها دوبار دیسک زده شد. همچنین از کودهای پایه نیتروژن از منبع اوره به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و فسفات آمونیم به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار در زمان کاشت استفاده شد. گلرنگ رقم اصفهان با

که کاربرد سیلیسیم بطور معنی‌داری رشد گیاهان را در شرایط نرمال و حتی در شرایط تنش‌های زیستی و غیر زیستی افزایش می‌دهد (Romero-Aranda et al., 2006). در بررسی سیلیسیم و سازوکار مقاومت به خشکی در سورگوم گزارش شد که سیلیسیم سبب افزایش شاخص سطح برگ، وزن مخصوص برگ (SLW)، محتوای کلروفیل، وزن خشک برگ، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه شد (Ahmed et al., 2011). این عنصر سبب تغییر در تبادلات گازی برگ، سنتز املاح سازگار کننده، تنظیم اسمزی و کاهش اثرات تنش خشکی می‌شود. اثر محلول پاشی این عنصر در شرایط تنش خشکی بر کلزا منجر به کاهش آسیب این تنش شد (Payandeh et al., 2018).

سیلیسیم بصورت ترکیبی با سایر عناصر برای مصارف کشاورزی ارایه می‌شوند که یکی از آنها نیز سیلیکات پتاسیم است. پتاسیم یک عنصر ضروری سیتوپلاسمی است که با کاهش اتلاف آب از گیاه به صورت تبخیر و تعرق، باعث مقاومت به خشکی شده و موجب افزایش عملکرد در شرایط تنش رطوبتی می‌شود. تنظیم فشار اسمزی، تنظیم pH سلول، شرکت در ساخت پروتئین‌ها و فعال کردن برخی از آنزیم‌ها از جمله نقش‌های پتاسیم در گیاهان می‌باشد (Anrist-Rangel, 2008).

یکی دیگر از عناصر غذایی برای گیاهان کلسیم است که نقش مؤثری در حفظ ساختار غشاء سلول و کیفیت و ماندگاری محصولات کشاورزی دارد. علاوه بر حفظ دیواره سلول، کلسیم در فرآیندهای رشد و نمو از جمله تقسیم سلولی، رشد طولی سلول و نیز به عنوان پیام آور ثانویه در پاسخ به تنش‌های زیستی و غیر زیستی عمل می‌کند (Ruiz et al., 2013). نقش کلسیم در چرخه متابولیسم اسیدهای فنلیک به خوبی مشخص شده است. کلسیم از طریق تأثیر بر آنزیم‌های فنیل آلانین آمونیا لیا، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز نقش خود را ایفا می‌کند. این آنزیم‌ها در سنتز و اکسیداسیون فنل‌ها نقش دارند (Dordas, 2009). مطالعات انجام شده نشان داد که کلسیم نقش مؤثری در مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی و از جمله شوری در گیاهان دارد. در شرایط تنش خشکی و کمبود آب هم این عنصر می‌تواند تا حدی بر مقاومت گیاهان افزوده و سبب بهبود رشد و عملکرد گیاهان در این شرایط شود (Barker and Pilbeam, 2007). کلسیم اثرات قابل توجهی در

محلول پاشی)، محلول پاشی با آب مقطر انجام شد. چون آزمایش به صورت دیم بود در آن آبیاری صورت نگرفت (جدول ۲ آمار هواشناسی). نیترات کلسیم مورد استفاده در این آزمایش دارای ۱۵ درصد ازت نیتراتی و ۲۶ درصد کلسیم بود. همچنین سیلیکات پتاسیم دارای ۱۲/۵ درصد پتاسیم و ۲۵ درصد سیلیکون بود. برداشت گلرنگ در انتهای دوره رشد و در زمان زرد متمایل به قهوه‌ای شدن طبق‌ها صورت گرفت.

تراکم ۴۰۰ هزار بوته در هکتار به عمق ۴-۲ سانتی‌متر در ۱۰ اسفندماه سال ۱۴۰۰ کشت شد. کشت به صورت خشکه کاری انجام و محلول پاشی در دو نوبت به فاصله دو هفته از هم انجام شد که نوبت اول در آغاز شروع فصل رشد بهاره و در هفته آخر فروردین ماه در مرحله ۴-۶ برگی (ابتدای مرحله ساقه‌دهی) صورت گرفت ابتدا محلول پاشی سیلیکات پتاسیم روز بعد از محلول پاشی نیترات کلسیم صورت گرفت. در تیمار شاهد (عدم

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری

Table 1- Physicochemical properties of soil at a depth of 0-30 cm

بافت خاک Soil texture	شن Sand (%)	رس Clay (%)	سیلت Loam (%)	نیتروژن کل Total nitrogen (%)	پتاسیم Potassium (mg.kg ⁻¹)	فسفر Phosphorus (mg.kg ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon (%)	اسیدیته pH	شوری Electrical conductivity (dS m ⁻¹)
لومی رسی Loam-Clay	28	42	30	0.04	210	5.55	0.53	7.5	2.1

جدول ۲- هواشناسی منطقه متوسط ۵ سال زراعی (۱۳۹۵-۱۴۰۰) از اسفند تا شهریورماه

Table 2- Average meteorological data (2016-2021) from March to September

ماه Months	مینیمم دمای مطلق Absolute minimum temperature (°C)	متوسط درجه حرارت Average temperature (°C)	درصد رطوبت نسبی Relative humidity percentage (%)	ماکزیمم دمای مطلق Maximum absolute temperature (°C)	بارندگی Rainfall (mm)
اسفند March	-10	8.2	65	27.6	33.15
فروردین April	-1	9.5	64	32.2	48.5
اردیبهشت May	5.2	15	57	28	25
خرداد June	7.4	20.4	40	33	10
تیر July	14.8	25	35	38	5.25
مرداد August	9.6	25.3	37.7	37.2	7
شهریور September	9.2	25.7	46	35.6	2

فلم‌فتومتر، مقدار فسفر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Cottenie, 1980) و درصد نیتروژن دانه از روش کجلدال اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری مقادیر کلروفیل a, b و میزان کارتونید از بافت تر برگ‌ها در شروع مرحله گلدهی نمونه‌برداری صورت و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر و در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۵ و ۴۷۰ نانومتر صورت گرفت (Prochazka et al., 1998). مقادیر فلاونوئید براساس روش

جهت تعیین عملکرد زیستی و عملکرد دانه، بعد از حذف حاشیه، کل بوته‌های واقع در یک متر مربع وسط هر کرت در پانزدهم مردادماه ۱۴۰۱ برداشت شدند. برای اندازه‌گیری تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه، ۵ بوته از سطح هر کرت برداشت و اندازه‌گیری‌ها صورت گرفت. جهت تعیین مقادیر عناصر پتاسیم و فسفر دانه از روش خاکستری خشک استفاده شد. مقادیر پتاسیم با استفاده از دستگاه

در کنگد شد. این تأثیر از طریق اثر مثبت آنها بر اجزای عملکرد دانه بود. کلسیم در خاک‌های مناطق خشک نسبت به سایر عناصر غذایی به مقدار بیشتری وجود دارد، اما این عنصر از عناصر تقریباً غیرمتحرک بوده و انتقال آن به داخل گیاه بسیار کم است (Ahmadi et al., 2012). کاربرد کلسیم از طریق افزایش سبزی‌نگی، محتوای نسبی آب، سطح برگ و زیست‌توده تولیدی سبب افزایش عملکرد دانه گلرنگ شد (Jamshidi et al., 2017). سیلیسیم هم می‌تواند در شرایط کمبود آب تأثیر مثبتی بر عملکرد گیاهان داشته باشد. در تحقیقات بر روی برنج مشخص شد سیلیسیم و یا ترکیبات حاوی سیلیس تأثیر مثبتی بر تعداد خوشه‌چه در هر خوشه برنج دارد و گاهی در برخی از ارقام تا ۴۰ درصد بر تعداد خوشه‌چه پر تأثیر مثبت داشته، لذا می‌تواند در افزایش عملکرد دانه در برنج مؤثر باشند (Ma et al., 2007). مطالعات بر روی ذرت نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش وزن تر و خشک و میزان بیوماس تولیدی در آن شد. در این شرایط استفاده از سیلیسیم منجر به افزایش عملکرد دانه شد (Kaya et al., 2006). اثرات سیلیسیم در غلظت‌های مختلف بر رشد دانه، تولید ماده خشک و تغذیه معدنی گندم مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد که سیلیسیم در مقادیر کم به طور معنی‌داری خواص فیزیکی گیاه از جمله تعداد دانه، عملکرد دانه و نیز رشد ریشه و ساقه را افزایش می‌دهد (Asadi et al., 2013).

کریزک و همکاران (Krizek et al., 1993) و آنتوسیانین براساس گیتز و همکاران (Gitz et al., 1998) اندازه‌گیری شدند. در پایان داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 تجزیه و مقایسه میانگین‌ها براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ انجام پذیرفت. برای رسم نمودارها از برنامه EXCEL استفاده شد.

نتایج و بحث

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه گلرنگ داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که محلول پاشی سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم سبب افزایش عملکرد دانه در گلرنگ شد بطوری‌که بیشترین عملکرد دانه مربوط به سطح یک کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم به میزان ۱۰۳۴ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین کمترین عملکرد دانه مربوط به تیمار عدم استفاده از نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم به میزان ۷۰۶/۳ کیلوگرم در هکتار بود. مقدار افزایش عملکرد دانه در یک کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم نسبت به تیمار شاهد ۳۱/۶ درصد بود (شکل ۱). محققین گزارش کردند محلول پاشی عناصر کلسیم و روی سبب افزایش عملکرد دانه

جدول ۳ - تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد دانه گلرنگ تحت تأثیر سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات (Mean Square (MS)					
		عملکرد دانه Grain yield	عملکرد زیستی Biomass yield	تعداد شاخه جانبی در بوته Number of branch per plant	تعداد طبق در بوته Capitul per plant	تعداد دانه در طبق Seeds in capitul	وزن هزار دانه 1000 seed weight
تکرار Block	2	6706.9 ^{ns}	44063.5 ^{ns}	0.093 ^{ns}	4.9 ^{ns}	12.4*	18.9 ^{ns}
سیلیکات پتاسیم Potassium silicate (KS)	2	10666.9*	3610539.5**	11.6**	145.9**	230.7**	231.1**
نیترات کلسیم Calcium nitrate (Ca N)	2	96592.4**	2682278.9**	1.75**	55.4**	114.4**	43.8**
خطا KS*Ca N	4	15419.1**	299308.3**	0.56*	3.12 ^{ns}	8.05 ^{ns}	62.9**
خطا Error	16	1903.7	18127.1	0.145	5.47	7.61	5.19
C.V (%)		4.8	2.5	4.6	8.1	4.9	6.3

^{ns} و * و ** به ترتیب نشانگر عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

ns: non significant, * and **: significant at $\alpha=0.05$ and $\alpha=0.01$ of probability levels, respectively

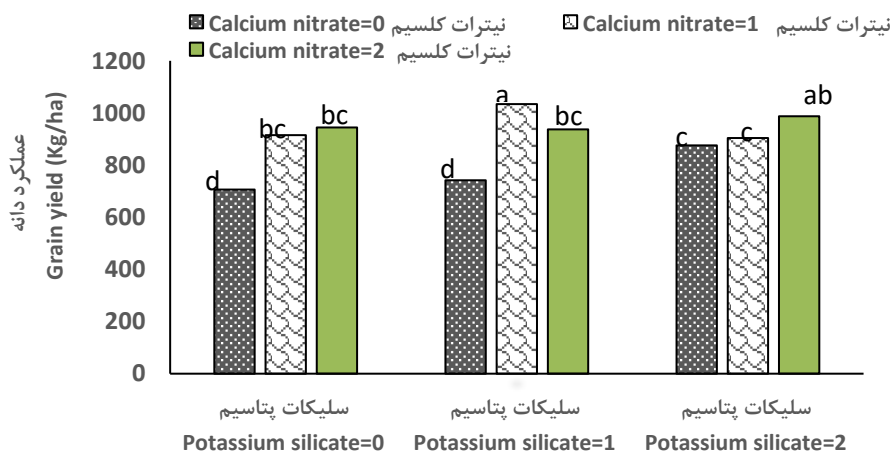
جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات اصلی سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم بر تعداد طبق در بوته، دانه در طبق و میزان فلاونوئید در گلرنگ

Table 4- Mean comparison the main effects of potassium silicate and calcium nitrate on number of capitul per plant, seed per capitul and flavonoid in safflower

تیمار Treatments	طبق در بوته Capitul per plant	دانه در طبق Seeds in capitul	فلاونوئید Flavonoid ($\mu\text{g g. Fw}^{-1}$)
Potassium silicate سیلیکات پتاسیم			
Potassium silicate=1	30.7a	55.8b	5.7a
Potassium silicate=2	31.6a	60.4a	5.8a
Calcium nitrate نیترات کلسیم			
Calcium nitrate=0	26.3b	51.4b	5.06b
Calcium nitrate=1	29.2a	57.5a	5.23b
Calcium nitrate=2	31.2a	57.6a	5.85a

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

Column with the same letters are not significantly different at 5% of probability level (LSD).



شکل ۱- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر عملکرد دانه

Figure 1- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on grain yield

متوسط ۴۲۶۲ کیلوگرم در هکتار و ۶/۶۳ به ترتیب برای عملکرد زیستی و تعداد شاخه جانبی در بوته بودند. میزان افزایش برای عملکرد زیستی معادل ۳۱/۶ و تعداد شاخه جانبی در بوته برابر ۲۸/۱ درصد بود (شکل‌های ۲ و ۳). در شکل ۴ اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر صفت وزن هزار دانه آورده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود بیشترین وزن هزار دانه با متوسط ۴۴ گرم مربوط به تیمار عدم استفاده از نیترات کلسیم و یک کیلوگرم در هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم است. کمترین مقدار آن نیز در مربوط به تیمار شاهد به مقدار ۲۷/۶ گرم می‌باشد.

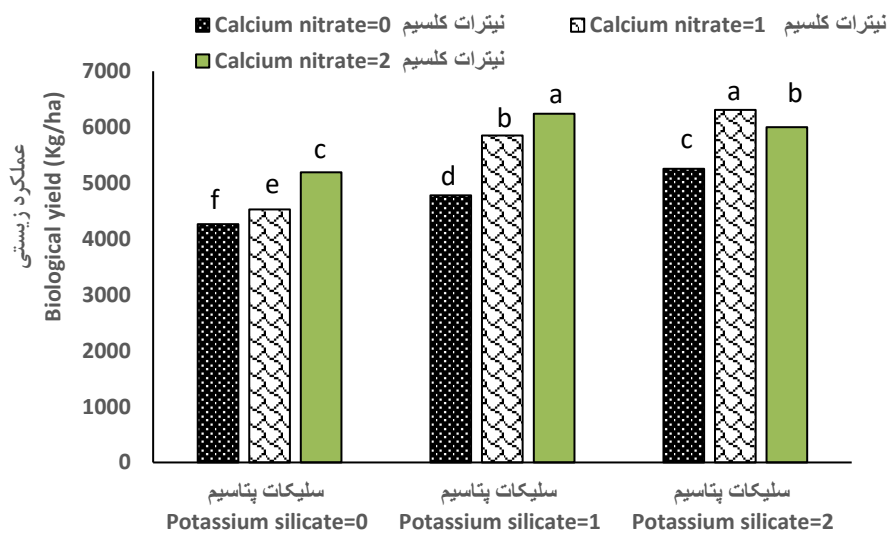
نتایج جدول تجزیه واریانس در مورد تعداد طبق در بوته و تعداد دانه در طبق نشان داد این دو صفت تنها تحت تأثیر تیمار سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم قرار گرفت و اثر متقابل آنها

عملکرد زیستی و اجزای عملکرد دانه

نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد اثر متقابل سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم بجز تعداد طبق در بوته و تعداد دانه در طبق، تأثیر معنی‌داری بر عملکرد زیستی، تعداد شاخه جانبی و وزن هزار دانه داشت (جدول ۳). همانطور که در شکل ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود محلول پاشی سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم سبب افزایش این صفات شد بطوری‌که بیشترین عملکرد زیستی و تعداد شاخه جانبی در بوته در طی استفاده از یک کیلوگرم در هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم و دو کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم بدست آمد. مقدار عملکرد زیستی در این سطح برابر ۶۲۳۹ کیلوگرم در هکتار و تعداد شاخه جانبی برابر ۹/۲۳ بود. کمترین این دو صفت هم مربوط به تیمار شاهد یا عدم استفاده از محلول پاشی نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم با

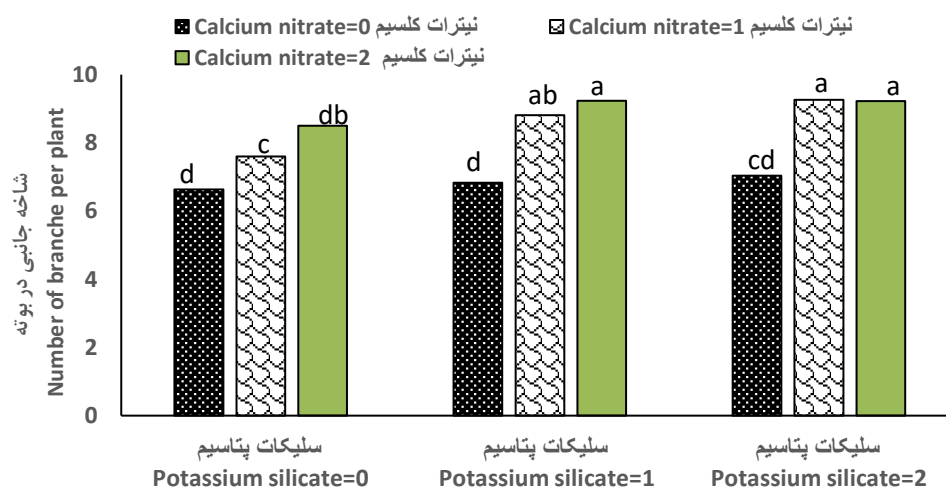
هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم بیشترین تعداد دانه با متوسط ۶۰/۴۴ دانه در طبق و کمترین مقدار آن در عدم استفاده از این عنصر حاصل شد که متوسط ۵۰/۳۳ دانه در طبق بود که حدود شش درصد مقدار آن با افزایش مقدار سیلیکات پتاسیم افزایش یافت. همچنین با کاربرد نیترات کلسیم افزایش تعداد دانه در طبق حاصل شد بطوری که بیشترین مقدار تعداد دانه در طبق در سطح دو کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم با متوسط عددی ۵۷/۶۷ حاصل شد و کمترین مقدار آن در سطح اول (عدم مصرف) با متوسط عددی ۵۱/۴۴ به دست آمد (جدول ۴).

تأثیر معنی داری بر آنها نداشت (جدول ۳). در مورد تعداد طبق در بوته، مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در هر دو تیمار، استفاده سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم در سطح عدم استفاده (شاهد) کمترین تعداد طبق در بوته حاصل شد. در سطح دوم و سوم هر دو این عناصر، عدد بدست آمده بین دو سطح از نظر آماری اختلاف معنی داری مشاهده نشد هر چند در سطح سوم (دو کیلو گرم در هزار لیتر آب) آن‌ها تعداد طبق در بوته بیشتری بدست آمد (جدول ۴). اما در مورد تعداد دانه در طبق نتایج نشان داد سیلیکات پتاسیم در این آزمایش سبب افزایش مقدار این صفت شد بطوری که در سطح دو کیلوگرم در



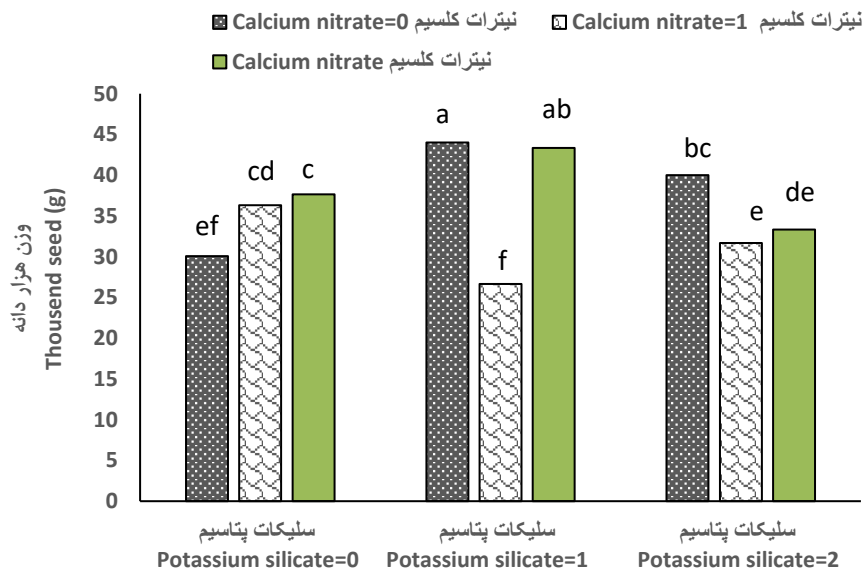
شکل ۲- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر عملکرد زیستی

Figure 2- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on biomass



شکل ۳- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر تعداد شاخه جانبی در بوته

Figure 3- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on number of branches per plant



شکل ۴- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر وزن هزار دانه

Figure 4- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on thousand seed

نیترژن افزایش یافته در گیاه به واسطه افزایش مصرف نیترات کلسیم، در ساختارهای مهم متابولیکی مثل کلروفیل و سیتوکروم نقش داشته که این ساختارها برای انجام فتوسنتز و تنفس ضروری هستند. همچنین نیترژن برای سنتز آنزیم‌ها و پروتئین‌ها ضروریست (Liu et al., 2017)، کاربرد بهینه نیترژن باعث افزایش رشد رویشی، اندام‌های سبزینه‌ای و عملکرد بیولوژیکی می‌شود. نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش محققانی که بیان کردند هدف از محلول پاشی عناصر غذایی در گیاهان افزایش دوره سبزی‌نگی و فعالیت برگ‌ها به عنوان اندام اصلی تولید و انتقال مواد فتوسنتزی می‌باشد همسو است (Mohammadi and Sohrabi, 2014).

رنگدانه‌های فتوسنتزی

نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد بجز فلاونوئید اثر متقابل سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم تأثیر معنی داری بر سایر رنگدانه‌های فتوسنتزی همانند کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید و آنتوسیانین در برگ‌های گلرنگ داشت (جدول ۵). شکل‌های ۵ تا ۸ تغییرات در میزان این رنگدانه‌های در واکنش به محلول پاشی سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم در برگ‌ها را نشان می‌دهد. هر چند محلول پاشی سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم سبب افزایش آنها شد اما تغییرات در مورد کلروفیل a

تعداد دانه در طبق یکی از اجزای عملکرد دانه در گلرنگ است که تنش‌های رطوبتی به عنوان یک عامل محیطی در زمان گرده‌افشانی باعث نمو غیرطبیعی کیسه جنینی و عقیمی دانه‌گردد و در پی آن کاهش تعداد دانه در طبق می‌شوند. در چنین شرایطی بررسی روابط بین اجزای عملکرد دانه باعث شناسایی ارقام دارای اجزای عملکرد دانه مناسب می‌شود (Malekinejad, and Majidi, 2015). رشد و عملکرد در شرایط تنش‌های محیطی احتمالاً به علت تغییر در انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی و کاهش رشد بخش هوایی گیاه است و به نظر می‌رسد بهبود شرایط تغذیه‌ای و نقش مثبت محلول پاشی سیلیکات در فتوسنتز می‌تواند در افزایش رشد و عملکرد گیاه نقش داشته باشد (Haghighi and Pessaraki, 2013). محققان عنوان کردند که کمبود سیلیسیم می‌تواند منجر به کاهش مقدار کلروفیل برگ و بدنبال آن کاهش میزان فتوسنتز در برگ شود. این امر به دلیل نقش سیلیسیم در زنجیره فتوسنتزی و ممانعت از تخریب کلروفیل و نیز بهبود فعالیت آنزیم ریبولوز بی فسفات کربوکسیلاز است (Zuccarini, 2008).

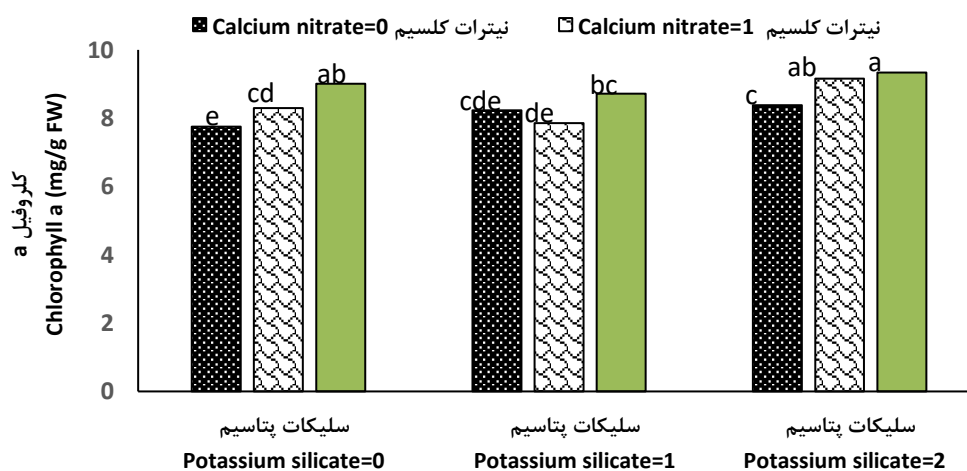
افزایش مصرف نیترات کلسیم با توجه به اینکه مقدار نیترات در گیاه افزایش می‌یابد می‌تواند سبب افزایش رشد رویشی گیاه و تعداد شاخه‌های جانبی شود. با توجه به اینکه

نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم مربوط به کارتنوئید بود. در مورد فلاونوئید تنها اثر ساده سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم معنی‌دار و اثر متقابل آن‌ها از تأثیر معنی‌داری برخوردار نبود (جدول ۴). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد استفاده از سیلیکات پتاسیم هر چند سبب افزایش مقدار فلاونوئید در برگ‌ها شد اما تفاوت معنی‌داری بین سطح دوم و سوم آنها مشاهده نشد. در مورد نیترات کلسیم هم استفاده از آن تا سطح دو کیلوگرم در هزار (سطح سوم) سبب افزایش مقدار فلاونوئید گردید مقدار آن ۵/۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر بود (جدول ۴).

کلسیم از طریق تأثیر بر آنزیم‌های فنیل آلانین آمیلاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز نقش خود را ایفا می‌کند، این آنزیم‌ها در سنتز و اکسیداسیون فنل‌ها و فلاونوئیدها نقش دارند (Ruiz et al., 2013). محققان اظهار داشتند که کمبود آب سبب کاهش مقادیر فلاونوئیدهای برگ گندم دوروم شد (Balouchi et al., 2008). محققین گزارش کردند بالا رفتن فعالیت‌های فتوسنتزی ناشی از افزایش محتوی کلروفیل در برگ‌ها می‌تواند به‌واسطه نقش پتاسیم در سنتز پیش ماده رنگدانه‌های کلروفیل (Kumar and Kumar, 2008) و همچنین به دلیل نقش پتاسیم در تثبیت دی‌اکسید کربن در کلروپلاست باشد (Kanai et al., 2007). محققان دیگر گزارش کردند محلول پاشی ۲۵ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم در گیاه چچم میزان کلروفیل را ۱۱/۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (Mir Abbasi Najaf Abadi et al., 2013).

نسبت به سایر رنگیزه‌ها کمتر بود. بطوری‌که بیشترین مقدار کلروفیل a به میزان ۹/۳۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر در دو کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بدست آمد که نسبت به سطح شاهد از افزایشی معادل ۱۷/۱ درصد برخوردار بود (شکل ۵). در مورد کلروفیل b، میزان افزایش تنها تا یک کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم و دو کیلوگرم در هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم (۳/۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) بود که از افزایشی معادل ۴۳/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم مصرف) که از کمترین مقدار (به میزان ۱/۸۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) برخوردار بود، مشاهده شد (شکل ۶). در مورد کارتنوئید هر چند بیشترین مقدار در تیمار دو کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم (۳/۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر) بدست آمد اما تفاوت معنی‌داری بین سطح دو کیلوگرم در هزار لیتر آب نیترات کلسیم و سطح یک کیلوگرم در هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم (۳/۲۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر) با سطح سوم آنها مشاهده نشد. کمترین مقدار (۱/۰۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر) آن در تیمار شاهد بدست آمد. میزان افزایش در سطح سوم دو تیمار نسبت به شاهد ۶۸/۴ درصد بود (شکل ۷). مقدار آنتوسیانین هم تحت تأثیر دو تیمار افزایش یافت اما این افزایش برای نیترات کلسیم تا سطح دو کیلوگرم در هزار لیتر آب و در مورد سیلیکات پتاسیم تا یک کیلوگرم در هزار لیتر آب بود. میزان افزایش آن نسبت به تیمار شاهد ۳۴/۵ درصد بود (شکل ۸).

در این آزمایش بیشترین افزایش در طی محلول‌پاشی



شکل ۵- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر میزان کلروفیل a در برگ

Figure 5- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on chlorophyll "a"

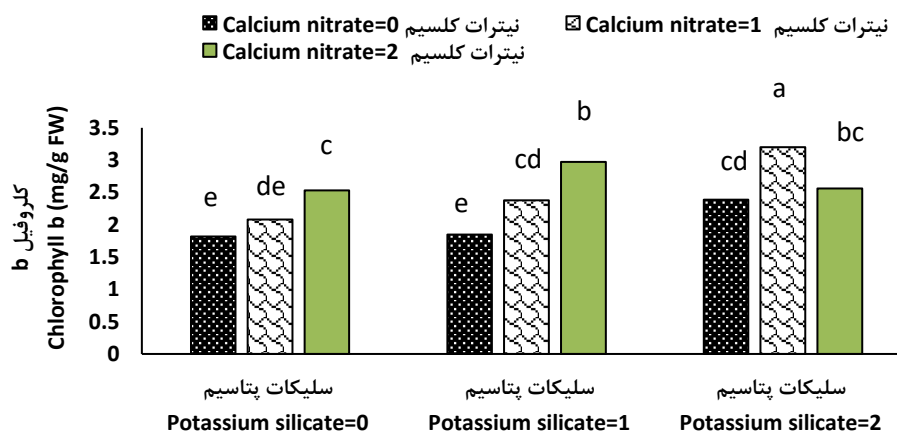
جدول ۵- تجزیه واریانس غلظت عناصر غذایی دانه و رنگدانه‌های فتوسنتزی گلرنگ تحت تأثیر سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم

Table 5- Variance analysis of photosynthesis pigments and nutrient elements in seed of safflower affected by potassium silicate and calcium nitrate

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات (MS)							
		نیتروژن Nitrogen	فسفر Phosphorus	پتاسیم Potassium	کلروفیل a Chlorophyll "a"	کلروفیل b Chlorophyll "b"	کارتنوئید Carotenoid	فلاونوئید Flavonoid	آنتوسیانین Anthocyanin
تکرار Block	2	0.002 ^{ns}	0.012 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.005 ^{ns}
سیلیکات پتاسیم Potassium silicate (KS)	2	0.67 [*]	0.37 ^{ns}	1.33 ^{**}	1.77 ^{**}	1.11 [*]	3.5 ^{**}	4.57 ^{**}	4.53 ^{**}
نیترات کلسیم Calcium nitrate (Ca N)	2	5.5 ^{**}	2.53 ^{ns}	119.9 ^{**}	1.32 ^{**}	0.73 [*]	4.56 ^{**}	1.5 [*]	0.4 [*]
KS*Ca N	4	0.165 [*]	0.065 ^{ns}	0.23 [*]	0.35 [*]	0.37 [*]	0.355 ^{**}	1.77 ^{ns}	0.313 [*]
خطا Error	16	0.036	0.036	0.036	0.086	0.057	0.041	0.089	0.102
C.V (%)		2.4	5.12	3.7	3.46	9.8	9.5	5.5	6.1

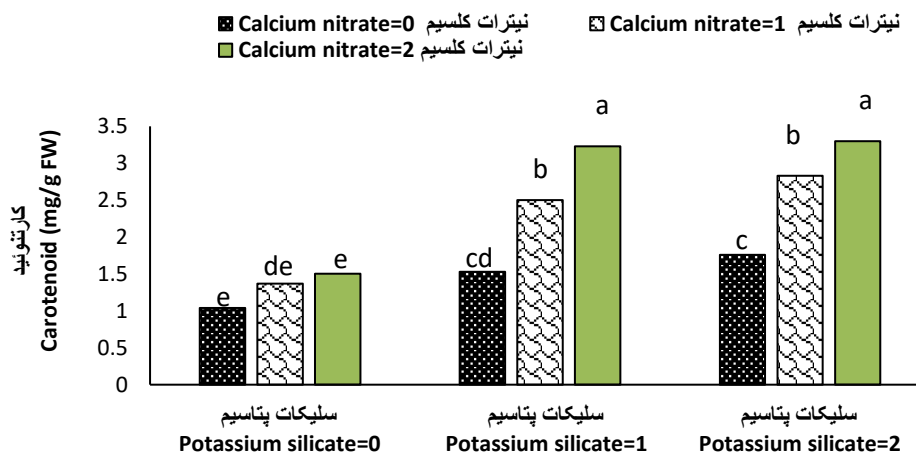
^{ns}, * و ** به ترتیب نشانگر عدم معنی داری، معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

ns :non significant, * and **: significant at $\alpha=0.05$ and $\alpha=0.01$ of probability levels, respectively



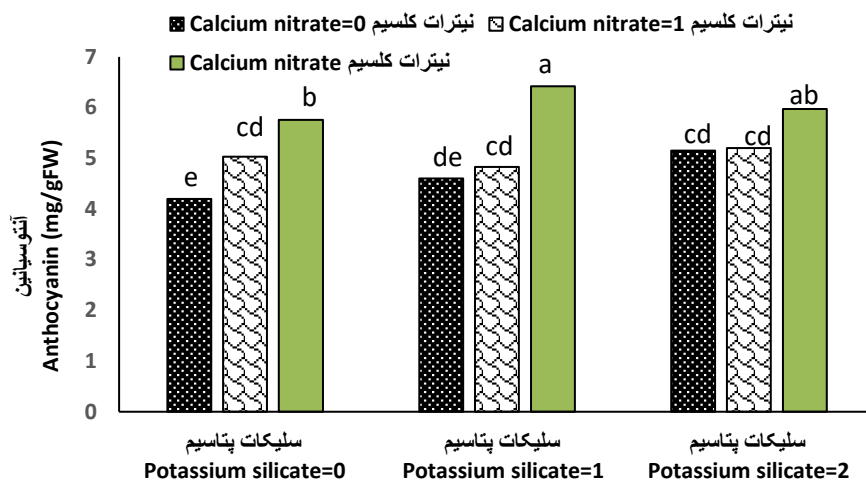
شکل ۶- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر میزان کلروفیل b در برگ

Figure 6- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on chlorophyll "b"



شکل ۷- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر میزان کارتنوئید در برگ

Figure 7- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on carotenoid



شکل ۸- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر میزان آنتوسیانین در برگ

Figure 8- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on anthocyanin

کرده و از زوال کلروفیل جلوگیری می‌کنند (*leng et al., 2000*). تشدید فعالیت آنزیم‌های کلروفیل‌از و پراکسیداز، تولید ترکیبات فنلی، افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و آسیب رساندن به غشاء کلروپلاست از مهمترین عوامل کاهنده غلظت کلروفیل در شرایط تنش‌ها به شمار می‌روند. در این زمان مطالعات نشان داده بر میزان کارتنوئید و آنتوسیانین در برگ‌های گیاهان افزوده می‌شود. افزایش این ترکیبات به واسطه نقش حفاظتی این رنگزه‌هاست که باعث محافظت از کلروفیل در برابر اکسیداسون نوری می‌شوند (*Inze and Montagu, 2019*)

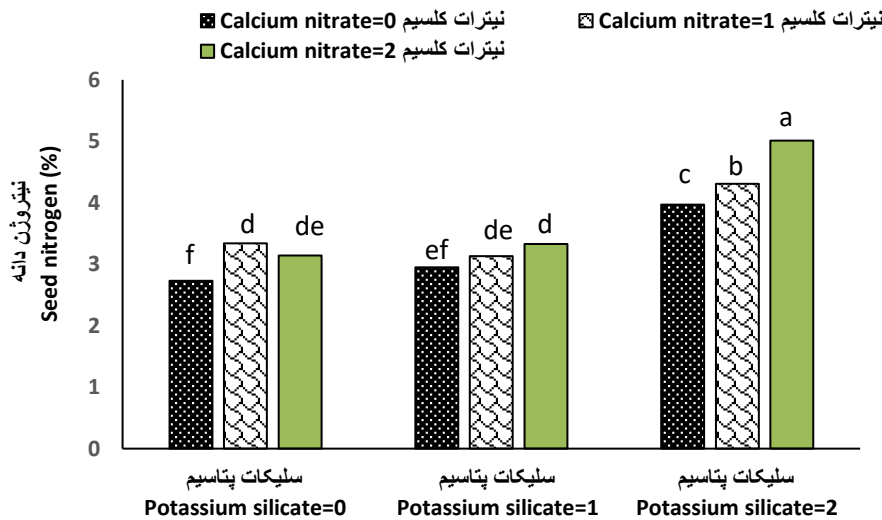
غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم دانه

نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد اثر متقابل سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم تأثیر معنی‌داری بر درصد نیتروژن و غلظت پتاسیم در دانه گلرنگ داشت. در این بین نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات ساده و اثرات متقابل سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم از تأثیر معنی‌داری بر غلظت فسفر دانه برخوردار نبود (جدول ۵). در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود غلظت دو عنصر نیتروژن و پتاسیم دانه همراه با محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم افزایش می‌یابد. در این بین با افزایش غلظت نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم از صفر به یک کیلوگرم در هزار لیتر آب، تغییری در غلظت نیتروژن مشاهده نشد و این دو از لحاظ آماری در یک سطح قرار گرفتند. با

کارتنوئیدها ترکیباتی هستند که در غشاء تیلاکوئیدهای کلروپلاست‌ها یافت می‌شوند و نقش مهمی در فرآیندهای گیاهی از جمله در شرایط دیم و کم‌آبی دارند. کارتنوئیدها در جذب نور در گیاهان نقش مهمی داشته، می‌توانند اعمال فیزیولوژیکی متفاوتی را در گیاه انجام دهند. این ترکیبات برای سیستم فتوسنتزی ضروری بوده و نقش اساسی در ممانعت از آسیب ناشی از اکسیداسیون نوری بازی می‌کنند. اهمیت کارتنوئیدها در رشد و تکامل گیاهان ثابت شده است (*Arango et al., 2010*). آنتوسیانین‌ها هم گروهی از فلاونوئیدهای محلول در آب هستند که بیشتر این ترکیبات در لایه‌های سطحی مزوفیل و اپیدرم برگ‌ها انباشته می‌شوند (*Ahmed et al., 2011*). اینها رنگزهای محافظ بوده که گیاه را در برابر تنش‌های محیطی محافظت می‌کنند. بررسی‌ها نشان داد که در شرایط مختلفی از جمله دیم و تنش خشکی می‌تواند نقش حفاظت نوری را در گیاه داشته و سبب حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن در طی تنش اکسیداتیو شوند (*Hatier and Gould, 2008*). محققین گزارش کردند استفاده از سیلیکات پتاسیم مقدار تولید آنتوسیانین در گیاهان افزایش می‌دهد (*Savvas and Ntatsi, 2015*). افزایش مقدار رنگدانه‌های غیر آنزیمی (آنتوسیانین) توسط کاربرد سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم می‌تواند از تخریب کلروفیل‌ها جلوگیری کند و به طور غیرمستقیم سبب افزایش آنها شود. چرا که آنتوسیانین‌ها از ساختارهای حساسی همانند غشاها حفاظت

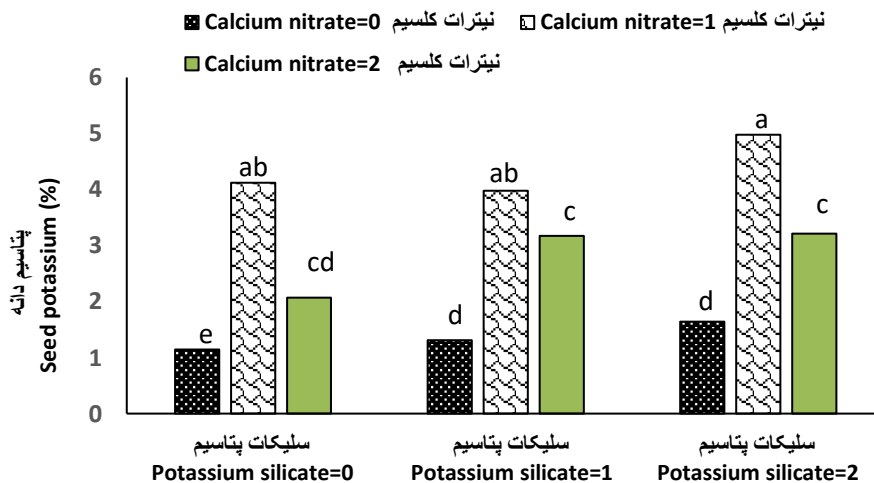
۲/۷ درصد حاصل شد. میزان افزایش برابر ۴۶/۱ درصد بود (شکل ۹). نیترات کلسیم حاوی مقادیر کافی کلسیم و نیتروژن است که نیاز گیاه برای زنده ماندن را تأمین می‌کند در نتیجه با افزایش مقدار نیترات کلسیم مقدار نیتروژن گیاه افزوده شده است.

افزایش غلظت نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم به دو کیلوگرم در هزار لیتر آب، غلظت نیتروژن دانه افزایش معنی‌داری یافت بطوری‌که بیشترین درصد نیتروژن دانه در سطح دو کیلوگرم در هزار لیتر آب سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم به میزان ۵/۰۱ درصد و کمترین آن در سطح شاهد (عدم مصرف) به میزان



شکل ۹- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر غلظت نیتروژن دانه

Figure 9- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on nitrogen in seed



شکل ۱۰- اثر متقابل نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم بر غلظت پتاسیم دانه

Figure 10- Interaction of calcium nitrate and potassium silicate on potassium in seed

نیز مشخص شد که بیشترین مقدار پتاسیم مربوط به سطح دو کیلوگرم در هزار لیتر سیلیکات پتاسیم و سطح یک کیلوگرم در هزار لیتر نیترات کلسیم به میزان ۴/۹۷ درصد بود. کمترین آن مربوط به تیمار شاهد (عدم استفاده از سیلیکات پتاسیم و

از طرفی آنیون نیترات به عنوان یون همراه پتاسیم جذب گیاه شده و با افزایش سیلیکات پتاسیم، غلظت نیتروژن در گیاه افزایش می‌یابد (Mei et al., 2001). همچنین در بررسی اثر متقابل سیلیکات پتاسیم و نیترات کلسیم در مورد پتاسیم دانه

بکاهد و مانع کاهش عملکرد تولیدی در این شرایط شود. براساس نتایج بدست آمده در این آزمایش می‌توان بیان کرد که نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم نقش مثبتی در گیاه گلرنگ و در شرایط دیم داشتند، بطوری‌که استفاده از این دو ترکیب سبب بهبود عملکرد دانه و اجزای عملکرد دانه (عملکرد بیولوژیکی، وزن هزار دانه، تعداد طبق در بوته و تعداد دانه در طبق) شد. این افزایش به سبب بهبود رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b، کارتنوئید و آنتوسیانین) بود. در این بین هر چند محلول پاشی ۲ کیلوگرم در هزار لیتر آب از نیترات کلسیم و سیلیکات پتاسیم در شرایط دیم مؤثر بود اما در بررسی صفات مختلف گلرنگ مشخص شد که استفاده از یک کیلوگرم سیلیکات پتاسیم و دو کیلوگرم نیترات کلسیم مناسب تر است. لذا برای گلرنگ (رقم اصفهانی) و در شرایط دیم محلول پاشی یک کیلوگرم سیلیکات پتاسیم و دو کیلوگرم نیترات کلسیم توصیه می‌شود.

نیترات کلسیم) به میزان ۱/۱۴ درصد بود. میزان افزایش درصد پتاسیم دانه برابر ۷۷/۱ درصد بود (شکل ۱۰). محققین گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی میزان پتاسیم جذب شده نسبت به شرایط معمول در گیاه افزایش می‌یابد. این افزایش کمک زیادی به تنظیم اسمزی و جذب بهتر آب در گیاه کرده، همچنین در تنظیم اسمزی برای کنترل باز و بسته شدن روزنه‌ها کمک می‌کند (Dastbandan Nejad et al., 2010). آنها همچنین بیان کردند که علت افزایش جذب پتاسیم تحت شرایط تنش خشکی را می‌توان به مکانیسم جذب فعال این یون به وسیله گیاه نسبت داد که بدین طریق مقاومت خود را در برابر تنش بالا می‌برد و در نهایت این امر می‌تواند به افزایش غلظت پتاسیم در دانه گیاهان هم کمک نماید.

نتیجه گیری کلی

استفاده از ترکیبات کمک کننده به گیاهان در شرایط کمی رطوبت می‌تولند تا حدی از بروز اثرات سوء کم آبی بر گیاهان

References

- Ahmadi, J., Seyfi, M.M. and Amini, M. 2012. Effect of spraying micronutrients Fe, Zn and Ca on grain and oil yield of sesame (*Sesamus indicum* L.) varieties. *Electronic Journal of Crop Production*, 5(3), pp.115-130. [In Persian].
- Ahmed, M., Hassen, F. and Khurshid, Y., 2011. Does silicon and irrigation have impact on drought tolerance mechanism of sorghum? *Agricultural Water Management*, 98, pp.1808-1812. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.003>
- Anjum, S.A., Xie, X.Y., Wang, L.C., Saleem, M.F., Man, C. and Lei, W., 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), pp.2026-2032. <https://doi.org/10.5897/ajar10.027>
- Anrist-Rangel, Y., 2008. Quantifying mineral source of potassium in agricultural soils. PhD Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, 105 p.
- Arango, J., Wust, F., Beyer, P. and Welsch, R., 2010. Characterization of phytoene synthases from cassava and their involvement in abiotic stress-mediated responses. *Planta*, 232, pp.1251-1262. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1250-6>
- Asadi, A., Haqqania, M., Lekzian, A. and Mafotun, M., 2013. The effect of different amounts of silicon and nitrogen on morphological characteristics, performance and yield components of two wheat cultivars. *Applied Field Crops Research*, 103(4), pp.66-78. [In Persian].
- Balouchi, H.R., Modarres Sanavy, S.A.M., Emam, Y. and Barzegar, M., 2008. Effect of Water Deficit, Ultraviolet Radiation and Carbon Dioxide Enrichment on flag Leaf Qualitative Characters of Durum Wheat (*Triticum*

- turgidum* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources*, 12(45), pp.167-181. [In Persian].
- Barker, A. and Pilbeam, D., 2007. *Plant nutrition*. CRC Press. USA. 2007, pp. 125- 128.
- Cottenie, A., 1980. Fractionation and determination of trace elements in plants, soils and sediments. In *27th International of Pure and Applied Chemistry* (pp. 45–53). <https://doi.org/10.1351/pac198052010045>
- Dastbandan Nejad, S., Saki Nejad, T. and Lack, S., 2010. Effect of drought stress and different levels of potassium fertilizer on K⁺ accumulation in corn. *Natural Sciences*, 8(5), pp.23-27.
- Dordas, D., 2009. Foliar application of calcium and magnesium improves growth, yield, and essential oil yield of oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*). *Industrial Crops and Products*, 29, pp.599-608. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.11.004>
- Flagella, Z., Rotunno, T., Tarantino, E., Dicatarina, R. and De Caro, A., 2002. Changes in seed yield and oil fatty acid composition of sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrid in relation to the sowing data and the water regime. *European Journal of Agronomy*, 17(3), pp.221-230. [https://doi.org/10.1016/s1161-0301\(02\)00012-6](https://doi.org/10.1016/s1161-0301(02)00012-6)
- Gitz, D.C., Liu, L. and McClure, J.W., 1998. Phenolic metabolism, growth and UV-B tolerance in phenylalanine ammonialyase-inhibited red cabbage seedlings. *Phytochem*, 49(2), pp.377-386. [https://doi.org/10.1016/s0031-9422\(98\)00011-9](https://doi.org/10.1016/s0031-9422(98)00011-9)
- Haghighi, M. and Pessaraki, M., 2013. Influence of silicon and nano -silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 161, pp.111-117. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.034>
- Hatier, J.B. and Gould, K.S., 2008. Foliar anthocyanins as modulators of stress signals. *Journal of Theoretical Biology*, 253, pp.625-627. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.04.018>
- Hussain, M.I., Lyra, D.A., Farooq, M., Nikoloudakis, N. and Khalid, N., 2016. Salt and drought stresses in safflower: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), No.4. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0344-8>
- Inze, D. and Montagu, M.V., 2019. Oxidative stress in plants. *Current Opinion in Biotechnology*, pp.153-158.
- Jamshidi, P., Baradaran Firoozabadi, M., Oloumi, H. and Naghavi, H., 2017. Evaluation of Foliar Spraying of Zinc and Calcium Fertilizers on Yield and Physiological Traits of Safflower under Lead Stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(2), pp.368-379. [In Persian].
- Kanai, S., Ohkura, K., Adu-Gyamfi, J., Mohapatra, P., Saneoka, H. and Fujita, K., 2007. Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress. *Journal of Experimental Botany*, 58(11), pp.2917-2928. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm149>
- Kaya, C., Tuna, L. and Higgs, D., 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown. Under water- stress condition. *Journal of Plant Nutrition*, 29(8), pp.1469-1480. <https://doi.org/10.1080/01904160600837238>

- Khayat Moghadam, M.S., Gholami, A., Shirani rad, A. H., Baradaran Firoozabadi, M. and Abbasdokht, H., 2021. The effect of potassium silicate and late-season drought stress on the physiological characters of canola. *Journal of Crops Improvement*, 23(4), pp.761-776. [In Persian].
- Krizek, D.T., Kramer, G.F., Upadhyaya, A. and Mirecki, R.M., 1993. UV-B Response of cucumber seedling grown under metal halide and high pressure sodium/deluxe lamps. *Plant Physiology*, 88, pp.350-358. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1993.tb05509.x>
- Kumar, A.R. and Kumar, M., 2008. Studies on the efficacy of sulphate of potash on physiological, yield and quality parameters of Banana cv. Robusta (Cavendish- AAA). *Asian Journal Biological of Science*, 2(12), pp.102-109.
- Leng, P., Itamura, H.B., Yamamura, H.B. and Deng, X, M., 2000. Anthocyanin accumulation in apple and peach shoots during cold acclimation. *Science Horticulture*, 83, pp.43-50. [https://doi.org/10.1016/s0304-4238\(99\)00065-5](https://doi.org/10.1016/s0304-4238(99)00065-5)
- Liu, Z., Rong, Q., Zhou, W. and Liang, G., 2017. Effects of inorganic and organic amendment on soil chemical properties, enzyme activities, microbial community and soil quality in yellow clayey soil. *Plos one*, 12, pp.3. e0172767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172767>
- Ma, J. F., Yamaji, N., Tamai, K. and Mitani, N., 2007. Genotypic difference in silicon uptake and expression of silicon transporter genes in rice. *Plant Physiology*, 145(3), pp.919-924. <https://doi.org/10.1104/pp.107.107599>
- Malekinejad, R. and Majidi, M., 2015. Association of seed yield, oil and related traits in safflower genotypes under normal and drought stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 13(1), pp.109-119. [In Persian].
- Mei, S.H., Lai, L.T. and Hui, X., 2001. Effects of potassium fertilizer on nutrient absorption and growth of tomato in the greenhouse. *China Vegetables, Institute of Vegetables and Flowers, Beijing, China*, 4, pp.14-16.
- Merajipour, M., Movahhedi Dehnavi, M., Dehdari, A., Farajee, H. and Meerajipour, M., 2013. Effect of drought stress on some physiological characteristics of four spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars in Yasouj. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 5(2), pp.125-134. [In Persian].
- Mir Abbasi Najaf Abadi, N., Nikbakht, A., Etemadi, N., & Sabz Alian, M., 2013. The effect of different concentrations of potassium silicate, nano silica and calcium chloride concentrations of potassium, calcium and magnesium, chlorophyll content index and the number of Asian Lilium flower varieties brunello. *Greenhouse Culture Science and Technology*, 4(14), pp.41-49. [In Persian].
- Mohammadi, K. and Sohrabi, Y., 2014. Effect of integrated methods of fertilization on soil nitrogen, phosphorus biological properties and canola traits. *Soil Research Journal*, 28, pp.27-38. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2014.120116>
- Payandeh, K.H., Mojdani, M. and Derogar, N., 2018. Application of micronutrient elements on quantitative and qualitative yield of rapeseed under drought tension conditions. *Crop Physiology*, 10(38), pp.23-37. [In Persian].
- Prochazka, S., Machaackova, I., Kreekule, J. and Sebanek, J., 1998. *Plant physiology*. Academia. Praha.

- Romero-Aranda, M.R., Jurado, O. and Cuartero, J., 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal Plant Physiology*, 163, pp.847–855. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.05.010>
- Ruiz, J.M., Rivero, R.M., Lo´pez-Cantarero, I. and Romero, L., 2013. Role of Ca²⁺ in the metabolism of phenolic compounds in tobacco leaves (*Nicotiana tabacum* L.). *Plant Growth Regulation*, 41, pp.173-177. <https://doi.org/10.1023/a:1027358423187>
- Savvas, D. and Ntatsi, G., 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, pp.66-81. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.010>
- Shahrokhnia, M.A. and Khadem Hamzeh, H.R., 2022. Investigation of the effect of drought stress on safflower cultivars and presentation of critical stress limits based on plant canopy temperature. *Iranian Water Research Journal*, 16(3), pp.1-12. [In Persian].
- Zuccarini, P., 2008. Effect of silicon on photosynthesis water relation and nutrition uptake of *phseolus vulgaris* under NaCl stress. *Biologia Plantarum*, 52, pp.157-160. <https://doi.org/10.1007/s10535-008-0034-3>

Multivariate analysis of new genotypes of durum wheat (*Triticum durum*) in full irrigation and terminal drought stress conditions

Rashin Taheri ^a, Zahra Khodarahmpour ^{*b}, Manoochehr Khodarahmi ^c, Mohammad Moradi ^b

^a Ph.D Student, Department of Genetics and Plant Breeding, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

^b Department of Production Engineering and Plant Genetics, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

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

*Corresponding Author: zahra.khodarahmpour@iau.ac.ir

Received: 7 October 2022 Accepted: 22 February 2023

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.364731.1279

How to cite this article:

Taheri, R., Khodarahmpour, Z., Khodarahmi, M. and Moradi, M., 2025. Multivariate analysis of new genotypes of durum wheat (*Triticum durum*) in full irrigation and terminal drought stress conditions. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 19-37. <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2025.364731.1279>

Abstract

Introduction: Simplifying the selection procedure to improve yield of new genotypes of wheat is necessary. Performance is a complex trait that is influenced by many factors, and usually due to its low heritability, direct selection for performance is not very effective, so it is better to use indirect selection to improve yield. By using some statistical methods, it is possible to obtain the relative share of each of the yield components in the yield amount.

Materials and Methods: In this study, in order to investigate traits relationship using multivariate analysis, 11 varieties and lines of durum wheat: Shotordandan, IDSN-2, IDYN-20, IDYN-35, IDYN-19, Karkheh, Behrang, Dena, Aria, Shabarang and Hana along with three varieties of bread wheat: Sirvan, Chamran 2 and Mehregan in two conditions of full irrigation and no irrigation after the pollination stage as factorial experiment in the form of randomized complete blocks design in four replications for two crop years 2016-2017 and 2017-2018 in the research farm of Islamic Azad University Ahvaz branch were evaluated. After data collection, the assumptions of variance analysis were established, including normality of errors using the Shapiro-Wilk test, independence of errors using the Durbin-Watson test, and uniformity of variance within treatments using the Bartlett test. After the composite analysis, separate variance analysis was performed for each year under full irrigation and end-of-season drought stress conditions separately for the traits using SAS ver 9.4 and META-R ver 3.4.1 software. Correlation coefficients between traits, stepwise regression analysis, path analysis and factor analysis of relationships between traits were examined and the genotypes were grouped using cluster analysis using the WARD method using standard data and Euclidean distance using SPSS ver 20 software.

Results and Discussion: Based on the results of composite analysis, the interaction effect of genotype and year was significant only for spike length trait. Results of the Pearson correlation coefficients between the studied traits under full irrigation conditions showed that economic yield had a positive



and significant correlation with the number of spikes per plant and harvest index, and in stress conditions, the correlation of grain yield with the number of spikes per plant, harvest index and 1000 seed weight was positive and significant. Based on the results of stepwise regression analysis for economic yield in full irrigation condition, plant height entered the model as the only effective variable and explained 69.7% of the grain yield changes. In stress condition, three variables, the number of grain.spike⁻¹, the number of plants and the 1000 grain weight were entered into the model respectively and explained 98.4% of the changes in economic yield. Factor analysis using principal component analysis showed that in full irrigation and stressful conditions, the first four factors were able to explain 88.2 and 88.7 percent of the data changes, respectively. The results of cluster analysis for grouping different genotypes in full irrigation and stress conditions created 3 groups. Under full irrigation conditions, the genotypes IDSN_2, IDYN20, IDYN35, IDYN19 and the varieties Karkheh, Behrang, Dena, Aria, Shebrang, Hana and Sirvan were in the first group and the varieties Chamran2 and Mehregan were in the second group. Under stress conditions, the genotype IDYN35 and the varieties Karkheh, Sirvan, Chamran2 and Mehregan were in the first group and the genotypes IDSN_2, IDYN20, IDYN19 and the cultivars Behrang, Dena, Aria, Shebrang and Hana were in the second group. In both conditions, the variety Sherdandan was alone in the third group.

Conclusion: According to the research conducted, the IDYN-19 line had a high yield in both full irrigation and stress conditions, and the IDYN-35 line also had a high tolerance to drought stress. It is suggested to use these lines in the breeding program, compatibility and stability of these lines should be investigated in the relevant tests.

Keywords: Cluster analysis, Factor analysis, Path analysis

تجزیه چند متغیره ژنوتیپ‌های جدید گندم دوروم (*Triticum durum* L.) در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهای فصل

راشبین طاهری^۱، زهرا خدارحم‌پور^{۲*}، منوچهر خدارحمی^۳، محمد مرادی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه ژنتیک و به‌نژادی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۳- موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

* مسئول مکاتبه: zahra.khodarahmpour@iau.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.364731.1279

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۵

چکیده

در این مطالعه جهت بررسی روابط صفات با استفاده از تجزیه‌های چند متغیره، ۱۱ رقم و لاین گندم دوروم شامل: شتردندان، IDSN-2، IDYN-20، IDYN-35، IDYN-19، کرخه، بهرنک، دنا، آریا، شیرنگ و هانا به همراه سه رقم گندم نان شامل: سیروان، چمران ۲ و مهرگان در دو شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری بعد از مرحله گرده افشانی بصورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار به مدت دو سال زراعی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج ضرایب همبستگی پیروسون بین صفات مورد مطالعه در شرایط آبیاری کامل نشان داد که عملکرد اقتصادی همبستگی مثبت و معنی‌داری با تعداد سنبله در بوته و شاخص برداشت و در شرایط تنش نیز همبستگی عملکرد دانه با تعداد سنبله در بوته، شاخص برداشت و وزن هزار دانه مثبت و معنی‌دار بود. بر اساس نتایج تجزیه رگرسیون گام به گام برای عملکرد اقتصادی در شرایط آبیاری کامل، ارتفاع بوته به عنوان تنها متغیر مؤثر وارد مدل شده و ۶۹/۷ درصد از تغییرات عملکرد دانه را توجیه کرد. در شرایط تنش، سه متغیر تعداد دانه در سنبله، تعداد بوته و وزن هزار دانه به ترتیب وارد مدل شدند و در مجموع ۹۸/۴ درصد از تغییرات عملکرد اقتصادی را توجیه کردند. تجزیه به عامل‌ها نشان داد در شرایط آبیاری کامل و تنش چهار عامل اول توانستند به ترتیب ۸۸/۲ و ۸۸/۷ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین کنند. نتایج تجزیه خوشه‌ای برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط آبیاری کامل و تنش باعث ایجاد ۳ گروه شد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به عامل‌ها، تجزیه خوشه‌ای، تجزیه علیت

مقدمه

دشت‌های بزرگ آمریکای شمالی، روسیه و قزاقستان است (Tidiane Sall et al., 2020). سطح زیر کشت این محصول در ایران در سال ۱۳۹۷، ۱۴۷ هزار هکتار گزارش شده است (Najafi Mirak et al., 2021). ارقام آریا، دنا، ساجی، آران، دهدشت و ثنا از جمله ارقام اصلاح شده گندم دوروم در ایران می‌باشند. این گیاه تنها گیاه تتراپلوئیدی است که ارزش تجاری بالایی دارد و در سطح وسیعی نیز کشت می‌شود. گندم دوروم با داشتن درصد بالایی پروتئین (۱۲-۱۴ درصد) در مقایسه با گندم نان (۱۰-۱۲ درصد) و برنج (۷ درصد) از جمله‌ی مهمترین مواد غذایی به شمار می‌رود (Martínez-Moreno et al., 2022).

تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد در سرتاسر جهان و گسترده‌ترین عامل محدودکننده تولید غلات به‌ویژه در مناطق خشک است (Wasaya et al., 2018). میزان

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی در سرتاسر جهان است که از لحاظ سطح زیر کشت و میزان تولید رتبه دوم را در بین گیاهان مختلف زراعی دارا می‌باشد (FAOSTAT, 2018). گندم ۳۰ درصد غلات تولیدی جهان را شامل می‌شود، درحالی‌که ۵۵ درصد کربوهیدرات و ۲۰ درصد کالری مصرفی جهان را تأمین می‌کند (Enghiad et al., 2017). گندم دوروم (*Triticum turgidum* var. *durum*) دومین گونه زراعی مهم گندم است که در دنیا در سطحی معادل ۱۷ میلیون هکتار کشت می‌شود (CIMMYT, 2019). میزان تولید آن در سال ۲۰۱۹، ۳۸/۱ میلیون تن گزارش شده است (Xynias et al., 2020). این محصول در حال حاضر حدود هشت درصد از کل گندم تولیدی دنیا را شامل شده و مناطق اصلی کشت آن در حوضه مدیترانه،

را توجیه کردند. عامل اول به عنوان عامل مؤثر بر خصوصیات برگ پرچم، عامل دوم عامل مؤثر بر ارتفاع و عامل سوم عامل مؤثر بر زیست‌توده نامگذاری شد (Heidarinezhad et al., 2018). در یک مطالعه که به منظور بررسی تنوع ژنتیکی ۱۴۱ رقم بومی گندم دوروم جمع‌آوری شده از مناطق مختلف اتیوپی همراه با ۱۹ رقم معرفی شده با استفاده از صفات آگرومورفولوژیکی انجام شد، نمونه‌ها براساس صفات اندازه‌گیری شده و با استفاده از داده‌های استاندارد شده در ۷ گروه دسته‌بندی شدند. گروه سوم دارای بیشترین مقدار برای وزن هزاردانه، شاخص برداشت، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک بود (Wondifaw et al., 2020).

معرفی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و پایدار و متحمل به خشکی یکی از اهداف مهم امروزی برای هماهنگی با افزایش جمعیت جهان است (Singh et al., 2019). بنابراین، گزینش ژنوتیپ‌های گندم دوروم متحمل به خشکی، ابزار کلیدی مفیدی است که توسط اصلاح‌گران غلات برای افزایش تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wang et al., 2018). اصلاح‌گران نبات در گذشته عملکرد گیاه را در شرایط تنش خشکی بهبود داده‌اند (Sehgal et al., 2018). اما پیشرفت‌های قبلی در بازده ژنتیکی عملکرد دانه به مقدار کافی نبوده است که پاسخگوی تقاضای نیاز غذایی جامعه ناشی از افزایش جمعیت جهان و تغییرات اقلیمی باشد. بنابراین این پژوهش با هدف مطالعه روابط بین صفات در دو شرایط و واکنش ارقام گندم دوروم و گندم نان (بعنوان شاهد) به تنش خشکی انتهای فصل با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه جهت بررسی روابط صفات با استفاده از تجزیه‌های چند متغیره، ۱۱ رقم و لاین گندم دوروم، شتردندان، IDSN-2، IDYN-20، IDYN-35، IDYN-19، کرخه، بهرنگ، دنا، آریا، شبرنگ و هانا به همراه سه رقم گندم نان، سیروان، چمران ۲ و مهرگان به عنوان شاهد در دو شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری بعد از مرحله گرده افشانی به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار به مدت دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز واقع

تأثیر تنش خشکی به شدت، زمان و طول دوره وقوع تنش بستگی دارد. به عنوان مثال کمبود آب در مراحل بحرانی رشد گندم مانند گلدهی و پرشدن دانه می‌تواند تا حد زیادی عملکرد و میزان تولید را تحت تأثیر قرار دهد (Richard et al., 2015). در برنامه‌های اصلاحی عملکرد دانه و اجزای آن به طور گسترده‌ای برای گزینش ارقام گندم دوروم متحمل به خشکی مورد استفاده قرار گرفته است (Mwadingeni et al., 2016). توجه و درک دقیق روابط داخلی صفات گوناگون و تعیین عامل‌های توجیه کننده خصوصیات مورد بررسی از ضروریات بوده، و از طرفی با توجه به ویژگی‌های تجزیه‌های آماری چند متغیره، جهت درک عمیق ساختار داده‌ها از تجزیه به عامل‌ها و کاهش متغیرها به تعداد کمی عامل بهره برده می‌شود. تجزیه به عامل‌ها به طور مؤثر برای درک روابط و ساختار اجزای عملکرد و صفات مورفولوژیکی گیاهان زراعی بکار گرفته می‌شود (Tosimojarad et al., 2005). تجزیه خوشه‌ای یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره است که جهت بررسی رابطه خویشاوندی مواد گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که ارقام گوناگون دارای تنوع زیادی از نظر صفات مختلف می‌باشند، لذا جهت انتخاب بهترین ارقام و ژنوتیپ‌ها علاوه بر استفاده از روش محاسبه همبستگی، از روش‌های مختلف آماری بهره برده می‌شود. تجزیه خوشه‌ای اصولی‌ترین روش برای برآورد شباهت افراد در یک مجموعه است (Farshadfar, 2005).

در پژوهشی با بررسی ۱۴۸ لاین اینبرد گندم نان به همراه والدین در دو شرایط آبیاری کامل و تنش کم آبی انتهای فصل گزارش کردند که بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی از لحاظ کلیه صفات مورد بررسی اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. عملکرد دانه با روز تا سنبله‌دهی، تخصیص مواد فتوسنتزی به ساقه و سنبله و میزان انتقال مجدد در هر دو شرایط همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد. بر اساس نتایج تجزیه کلاستر، ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط به چهار گروه دسته‌بندی شدند. در تجزیه به عامل‌ها، در هر دو شرایط چهار عامل وارد مدل شدند که در شرایط آبیاری کامل و تنش به ترتیب ۷۷/۸۵ و ۶۸/۷۶ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین نمودند (Hamzeh et al., 2019). در مطالعه ژنوتیپ گندم دوروم پنج عامل با داشتن ریشه‌های بزرگتر از یک معنی‌دار شده و ۸۴/۶۵ درصد از تغییرات داده‌ها

بدون در نظر گرفتن ریشک‌ها، برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها به عنوان ارتفاع بوته ثبت شد، طول سنبله (فاصله یقه سنبله اصلی (ابتدای سنبله) تا نوک آن، بدون در نظر گرفتن ریشک‌ها در ده ساقه برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها به عنوان طول سنبله منظور گردید)، طول پدانکل (برای اندازه‌گیری این صفت فاصله آخرین گره تا یقه سنبله در ساقه اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها به عنوان طول پدانکل لحاظ گردید)، طول میانگره (برای اندازه‌گیری این صفت فاصله بین برگ پرچم تا یقه سنبله اندازه‌گیری شد)، طول دانه (طول دانه با استفاده از کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد)، عرض دانه (عرض دانه از پهن‌ترین قسمت دانه با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد)، تعداد بوته (تعداد بوته در هر واحد آزمایشی شمارش گردید)، تعداد پنجه (برای اندازه‌گیری این صفت، تعداد پنجه بارور در هر بوته شمارش و ثبت گردید)، تعداد سنبله در بوته (تعداد سنبله در ده بوته شمارش و میانگین آن‌ها به عنوان تعداد سنبله در بوته ثبت گردید)، تعداد دانه در سنبله (جهت شمارش تعداد دانه در سنبله، پس از جداسازی دانه‌ها، تعداد دانه در هر یک از سنبله‌های اصلی شمارش و به عنوان تعداد دانه در سنبله اصلی ثبت گردید)، تعداد سنبلچه در سنبله (تعداد سنبلچه در هر سنبله شمارش و برای این صفت منظور گردید)، عملکرد دانه تک بوته (وزن دانه در ده بوته اندازه‌گیری و میانگین آنها به عنوان وزن دانه تک بوته برحسب گرم ثبت شد)، عملکرد بیولوژیک (وزن کل بخش هوایی هر واحد آزمایشی پس از برداشت با ترازو اندازه‌گیری شد و بر حسب تن در هکتار ثبت گردید)، عملکرد دانه (پس از برداشت و جدا کردن دانه از کاه وزن دانه برای هر واحد آزمایشی با دقت یک‌صدم توزین و برحسب تن در هکتار ثبت شد)، شاخص برداشت به صورت زیر محاسبه گردید (Donald and Hamblin, 1976; Hay, 1995):

$$(1) \quad \text{عملکرد دانه} = \frac{\text{عملکرد دانه}}{\text{عملکرد بیولوژیک}} \times 100 = \text{شاخص برداشت}$$

وزن هزاردانه (ابتدا هزار دانه از هر لاین شمارش و سپس توزین گردید)، انتقال مجدد (در چند مرحله از زمان گرده‌افشانی تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک ده ساقه اصلی به همراه سنبله جدا شده و جهت اندازه‌گیری انتقال مجدد توزین گردید). ماده خشک رسیدگی (بدون دانه)-ماده خشک

در ویس (با مختصات جغرافیایی $48^{\circ}21' E$ و $31^{\circ}30' N$)، مورد ارزیابی قرار گرفت. عملیات کاشت بعد از انجام شخم و دیسک‌زنی در هفته‌ی آخر آبان (فاصله‌ی زمانی ۲۵ آبان ماه تا ۳۰ آبان ماه) بصورتیکه در هر کرت چهار خط کاشت به طول هر کدام دو متر، فاصله دو بوته روی خط کاشت ۲۰ سانتی‌متر و فاصله خطوط ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، صورت گرفت. خاک محل آزمایش دارای بافت رسی-لومی با میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب به ترتیب $5/3$ ppm، 7 و 220 در لایه صفر تا 30 سانتی‌متری خاک بود. مقدار مواد آلی در لایه‌های صفر تا 30 سانتی‌متر و 30 تا 60 سانتی‌متر به ترتیب $0/76$ و $0/52$ درصد ارزیابی شد. محل انجام آزمایش دارای اقلیم گرم و خشک با زمستان‌های معتدل و تابستان‌های گرم است. متوسط دما در فصل رشد گیاه، میانگین، حداکثر و حداقل آن به ترتیب 21 ، $26/8$ و 15 درجه سانتی‌گراد بود. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت بذر صورت گرفت، آبیاری مزرعه با توجه به نیاز مزرعه در هر دو شرایط بصورت یکسان و همزمان انجام گرفت. در زمان گرده‌افشانی آبیاری در شرایط تنش خشکی انتهای فصل قطع شد، در قسمت آبیاری کامل آزمایش تا زمان رسیدگی، آبیاری‌های لازم انجام شد. جهت کودپاشی از 150 کیلوگرم در هکتار کود اوره، مقدار 100 کیلوگرم در هکتار کود فسفات آمونیوم و 100 کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم در هنگام کاشت و 100 کیلوگرم در هکتار کود اوره به عنوان کود سرک در ابتدای شروع مرحله طویل شدن ساقه استفاده گردید. آبیاری به روش نشتی شامل دو نوبت در پاییز با توجه به میزان بارندگی‌های پاییزه و پنج نوبت آبیاری در بهار بسته به شرایط آب و هوایی انجام شد. مبارزه با علف‌های هرز پهن برگ با علف‌کش گران‌استار به میزان 20 گرم در هکتار و مبارزه با علف‌های هرز باریک برگ با علف‌کش پوما سوپر به میزان $1/2$ لیتر در هکتار در مرحله پنجه زنی تا شروع ساقه رفتن انجام شد.

در این تحقیق صفات مورفوفیزیولوژیک و فنولوژیک اندازه‌گیری شدند:

الف- صفات مورفوفیزیولوژیک، در طول فصل کاشت و بعد از برداشت ده ساقه انتخاب و اندازه‌گیری صفات روی آن‌ها انجام شد، سپس میانگین ده عدد برای هر صفت ثبت گردید. این صفات شامل: ارتفاع بوته (فاصله سطح خاک تا نوک سنبله،

صفات می‌باشد. بین سال‌ها از لحاظ سایر صفات اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. بین شرایط آبیاری کامل و تنش، از لحاظ صفات تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک و اقتصادی، طول و عرض دانه، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت. اختلاف بین شرایط آبیاری کامل و تنش از لحاظ صفات شاخص برداشت و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. از لحاظ سایر صفات اختلاف معنی‌داری بین شرایط آبیاری کامل و تنش وجود نداشت. اثر متقابل سال و شرایط آبیاری تنها برای صفات انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد معنی‌دار بود که نشان می‌دهد اختلاف شرایط آبیاری تنها برای این دو صفت از سالی به سال دیگر متفاوت بوده است.

بین ژنوتیپ‌ها از لحاظ تمام صفات اندازه‌گیری شده بجز تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه اختلاف بسیار معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت. اثر متقابل ژنوتیپ و سال برای کلیه صفات غیر معنی‌دار بود معنی‌دار شدن اثر متقابل ژنوتیپ و شرایط آبیاری برای صفات تعداد دانه در سنبله، وزن هزاردانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد اقتصادی، شاخص برداشت، طول و عرض دانه، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد در سطح احتمال یک درصد و برای روز تا گرده‌افشانی در سطح احتمال پنج درصد بیانگر واکنش متفاوت ژنوتیپ‌های مورد بررسی در شرایط آبیاری کامل و تنش بود. لذا باید ارقام برای این صفات در شرایط آبیاری کامل و تنش به طور جداگانه انتخاب شوند. برای سایر صفات ژنوتیپ‌ها واکنش یکسانی در شرایط آبیاری کامل و تنش داشتند. اثر متقابل ژنوتیپ و سال و شرایط آبیاری برای هیچ یک از صفات مورد بررسی معنی‌دار نشد.

ضرایب همبستگی ساده بین صفات

بررسی ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات مورد مطالعه در شرایط آبیاری کامل (جدول ۲) نشان داد که عملکرد اقتصادی همبستگی مثبت و معنی‌داری با تعداد سنبله در بوته و شاخص برداشت و همبستگی منفی و معنی‌دار با ارتفاع بوته، طول سنبله، تعداد سنبله‌چه در سنبله، طول پدانکل، طول میانگره، طول دانه، عرض دانه، روز تا گرده‌افشانی و روز تا

گرده‌افشانی=میزان انتقال مجدد

کارایی انتقال مجدد از طریق رابطه زیر محاسبه گردید (Cox et al., 1990; Papakosta and Gayians, 1991):

$$(۲) \quad \text{کارایی انتقال مجدد} = \frac{\text{ماده خشک انتقال یافته}}{\text{ماده خشک گرده‌افشانی}} \times 100$$

ب- صفات فنولوژیک شامل: تعداد روز تا ظهور سنبله، تعداد روز تا گرده افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک.

تعداد روز تا ظهور سنبله (فاصله زمانی بین کاشت تا ظهور سنبله در ۵۰ درصد بوته‌های هر یک از واحدهای آزمایشی ثبت شد). تعداد روز تا گرده‌افشانی (فاصله زمانی بین کاشت تا گرده‌افشانی ۵۰ درصد سنبله‌های واحدهای آزمایشی یادداشت شد). تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک (فاصله زمانی بین کاشت تا زمان زرد شدن کامل ۵۰ درصد سنبله‌ها در هر یک از واحدهای آزمایشی به عنوان صفت روز تا رسیدگی فیزیولوژیک ثبت شد).

پس از جمع‌آوری داده‌ها ابتدا برقراری فرضیات تجزیه واریانس شامل نرمال بودن خطاها توسط آزمون شاپیرو-ویلک، مستقل بودن خطاها به وسیله آزمون دوربین-واتسون و یکنواختی واریانس درون تیماری به کمک آزمون پارتلت مورد بررسی قرار گرفت. بعد از تجزیه مرکب، تجزیه واریانس جداگانه برای هر سال در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهایی فصل به صورت جداگانه برای صفات با استفاده از نرم‌افزارهای ver 9.4 SAS و ver 3.4.1. META-R انجام گرفت. ضرایب همبستگی بین صفات، تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام، تجزیه علیت و تجزیه عاملی روابط بین صفات مورد بررسی قرار گرفت و ژنوتیپ‌ها با استفاده از تجزیه خوشه‌ای به روش WARD با استفاده از داده‌های استاندارد و فاصله اقلیدسی با استفاده از نرم‌افزار ver 20. SPSS گروه‌بندی شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب

بر اساس نتایج حاصل (جدول ۱) اختلاف بین سال‌ها تنها برای صفات ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و انتقال مجدد و صفات فنولوژیک شامل: تعداد روز تا ظهور سنبله، روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک معنی‌دار بود که نشان دهنده اختلاف بین سال‌ها از نظر این

معنی‌داری بین عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، وزن دانه در سنبله، شاخص برداشت و تراکم سنبله گندم تحت رژیم‌های مختلف تنش رطوبتی مشاهده شد (Kirigwi, 2004). همبستگی معنی‌دار بین وزن دانه در سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن هزاردانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت نشان‌دهنده سهم مهم این صفات در عملکرد دانه است. همچنین همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عملکرد با تعداد سنبله و وزن هزاردانه توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (Dayem et al., 2021; Maurya et al., 2020).

تجزیه رگرسیون و تجزیه علیت صفات

بر اساس نتایج تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام (جدول ۳) برای عملکرد اقتصادی در شرایط آبیاری کامل، ارتفاع بوته به عنوان تنها متغیر مؤثر وارد مدل شده و ۶۹/۷ درصد از تغییرات عملکرد دانه را توجیه کرد. به این ترتیب ارتفاع بوته به عنوان مهم‌ترین صفت تعیین‌کننده عملکرد در شرایط آبیاری کامل تعیین شد. این صفت دارای همبستگی منفی و معنی‌داری با عملکرد دانه ($r = -0.849$) بود. وارد نشدن اجزای عملکرد به مدل رگرسیونی دلیل بر عدم تاثیر آن‌ها نیست و شاید صفات مورد بحث دارای روابط غیر خطی با عملکرد باشند و به این دلیل در مدل قرار نگرفتند. لازم به ذکر است که ضریب ارتفاع در معادله رگرسیونی منفی بود که نشان‌دهنده رابطه معکوس این صفت با عملکرد اقتصادی می‌باشد.

نتایج تجزیه رگرسیون در شرایط تنش (جدول ۴) نشان داد که سه متغیر تعداد دانه در سنبله، تعداد بوته و وزن هزار دانه به ترتیب وارد مدل شدند و در مجموع ۹۸/۴ درصد از تغییرات عملکرد اقتصادی را توجیه کردند. در میان این صفات نخستین متغیری که وارد مدل شد تعداد دانه در سنبله بود که ۸۵ درصد از تغییرات عملکرد را توجیه کرد. در مرحله بعد صفت تعداد بوته به مدل اضافه شد و درصد توجیه تغییرات عملکرد با این دو صفت به ۹۴ درصد رسید و حضور وزن هزاردانه در مدل درصد توجیه آن را به ترتیب به ۹۸/۴ درصد افزایش داد. به این ترتیب صفات تعداد دانه در سنبله، تعداد بوته و وزن هزار دانه به عنوان مهم‌ترین صفات تعیین‌کننده عملکرد اقتصادی در شرایط تنش تعیین شدند.

رسیدگی فیزیولوژیک داشت و با سایر صفات همبستگی معنی‌داری نداشت. در شرایط تنش نیز همبستگی عملکرد دانه با تعداد سنبله در بوته، شاخص برداشت و وزن هزاردانه مثبت و معنی‌دار و همبستگی عملکرد اقتصادی با ارتفاع بوته، طول سنبله، تعداد سنبله در سنبله، طول پدانکل، طول میانگره، طول دانه، عرض دانه، روز تا ظهور سنبله، روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک منفی و معنی‌دار بود (جدول ۲).

همبستگی مثبت عملکرد اقتصادی با تعداد سنبله در بوته، شاخص برداشت و وزن هزار دانه نشان‌دهنده تاثیر اجزای عملکرد بر عملکرد اقتصادی می‌باشد، به عبارت دیگر با افزایش اجزای عملکرد، عملکرد اقتصادی نیز افزایش می‌یابد.

می‌توان چنین استنباط نمود که ژنوتیپ‌هایی که تعداد سنبله، وزن هزاردانه و شاخص برداشت بیشتری دارند، دارای عملکرد بالاتری می‌باشند. همچنین این مطلب نشان‌دهنده این موضوع است که این ژنوتیپ‌ها توانسته‌اند حداکثر استفاده از منابع موجود را برده و در نتیجه تعداد سنبله، وزن هزاردانه و شاخص برداشت بیشتری را تولید نمایند.

در شرایط آزمایش حاضر افزایش طول دوره رشد سبب بروز تنش در گیاه و کاهش عملکرد اقتصادی شده است (همبستگی منفی و معنی‌دار صفات فنولوژیک با عملکرد اقتصادی به ویژه در شرایط تنش که تنش طبیعی پایان فصل، تنش اعمال شده را شدت بخشیده است). همبستگی بالای صفات فنولوژیک با یکدیگر و همبستگی منفی آن‌ها با عملکرد اقتصادی نشان‌دهنده اهمیت زودرسی و فرار از تنش می‌باشد. به عبارت دیگر، هرچه تعداد روز تا ظهور سنبله، گرده‌افشانی و رسیدگی کوتاه‌تر باشد و گیاه از شرایط خشک‌تر انتهای فصل فرار کند، کاهش عملکرد کمتری خواهد داشت. این موضوع می‌تواند راهکار مناسبی جهت اصلاح برای شرایط تنش باشد. در پژوهشی همبستگی منفی صفات فنولوژیک با عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های گندم دوروم گزارش شده است. همچنین میزان همبستگی در شرایط تنش شدیدتر از شرایط غیر تنش بوده، که احتمالاً دلالت بر تأثیر بیشتر این مراحل در عملکرد دانه از طریق مکانیسم‌های فرار از خشکی می‌باشد (Golabadi et al., 2018). همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد دانه با شاخص برداشت به ویژه در شرایط تنش خشکی در ژنوتیپ‌های گندم دوروم گزارش شده است (Pour-Aboughadareh et al., 2020). همبستگی

جدول ۱- تجزیه واریانس مرکب میانگین مربعات صفات مختلف زنوتیپ‌های گندم دوروم تحت شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهایی فصل در دو سال زراعی

Table 1- Composite variance analysis of mean squares of different traits of durum wheat genotypes under full irrigation and terminal drought stress conditions in two crop years

منابع تغییر	درجه آزادی	تعداد بوته	ارتفاع بوته	طول سنبله	تعداد سنبلچه در سنبله	تعداد دانه در سنبله	وزن هزار دانه	عملکرد بیولوژیک	عملکرد اقتصادی	شاخص برداشت
Source of variance	Degree of freedom	No. plant	Plant height	Spike length	Spiklet/spike ⁻¹	Grain. spike ⁻¹	1000 grain weight	Biological yield	Economical yield	Harvest index
سال	1	1.7 ^{ns}	905 ^{**}	0.004 ^{ns}	0.14 ^{ns}	24.9 ^{**}	17.8 ^{**}	0.022 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.24 ^{ns}
Year										
تنش	1	250 ^{ns}	729 ^{ns}	0.27 ^{ns}	4.5 ^{ns}	2298 ^{**}	6256 ^{**}	2988626117 ^{**}	303766.36 ^{**}	755 [*]
Stress										
سال × تنش	1	22 ^{ns}	15 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.61 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.32 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.22 ^{ns}
Year×Stress										
تکرار (سال × تنش)	8	518	62.5	0.04	0.985	0.81	0.45	5472	48	0.53
Replication (Year×Stress)										
ژنوتیپ	13	31492 ^{**}	939 ^{**}	22.9 ^{**}	58.02 ^{**}	121 ^{ns}	60.2 ^{ns}	2841525 ^{**}	1120351 ^{**}	605 ^{**}
Genotype										
ژنوتیپ × سال	13	11.5 ^{ns}	8.4 ^{ns}	0.009 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.54 ^{ns}	0.08 ^{ns}	2199 ^{ns}	381 ^{ns}	0.34 ^{ns}
Genotype×Year										
ژنوتیپ × تنش	13	781 ^{ns}	3.1 ^{ns}	0.096 ^{ns}	0.08 ^{ns}	48.5 ^{**}	22.4 ^{**}	2831375 ^{**}	1115785 ^{**}	36 ^{**}
Genotype×Stress										
ژنوتیپ × سال × تنش	13	15 ^{ns}	2.9 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.53 ^{ns}	0.07 ^{ns}	2191 ^{ns}	381 ^{ns}	0.42 ^{ns}
Genotype×Year×Stress										
خطای آزمایشی	104	510	12.7	0.07	0.30	0.77	1.2	3434	501	0.44
Experimental error										
ضریب تغییرات	-	7.4	4.3	3.8	3.35	2.2	3.3	1.4	1.7	1.9
Coefficient of variation										
منابع تغییر	درجه آزادی	طول پدانکل	طول میانگره	عرض دانه	طول دانه	انتقال مجدد	کارایی انتقال مجدد	روز تا ظهور سنبله	روز تا گرده‌افشانی	روز تا رسیدگی
Source of variance	Degree of freedom	Peduncle length	Internode length	Grain width	Grain length	Retransmit	Retransmission efficiency	Day to heading	Day to pollination	Day to maturity
سال	1	0.2 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.00001 ^{ns}	10.4 ^{**}	6.7 ^{ns}	424 ^{**}	372 ^{**}	301 ^{**}
Year										
تنش	1	7.4 ^{ns}	1.5 ^{ns}	7.21 ^{**}	0.16 ^{**}	20026.4 ^{**}	27828 ^{**}	3.7 ^{ns}	3.4 ^{ns}	3411 [*]
Stress										
سال × تنش	1	0.17 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.00002 ^{ns}	3.5 ^{**}	3.9 ^{**}	11 ^{ns}	5 ^{ns}	2 ^{ns}
Year×Stress										
تکرار (سال × تنش)	8	1.7	7.5	0.07	0.001	0.3	0.02	17	19.5	17
Replication (Year×Stress)										
ژنوتیپ	13	330 ^{**}	21 ^{**}	0.006 ^{**}	0.05 ^{**}	53.5 ^{**}	36.3 ^{**}	155.5 ^{**}	283.7 ^{**}	505 ^{**}
Genotype										
ژنوتیپ × سال	13	0.02 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.00003 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	2 ^{ns}	1.4 ^{ns}	2.3 ^{ns}
Genotype×Year										
ژنوتیپ × تنش	13	0.12 ^{ns}	0.024 ^{ns}	0.09 ^{**}	0.002 ^{**}	43.5 ^{**}	29.8 ^{**}	8.6 ^{ns}	8.5 [*]	13.3 ^{ns}
Genotype×Stress										
ژنوتیپ × سال × تنش	13	0.21 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.00008 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	1.4 ^{ns}	2.9 ^{ns}	1.8 ^{ns}
Genotype×Year×Stress										
خطای آزمایشی	104	0.7	1.8	0.03	0.0003	0.3	0.19	3.7	2.1	3.8
Experimental error										
ضریب تغییرات	-	2.3	9.5	8.7	2.7	2.3	2.4	1.9	1.4	1.5
Coefficient of variation										

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱.

ns, * and ** Not significant and significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

جدول ۲- ضرایب همبستگی صفات مختلف در ژنوتیپ‌های گندم دوروم در شرایط آبیاری کامل (پایین قطر) و تنش خشکی انتهایی فصل (بالای قطر)

Table 2- Coefficients of correlation of of different traits in durum wheat genotypes in full irrigation (bottom diameter) and terminal drought stress (above diameter) conditions

صفات Traits	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	-	-0.683**	-0.403	-0.722**	0.033	0.342	-0.02	0.845**	0.799**	-0.672**	-0.346	-0.52	-0.801**	0.214	0.096	-0.713**	-0.690**	-0.699**
2	-0.635**	-	0.785**	0.935**	-0.199	-0.635	0.138	-0.790**	-0.824**	0.844**	0.727**	0.614*	0.827**	-0.234	-0.271	0.739**	0.826**	0.735**
3	-0.358	0.80**	-	0.789**	-0.212	-0.78	0.154	-0.625**	-0.679**	0.513	0.774**	0.268	0.485	-0.507	-0.468	0.408	0.622*	0.351
4	-0.692**	0.935**	0.784**	-	-0.15	-0.606	0.094	-0.786**	-0.795**	0.870**	0.740**	-0.719**	0.825**	-0.237	-0.202	0.820**	0.871**	0.760**
5	-0.007	-0.157	-0.019	0.102	-	-0.042	0.197	0.456	0.335	-0.204	-0.259	-0.308	-0.287	-0.076	-0.064	0.115	-0.096	-0.021
6	-0.098	-0.227	-0.492	0.276	-0.450	-	0.22	0.547	0.381	-0.496	-0.688**	-0.075	-0.415	0.619*	0.798**	-0.452	-0.693**	-0.473
7	0.229	-0.046	0.063	-0.017	0.241	0.131	-	0.181	-0.379	-0.177	-0.112	-0.171	-0.163	-0.061	0.152	-0.232	-0.313	-0.358
8	0.699**	-0.849**	-0.80**	-0.839**	0.137	0.428	0.309	-	0.84**	-0.77	-0.610*	-0.556**	-0.865**	0.305	0.289	-0.628*	-0.765**	-0.692**
9	0.576*	-0.844**	-0.858**	-0.854**	0.021	0.346	-0.255	0.84**	-	-0.630*	0.521	-0.444	-0.729**	0.293	0.163	-0.466	-0.545*	-0.453
10	-0.719**	0.818**	0.520	0.891**	0.184	-0.009	-0.183	-0.651*	-0.572*	-	0.635*	0.822**	0.891**	-0.1	-0.165	0.892**	0.879**	0.921**
11	-0.321	0.719**	0.749**	0.732**	-0.118	-0.394	-0.241	-0.672**	-0.557*	0.623	-	0.387	0.493	-0.185	-0.251	0.495	0.693**	0.476
12	-0.777**	0.754**	0.510	0.768**	0.090	-0.157	-0.260	-0.706**	-0.566*	0.823**	0.445	-	0.744**	0.172	0.226	0.805**	0.697**	0.790**
13	-0.716**	0.773**	0.555*	0.844**	-0.252	0.116	-0.145	-0.608*	-0.558*	0.915**	0.555*	0.719**	-	-0.031	-0.083	0.825**	0.843**	0.868**
14	-0.192	-0.250	-0.333	-0.262	-0.255	0.776**	0.185	0.293	0.188	-0.053	-0.339	-0.199	0.015	-	0.853**	-0.014	-0.209	-0.046
15	-0.210	-0.229	-0.249	-0.213	-0.197	0.678	0.118	0.224	0.150	-0.009	-0.286	-0.160	0.048	0.970**	-	-0.058	-0.29	-0.144
16	-0.762**	-0.658*	0.256	0.750**	-0.157	0.145	-0.206	-0.526	-0.432	0.920**	0.316	0.761**	0.849**	0.062	0.100	-	-0.058	-0.29
17	-0.739**	0.892**	0.633*	0.935**	-0.226	-0.141	-0.258	-0.82**	-0.704**	0.922**	0.626*	0.797**	0.885**	-0.212	-0.145	0.860**	-	0.924**
18	-0.767**	0.818**	0.453	0.826**	-0.224	-0.026	-0.408	-0.732**	-0.527	0.906**	0.564*	0.808**	0.841**	-0.135	-0.083	0.876**	0.957**	-

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

* and ** significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

۱= تعداد بوته No. plant، ۲= ارتفاع بوته Plant height، ۳= طول سنبله Spike lenght، ۴= تعداد سنبلچه در سنبله Spikelet، ۵= تعداد دانه در سنبله Grain، ۶= وزن هزاردانه 1000 grain weight، ۷= عملکرد بیولوژیک Biological yield، ۸= عملکرد اقتصادی Economical yield، ۹= شاخص برداشت Harvest index، ۱۰= طول پدانکل Peduncle lenght، ۱۱= طول میانگره Internode lenght، ۱۲= عرض دانه Grain width، ۱۳= طول دانه Grain lenght، ۱۴= انتقال مجدد Retransmit، ۱۵= کارایی انتقال مجدد Retransmission efficiency، ۱۶= روز تا ظهور سنبله Day to heading، ۱۷= روز تا گرده‌افشانی Day to pollination، ۱۸= روز تا رسیدگی Day to maturity

جدول ۳- ضرایب رگرسیون صفات مؤثر بر عملکرد اقتصادی ژنوتیپ‌های گندم دوروم بر اساس مدل رگرسیونی گام‌به‌گام در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهایی فصل

Table 3- Regression coefficients of traits affecting the economic yield of durum wheat genotypes based on the stepwise regression model in full irrigation and terminal drought stress conditions

شرایط Condition	متغیر Variable	ضریب رگرسیون Regression coefficient	ضریب رگرسیون استاندارد شده Standardized regression coefficient	ضریب تبیین مرحله‌ای Stepwise determination coefficient	ضریب تبیین تجمعی Cumulative determination coefficient
آبیاری کامل Full irrigation	ارتفاع بوته Plant height	-0.080	0.849**	0.697	0.697
	عرض از مبدأ Intercept	11.135			
تنش خشکی انتهایی فصل Terminal drought stress	تعداد دانه در سنبله Grain. Spike ⁻¹	0.069	0.446**	0.85	0.85
	تعداد بوته No. plant	0.009	0.722**	0.09	0.94
	وزن هزاردانه 1000 grain weight	0.098	0.319**	0.044	0.984
	عرض از مبدأ Intercept	-5.334			

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

** Significant at 0.01 probability level

صفات در معادله رگرسیونی مثبت بود که نشان دهنده رابطه مستقیم این صفات با عملکرد اقتصادی می‌باشد. جهت تفسیر بهتر نتایج رگرسیون گام به گام، تجزیه علیت انجام شد. نتایج حاصل از تجزیه علیت (جدول ۴) نشان داد که هر سه صفت تعداد دانه در سنبله، تعداد بوته و وزن هزار دانه اثر مستقیم مثبت بر عملکرد اقتصادی داشتند که بیشترین اثر مستقیم مربوط به اثر مستقیم تعداد بوته بر عملکرد اقتصادی (۰/۷۲۲) بود، به همین دلیل گزینش بر مبنای این صفت در جهت افزایش عملکرد مفید خواهد بود.

در شرایط تنش تعداد بوته دارای همبستگی مثبت و بالایی با عملکرد اقتصادی ($r=0/845$) بود و همبستگی تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه با عملکرد اقتصادی نیز مثبت و معنی‌دار (به ترتیب $r=0/456$ و $r=0/547$) بود. این صفات که مهم‌ترین اجزای عملکرد دانه نیز می‌باشند، می‌توانند به عنوان صفات اصلی تعیین کننده عملکرد دانه در نظر گرفته شوند، بنابراین گزینش این صفات در صورتی که رقم مناسب برای آن‌ها وجود داشته باشد که پس از تلاقی در بین زاده‌های آن برای تعیین بهترین نتاج، جستجو و غربالگری کرد، می‌تواند افزایش عملکرد و تولید ارقام دارای عملکرد بالا را در پی داشته باشد. ضرایب

جدول ۴- نتایج تجزیه علیت عملکرد اقتصادی ژنوتیپ‌های گندم دوروم با صفات وارد شده به مدل بر اساس رگرسیون گام به گام در شرایط تنش خشکی انتهای فصل

Table 4- Results of path analysis of economical yield of durum wheat genotypes with traits entered to model based stepwise regression at the terminal drought stress conditions

صفات مانده در مدل Traits remaining in the model	اثر مستقیم Direct effect	اثر غیرمستقیم از طریق Indirect effect through			ضریب همبستگی با عملکرد اقتصادی Correlation coefficient with economical yield
		تعداد دانه در سنبله	تعداد بوته	وزن هزار دانه	
تعداد دانه در سنبله Grain. Spike ¹	0.446**	-	0.024	-0.013	0.456**
تعداد بوته No. plant	0.722**	0.015	-	0.109	0.845**
وزن هزار دانه 1000 grain weight	0.319**	-0.019	0.247	-	0.547**

Residual effect 0.012 اثر باقیمانده

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

** : significant at 0.01 probability level

یکدیگر منفی بود. زیرا با افزایش تعداد دانه، وزن هزار دانه کاهش یافت (Sadegh Ghol Moghadam et al., 2020) در پژوهشی براساس نتایج تجزیه رگرسیون گام به گام وزن هزار دانه به عنوان مهم‌ترین مؤلفه که ارتباط نزدیک‌تری با عملکرد دانه داشت، معرفی گردید. نتایج تجزیه علیت در مطالعه آن‌ها نشان داد که وزن هزار دانه و طول سنبله بالاترین اثر مستقیم را بر عملکرد دانه داشتند (Bakhtiyar et al., 2021).

تجزیه عاملی صفات

برای مطالعه روابط بین صفات از روش تجزیه عاملی بر اساس روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. جهت انتخاب تعداد عامل‌ها، عامل‌هایی که مقدار ویژه یک و بالاتر از یک داشتند، انتخاب شدند. مقدار آماره KMO و آزمون

همچنین وجود همبستگی معنی‌دار و رابطه خطی با عملکرد دانه تأییدی بر اهمیت تعداد بوته در افزایش عملکرد اقتصادی است. اثر غیر مستقیم دو صفت تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه از طریق یکدیگر بر عملکرد اقتصادی منفی بود. بدیهی است با افزایش تعداد دانه سهم هر دانه از مواد فتوسنتزی کاهش یافته و نهایتاً وزن هزار دانه کاهش می‌یابد. بیشترین اثر غیر مستقیم مربوط به اثر غیر مستقیم وزن هزار دانه بر عملکرد اقتصادی از طریق تعداد بوته بود. در تحقیقی بر اساس نتایج تجزیه رگرسیون صفات، تعداد سنبله، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه به عنوان مهم‌ترین صفات تأثیرگذار بر عملکرد دانه گندم معرفی گردید. بیشترین اثر مستقیم در بین صفات مربوط به وزن هزار دانه و اثر غیر مستقیم اجزای عملکرد از طریق

اشتراک بالا برای صفات در این عامل‌های دوم، سوم و چهارم نیز نشان دهنده تاثیر بسیار بالای صفات برای عامل‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از تجزیه به عامل‌ها در ژنوتیپ‌های گندم دوروم در شرایط تنش خشکی در جدول ۵ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک، چهار عامل شناسایی شد که ۸۸/۷۲۳ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین کردند.

عامل اول در مجموع دو شرایط دارای ضرایب مثبت و بزرگتر از ۰/۵ برای صفات ارتفاع، طول سنبله، طول پدانکل، طول میانگره، طول دانه، عرض دانه، تعداد سنبلیچه در سنبله، روز تا ظهور سنبله، گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک و ضرایب بزرگ و منفی برای صفات عملکرد اقتصادی، شاخص برداشت و تعداد پنجه بود. بنابراین این عامل را می‌توان عامل مؤثر بر عملکرد نام‌گذاری کرد. این عامل به تنهایی ۵۴/۳۰۱ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین کرد. عامل دوم دارای ضریب مثبت و بزرگتر از ۰/۵ برای صفات وزن هزاردانه، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد بود، این عامل را می‌توان عامل مؤثر بر وزن هزار دانه نامید. در صورت نیاز به بهبود وزن هزاردانه می‌بایست از عامل دوم استفاده گردد. عامل سوم نیز دارای ضرایب مثبت و بزرگتر از ۰/۵ برای صفت عملکرد بیولوژیک بود و می‌توان آن را به عنوان عامل مؤثر بر عملکرد بیولوژیک معرفی کرد. عامل چهارم با داشتن ضریب بزرگ و مثبت برای صفت تعداد دانه در سنبله به عنوان عامل مؤثر بر تعداد دانه در سنبله در نظر گرفته شد. میزان اشتراک برای تمامی صفات وارد شده به عامل‌های مختلف در حد بالایی بوده که این نشان‌دهنده تأثیر خوب و قابل قبول فاکتورهای مشترک برای این صفات می‌باشد. در پژوهشی با بررسی ۱۴۸ لاین اینبرد گندم نان به همراه والدین در دو شرایط آبیاری کامل و تنش کم آبی انتهای فصل گزارش کردند که در تجزیه به عامل‌ها، در هر دو شرایط چهار عامل وارد مدل شدند که در شرایط آبیاری کامل و تنش به ترتیب ۷۷/۸۵ و ۶۸/۷۶ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین نمودند (Hamzeh et al., 2019). در مطالعه ژنوتیپ گندم دوروم پنج عامل با داشتن ریشه‌های بزرگتر از یک معنی‌دار شده و ۸۴/۶۵ درصد از تغییرات داده‌ها را توجیه کردند. عامل اول به عنوان عامل مؤثر بر خصوصیات برگ پرچم، عامل دوم عامل مؤثر بر ارتفاع و عامل سوم عامل مؤثر بر زیست‌توده نامگذاری شد (Heidarinezhad et al., 2018).

اسفربستی بارلت برای بررسی کافی بودن همبستگی بین داده‌ها برای انجام تجزیه عاملی بررسی شد و ضرایب عاملی بزرگتر از ۰/۵ صرف‌نظر از علامت مربوطه به عنوان ضرایب معنی‌دار در نظر گرفته شدند. پس از انجام تجزیه عاملی با در نظر گرفتن مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک، چهار عامل اول در دو شرایط توانستند به ترتیب ۵۴/۵۱، ۱۸/۱۹، ۸/۸۵ و ۶/۶۵ و در مجموع ۸۸/۲۰ درصد از واریانس بین صفات را تبیین کنند (جدول ۵). در عامل اول بالاترین سهم در توجیه واریانس متعلق به صفات تعداد سنبلیچه در سنبله، تعداد روز تا گرده‌افشانی، ارتفاع، طول پدانکل، عملکرد اقتصادی، طول دانه، عرض دانه، روز تا ظهور سنبله، شاخص برداشت، تعداد بوته، طول سنبله و طول میانگره بود. لذا این عامل را می‌توان عامل مؤثر بر عملکرد نامگذاری کرد. با توجه به اینکه این عامل به تنهایی ۵۴/۵۱ درصد از تغییرات کل را توجیه کرده است لذا صفاتی که در این عامل دارای ضرایب بزرگ هستند، مهم‌ترین صفات در گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب می‌باشند. میزان اشتراک برای تمامی صفات وارد شده به عامل اول در حد نسبتاً بالایی بوده که این نشان دهنده تاثیر خوب و قابل قبول فاکتورهای مشترک برای این صفات می‌باشد. تمام صفاتی که در این عامل دارای ضریب بزرگ بودند به غیر از صفات عملکرد اقتصادی، عملکرد بیولوژیک و تعداد بوته، دارای ضریب منفی بودند، لذا افزایش مقدار صفات فنولوژیک و مورفولوژیک سبب کاهش عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک خواهد شد. به این ترتیب جهت افزایش عملکرد لازم است طول دوره‌های فنولوژیک کاهش یابد که با کاهش دوره‌های فنولوژیک طول دوره رشد رویشی کاهش می‌یابد که در نهایت موجب کاهش صفات مورفولوژیک می‌شود. ارزیابی ارقام پیشرفته گندم نشان داده است که ارقام زودرس دارای عملکرد بالاتری هستند.

عامل دوم که دارای ضرایب بزرگ و مثبت برای صفات وزن هزاردانه، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد بود را می‌توان به عنوان عامل مؤثر بر وزن هزاردانه نامگذاری کرد. عامل سوم که دارای ضریب بزرگ و مثبت برای صفت عملکرد بیولوژیک بود، می‌تواند به عنوان عامل مؤثر بر عملکرد بیولوژیک و عامل چهارم که دارای ضریب بزرگ و مثبت برای تعداد دانه در سنبله بود، به عنوان عامل مؤثر بر تعداد دانه در سنبله معرفی گردد. میزان

جدول ۵- نتایج تجزیه به عامل‌ها برای صفات مختلف ژنوتیپ‌های گندم دوروم در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهایی فصل
 Table 5- Results of factor analysis for different traits of durum wheat genotypes in full irrigation and terminal drought stress conditions

صفات / شرایط Traits/condition	آبیاری کامل Full irrigation				تنش خشکی انتهایی فصل Terminal drought stress			
	عامل اول First factor	عامل دوم Second factor	عامل سوم Third factor	عامل چهارم Fourth factor	عامل اول First factor	عامل دوم Second factor	عامل سوم Third factor	عامل چهارم Fourth factor
	ارتفاع بوته Plant height	0.942	-0.08	0.159	-0.105	0.908	-0.208	0.227
طول سنبله Spike length	0.744	-0.375	0.391	-0.246	0.615	-0.581	0.272	-0.246
طول پدانکل Peduncle length	0.916	0.244	-0.082	0.071	0.948	0.009	-0.128	0.071
طول میانگره Internode length	0.718	-0.292	0.007	-0.349	0.657	-0.351	-0.027	-0.349
طول دانه Grain length	0.868	0.312	-0.016	-0.017	0.939	0.091	-0.040	-0.017
عرض دانه Grain length	0.848	0.057	-0.134	0.351	0.804	0.398	-0.150	0.351
روز تا ظهور سنبله Day to heading	0.796	0.421	-0.182	0.238	0.913	0.094	-0.196	0.238
روز تا گرده‌افشانی Day to pollination	0.971	0.094	-0.102	-0.019	0.928	-0.184	-0.239	-0.019
روز تا رسیدگی Day to maturity	0.909	0.210	-0.283	0.046	0.908	0.061	-0.318	0.046
تعداد بوته No. plant	-0.766	-0.377	-0.006	-0.319	-0.812	-0.010	-0.210	-0.319
تعداد سنبله در سنبله Spiklet.spike ⁻¹	0.973	-0.063	0.160	-0.015	0.942	-0.157	0.188	-0.015
تعداد دانه در سنبله Grain.spike ⁻¹	0.136	-0.422	0.192	0.812	-0.189	-0.106	0.085	0.812
وزن هزاردانه 1000 grain weight	-0.233	0.888	0.033	-0.113	-0.523	0.802	0.155	-0.113
عملکرد بیولوژیک Biological yield	-0.211	-0.022	0.860	0.147	-0.106	0.042	0.955	0.147
شاخص برداشت Harvest index	-0.788	0.193	-0.523	0.060	-0.751	0.133	0.552	0.060
انتقال مجدد Retransmit	-0.237	0.874	0.313	-0.042	-0.113	0.858	-0.128	-0.042
کارایی انتقال مجدد Retransmission efficiency	-0.181	0.837	0.300	-0.020	-0.124	0.924	0.134	-0.020
عملکرد اقتصادی Economical yield	-0.884	0.191	-0.034	0.123	-0.856	0.189	0.028	0.123
مقدار ویژه Eigen value	9.811	3.275	1.593	1.197	9.774	3.041	1.727	1.197
درصد واریانس Variance%	54.506	18.193	8.849	6.651	54.301	16.892	9.594	6.651
درصد واریانس تجمعی Cumulative variance%	54.506	72.699	81.548	88.199	54.301	71.193	80.787	88.199

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) = 3/76, Bartlett's test = 15/1075**

تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم دوروم

نتایج تجزیه خوشه‌ای برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط آبیاری کامل و برش دندروگرام حاصل (شکل ۱A) باعث ایجاد ۳ گروه شد. بر اساس این حالت گروه‌بندی، ژنوتیپ‌های IDYN19، IDYN35، IDYN20، IDSN_2 و ارقام کرخه، بهرنگ، دنا، آریا، شبرنگ، هانا و سیروان در گروه اول و ارقام چمران ۲ و مهرگان در گروه دوم قرار گرفتند. رقم شتردندان به تنهایی در گروه سوم قرار گرفت. ژنوتیپ‌های قرار گرفته در گروه اول به غیر از تعداد بوته، وزن هزاردانه، عملکرد اقتصادی، شاخص برداشت، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد، برای سایر صفات انحراف از میانگین منفی داشتند. این ژنوتیپ‌ها بیشترین مقدار میانگین را نیز برای صفات عملکرد اقتصادی، شاخص برداشت و وزن هزاردانه داشتند. ژنوتیپ‌های قرار گرفته در گروه دوم با داشتن انحراف از میانگین مثبت برای صفات تعداد بوته، طول سنبله، طول میانگره، تعداد دانه در سنبله و عملکرد بیولوژیک بیشترین مقدار میانگین را نیز برای صفت تعداد بوته و کمترین مقدار میانگین را برای صفات وزن هزاردانه و صفات فنولوژیک شامل تعداد روز تا ظهور سنبله، گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک شامل تعداد بوته، تعداد دانه در سنبله و عملکرد بیولوژیک قرار گرفته در این گروه زودرس بودند. رقم شتردندان که به تنهایی در گروه سوم قرار گرفت برای صفات ارتفاع، طول پدانکل، طول میانگره، طول سنبله و صفات فنولوژیک پدانکل، طول میانگره، طول و عرض دانه و صفات فنولوژیک انحراف از میانگین مثبت داشته و انحراف از میانگین این ژنوتیپ برای سایر صفات منفی بود. بیشترین مقدار میانگین برای صفات ارتفاع، طول سنبله، طول پدانکل، طول میانگره، طول و عرض دانه و صفات فنولوژیک و کمترین مقدار میانگین برای صفات تعداد بوته، عملکرد اقتصادی و شاخص برداشت را به خود اختصاص داد (جدول ۶).

به نظر می‌رسد رقم شتردندان به علت دیررسی تا زمانی که شرایط مساعد بوده است انرژی خود را صرف رشد رویشی کرده است اما شروع دوره رشد زایشی آن مصادف با خشکی و گرمای انتهای فصل رشد بوده است، به همین دلیل وزن هزاردانه و عملکرد اقتصادی در آن خیلی کم می‌باشد که در نهایت شاخص برداشت آن به کمترین مقدار رسیده است. ژنوتیپ‌های گروه دوم نیز که کمترین مقدار میانگین را برای دوره‌های فنولوژیک

داشته‌اند از استراتژی فرار استفاده کرده‌اند لذا فرصت کافی برای پر کردن دانه‌های تولید شده نداشته‌اند. ژنوتیپ‌هایی که در شرایط آزمایش حاضر علاوه بر رشد رویشی مناسب، با شروع به موقع دوره زایشی از برخورد این دوره با تنش خشکی و گرمایی انتهای فصل اجتناب کرده‌اند در نهایت عملکرد بیشتری تولید کرده‌اند.

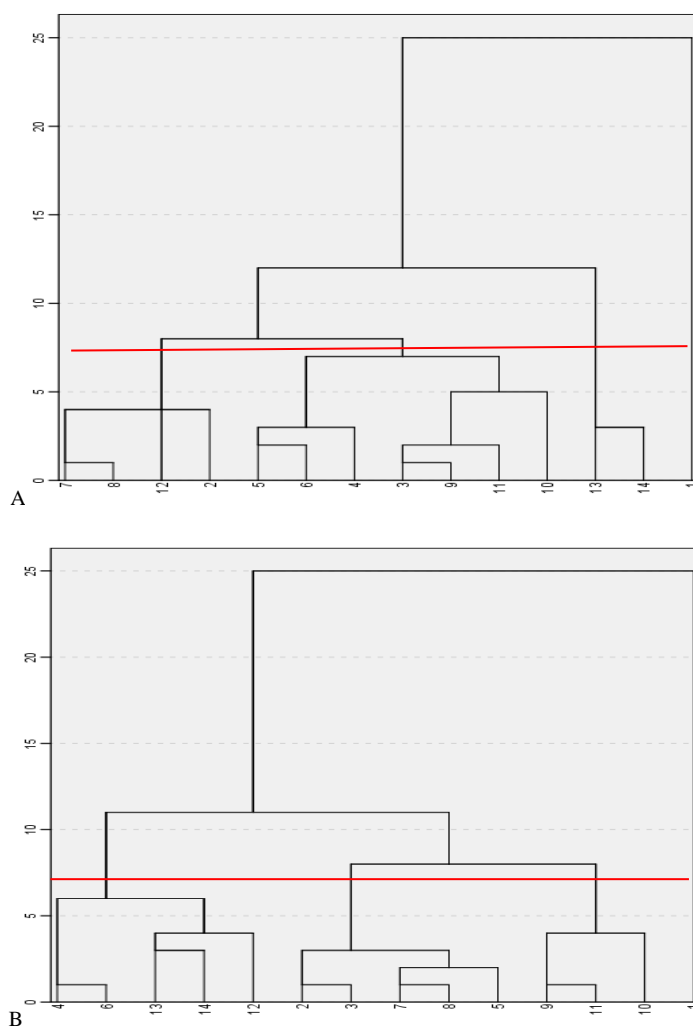
پس از انجام تجزیه خوشه‌ای خط برش در نظر گرفته شده ژنوتیپ‌ها را در شرایط تنش به ۳ گروه اصلی تقسیم کرد (شکل ۲B). در گروه اول ژنوتیپ IDYN35 و ارقام کرخه، سیروان، چمران ۲ و مهرگان قرار گرفتند که این ژنوتیپ‌ها دارای انحراف از میانگین منفی برای صفات ارتفاع، طول پدانکل، طول میانگره، طول دانه، عرض دانه، تعداد سنبله‌چه در سنبله، وزن هزاردانه، شاخص برداشت، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد و صفات فنولوژیک شامل تعداد روز تا ظهور سنبله، گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک و انحراف از میانگین مثبت برای صفات طول سنبله، تعداد بوته، تعداد دانه در سنبله، عملکرد بیولوژیک و عملکرد اقتصادی بودند. ژنوتیپ‌های قرار گرفته در این گروه دارای بیشترین مقدار میانگین برای صفات تعداد بوته، عملکرد بیولوژیک و عملکرد اقتصادی بودند. در مجموع ژنوتیپ‌های این گروه، ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا بودند. این ژنوتیپ‌ها با تولید تعداد بوته بیشتر، تعداد دانه بیشتری نیز تولید کرده‌اند که در نهایت باعث افزایش عملکرد اقتصادی آن‌ها شده است.

ژنوتیپ‌های IDYN19، IDYN20، IDSN_2 و ارقام بهرنگ، دنا، آریا، شبرنگ و هانا در گروه دوم قرار گرفتند که دارای انحراف از میانگین مثبت برای صفات تعداد بوته، وزن هزاردانه، عملکرد اقتصادی، شاخص برداشت، عرض دانه، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد و تعداد روز تا ظهور سنبله و رسیدگی فیزیولوژیک بودند. ژنوتیپ‌های موجود در این گروه برای صفات وزن هزاردانه، شاخص برداشت، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد بیشترین مقدار میانگین را داشتند. این ژنوتیپ‌ها با داشتن فرصت کافی برای پر کردن دانه و بهره‌گیری از پدیده انتقال مجدد، توانسته‌اند وزن هزار دانه خود را افزایش دهند و دانه‌های درشت‌تری تولید کنند. ژنوتیپ‌های این گروه، ژنوتیپ‌های دانه درشت بودند.

رقم شتردندان به تنهایی در گروه سوم قرار گرفت. این

انتقال مجدد، عملکرد اقتصادی و شاخص برداشت مربوط به رقم شترندندان بود. این ژنوتیپ به علت دیررسی در شروع دوره زایشی با تنش شدید مواجه شده است و به علت عدم قدرت و کارایی انتقال مجدد نتوانسته است از مواد ذخیره شده در لندام‌های رویشی برای پر کردن تعداد محدود دانه‌های تولید شده استفاده کند لذا وزن هزار دانه و عملکرد آن به شدت کاهش یافته است. می‌توان گفت رقم شترندندان، ژنوتیپ دیررس بود (جدول ۶).

ژنوتیپ دارای انحراف از میانگین مثبت برای تمام صفات غیر از تعداد بوته، تعداد سنبلیچه در سنبله، وزن هزاردانه، عملکرد اقتصادی، شاخص برداشت، انتقال مجدد و کارایی انتقال مجدد بود. بیشترین مقدار میانگین برای صفت ارتفاع، طول سنبله، تعداد سنبلیچه در سنبله، طول پدانکل، طول میانگره، طول و عرض دانه و صفات فنولوژیک شامل تعداد روز تا ظهور سنبله، گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک و کمترین مقدار میانگین برای صفات تعداد بوته، وزن هزاردانه، انتقال مجدد و کارایی



شکل ۱- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های گندم دوروم و نان بر اساس صفات مختلف در شرایط آبیاری کامل (A) و تنش خشکی انتهای فصل (B)

Figure 1- Dendrogram obtained from cluster analysis of durum and bread wheat genotypes based on different traits under full irrigation and terminal drought stress conditions (1.Shotordandan, 2.IDSN-2, 3.IDYN-20, 4.IDYN-35, 5.IDYN-19, 6.Karkheh, 7.Behrang, 8.Dena, 9.Aria, 10.Shabarang, 11.Hana, 12.Sirvan, 13.Chamran 2 and 14.Mehregan)

دو سال زراعی در شش گروه طبقه‌بندی شدند که لاین‌های قرار گرفته در گروه اول بیشترین مقدار عملکرد دانه را دارا بودند

در پژوهشی بر اساس تجزیه خوشه‌ای ۱۵۴ لاین گندم دوروم را در شرایط آبیاری بهینه و تنش خشکی آخر فصل در

(Ahmadi et al., 2020).

شده از مناطق مختلف ایتوپی همراه با ۱۹ رقم معرفی شده با استفاده از صفات اگرومورفولوژیکی انجام شد، نمونه‌ها براساس صفات اندازه‌گیری شده و با استفاده از داده‌های استاندارد شده در ۷ گروه دسته‌بندی شدند. گروه سوم دارای بیشترین مقدار برای وزن هزار دانه، شاخص برداشت، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک بود (Wondifaw et al., 2020).

در آزمایشی که به منظور ارزیابی ۱۰۰ ژنوتیپ گندم دوروم در شرایط آبیاری و تنش خشکی انجام شد، بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های مورد بررسی در هر دو شرایط در چهار گروه قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش ژنوتیپ‌های قرار گرفته در گروه دوم در شرایط بدون تنش و گروه سوم شرایط تنش دارای بهترین میانگین عملکرد دانه بودند (Bihamta et al., 2018).

در آزمایشی ۱۷ گونه بومی گندم دوروم همراه با پنج رقم شاهد با استفاده از تجزیه خوشه‌ای بر اساس صفات اگرومورفولوژیک و وجود رنگ‌دانه روی قسمت‌های مختلف گیاه در چهار گروه طبقه‌بندی شدند. محققین این پژوهش استفاده از ژنوتیپ گروه اول را برای بهبود روز تا گلدهی و غلاف برگ به عنوان نشانگر، ژنوتیپ‌های گروه دوم را برای بهبود عملکرد دانه با رنگ برگ به عنوان نشانگر، ژنوتیپ‌های گروه سوم را برای بهبود صفات تعداد سنبلچه در سنبله و تعداد دانه در سنبله همراه با رنگ کلئوپتیل به عنوان نشانگر و ژنوتیپ‌های گروه چهارم را برای تعداد پنجه و طول دلنه همراه با رنگ میانگره به عنوان نشانگر در برنامه‌های اصلاحی و دورگ‌گیری پیشنهاد کردند (Al Lawati et al., 2021). در یک مطالعه که به منظور بررسی تنوع ژنتیکی ۱۴۱ رقم بومی گندم دوروم جمع‌آوری

جدول ۶- میانگین و درصد انحراف از میانگین کل هر گروه از ژنوتیپ‌های گندم دوروم در تجزیه خوشه‌ای در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انتهای فصل

Table 6- Mean and percentage deviation from the total mean of each group of durum wheat genotypes in cluster analysis in full irrigation and terminal drought stress conditions

شرایط	خوشه	تعداد ژنوتیپ	ارتفاع	طول سنبله	طول پدانکل	طول میانگره	طول دانه	عرض دانه	روز تا ظهور سنبله	روز تا گرده‌افشانی	روز تا رسیدگی	
Condition	Cluster	No. genotype	Height	Spike length	Peduncle length	Internode length	Grain length	Grain length	Day to heading	Day to pollination	Day to maturity	
آبیاری کامل Full irrigation	1	11	82.11	6.54	35.31	13.77	2.09	0.75	96.87	101.24	134.42	
	انحراف از میانگین کل											
	Deviation of total mean			-2.97	-8.54	-2.15	-3.28	-1.36	-1.22	-0.03	-1.06	-0.58
	2	2	84.16	8.64	32.27	15.29	1.98	0.71	91.75	100.58	130.91	
	انحراف از میانگین کل											
	Deviation of total mean			-0.56	20.75	-10.57	7.34	-6.50	-6.37	-5.33	-1.71	-3.17
	3	1	113.33	10.91	52.3	17.29	2.71	0.96	107.6	117.83	152.5	
	انحراف از میانگین کل											
	Deviation of total mean			33.89	52.49	44.91	21.43	28.05	2.216	11.09	15.14	12.78
	میانگین کل											
Total mean			84.63	7.15	36.08	14.24	2.12	0.76	96.91	102.33	135.21	
تنش خشکی انتهای فصل Terminal drought stress	1	5	79.32	7.49	32.79	13.9	1.58	0.65	94.53	100.06	120.93	
	انحراف از میانگین کل											
	Deviation of total mean			-1.42	5.88	-8.06	-1.1	-7.44	-6	-2.15	-2.48	-4.17
	2	8	77.49	6.37	35.43	13.76	1.73	0.69	96.70	102.2	126.9	
	انحراف از میانگین کل											
	Deviation of total mean			-3.69	-10.01	-0.65	-2.08	1.65	-0.08	0.09	-0.4	0.56
	3	1	109.99	10.66	51.92	17.17	2.11	0.91	106.33	118.66	146.83	
	انحراف از میانگین کل											
	Deviation of total mean			36.68	50.66	45.57	22.21	23.98	30.64	10.05	15.63	16.34
	میانگین کل											
Total mean			80.47	7.07	35.67	14.05	1.70	0.70	96.61	102.61	126.2	

ادامه جدول ۶

Table 6 Continued

شرایط Condition	خوشه Cluster	تعداد ژنوتیپ No. genotype	تعداد بوته No. plant	تعداد سنبله در سنبله Spiklet.Spike ¹	تعداد دانه در سنبله Grain. Spike ⁻¹	وزن هزار دانه 1000 grain weight	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	کارایی انتقال مجدد Retransmit Retransmit efficiency	عملکرد اقتصادی Economical yield	
	1	11	306.67	15.94	43.66	40.35	12.03	38.74	13.41	5.92	4.62
	انحراف از میانگین کل Deviation of total mean		0.10	-3.95	-0.07	2.8	-0.001	6.32	2.77	2.38	6.10
آبیاری کامل Full irrigation	2	2	379.69	16.49	44.95	33.98	12.15	34.08	11.30	5.09	4.14
	انحراف از میانگین کل Deviation of total mean		23.94	-0.65	2.86	-13.42	1	-6.44	-13.34	-11.95	-4.92
	3	1	156	24.03	41.53	37.68	11.79	15.78	12.54	5.64	1.85
	انحراف از میانگین کل Deviation of total mean		-49.07	44.76	-4.95	-3.98	-2	-56.68	-3.87	-2.35	-57.34
	میانگین کل Total mean		306.34	16.6	43.69	39.25	12.03	36.43	13.04	5.78	4.35
تنش خشکی انتهای فصل Terminal drought stress	1	5	317.9	15.9	37.8	26.6	9.3	31.4	32.2	29.6	2.9
	انحراف از میانگین کل Deviation of total mean		4.6	-2.1	4.2	-1.8	10.1	-2.5	-7.8	-6.1	8.4
	2	8	311.4	15.6	35.7	27.9	7.9	35.5	37.0	33.0	2.8
	انحراف از میانگین کل Deviation of total mean		2.5	-4.4	-1.7	3.03	-6.4	10.1	6.2	4.8	3.2
	3	1	174	23.7	33.5	22.9	8.5	10.2	31.3	28.9	0.86
	انحراف از میانگین کل Deviation of total mean		-42.7	45.9	-7.6	-15.2	0.9	-68.4	-10.4	-8.3	67.8
	میانگین کل Total mean		303.9	16.3	36.3	27.0	8.4	32.2	34.9	31.5	2.7

نتیجه گیری کلی

داشتند و بیشترین اثر مستقیم مربوط به اثر مستقیم شاخص برداشت بر عملکرد اقتصادی بود. بر اساس نتایج تجزیه عاملی در شرایط آبیاری کامل، چهار عامل اول ۸۸/۲۰ درصد از واریانس بین صفات و در شرایط تنش نیز چهار عامل ۸۸/۷۲ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین کردند. نتایج تجزیه خوشه‌ای برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط آبیاری کامل و تنش، ژنوتیپ‌ها را در سه گروه طبقه‌بندی کرد. با توجه به پژوهش انجام شده لاین IDYN-19 در هر دو شرایط آبیاری کامل و تنش، عملکرد بالایی داشت و لاین IDYN-35 نیز تحمل به تنش خشکی بالایی داشت. پیشنهاد می‌شود ضمن استفاده از این لاین‌ها در برنامه به نژادی، سازگاری و پایداری این لاین‌ها در آزمایشات مربوطه مورد بررسی قرار گیرد.

بر اساس نتایج تجزیه مرکب اثر متقابل ژنوتیپ و سال تنها برای صفت طول سنبله معنی‌دار بود. همبستگی مثبت عملکرد اقتصادی با تعداد سنبله در بوته، شاخص برداشت و وزن هزار دانه نشان دهنده تاثیر اجزای عملکرد بر عملکرد اقتصادی بود. همچنین همبستگی بالای صفات فنولوژیک با یکدیگر و همبستگی منفی آن‌ها با عملکرد اقتصادی نشان دهنده اهمیت زودرسی و فرار از تنش در شرایط آزمایش حاضر بود. بر اساس نتایج تجزیه رگرسیون گام به گام در شرایط آبیاری کامل، تنها صفت ارتفاع بوته و در شرایط تنش دو متغیر شاخص برداشت و عملکرد بیولوژیک به عنوان متغیرهای مؤثر بر عملکرد اقتصادی تعیین شدند که هر دو صفت شاخص برداشت و عملکرد بیولوژیک اثر مستقیم و مثبت بالایی بر عملکرد اقتصادی

References

- Ahmadi, Gh.H., Seiosemarde, A., Sohrabi, Y. and Jalal Kamali, M.R., 2020. Relationship between developmental traits and grain yield in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under terminal drought stress condition. *Applied Fields Crops Research*, 33(4), pp.84–99. [In Persian].

- Al Lawati, A.H., Nadaf, S.K., AlSaady, N.A., Al Hinai, S.A., Almamari, A., Al Adawi, M.H., Al Hinai, R.S. and Al Maawali, A., 2021. Genetic diversity of Omani durum wheat (*Triticum turgidum* sub sp. *durum*) landraces. *The Open Agriculture Journal*, 15(21), pp.21–32. <https://doi.org/10.2174/1874331502115010021>
- Bakhtiyar, F., Ghazvini, H.A. and Aghaei Sarbazeh, M., 2021. Evaluation of variability of agronomic and morphological traits in doubled haploid wheat lines using multivariate statistical methods. *Applied Fields Crops Research*, 34(1), pp.71–92. [In Persian].
- Bihamta, M.R., Shirkavand, M., Hasanpour, J. and Afzalifar, A., 2018. Evaluation of durum wheat genotypes under normal irrigation and drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 9(24), pp.119–136. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.9.24.119>
- CIMMYT., 2019. *Wheat in developing world*. International Maize and Wheat Improvement Center, CIMMYT, MX.
- Cox, M.C., Qualset, C.O. and Rains, D.W., 1990. Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. III: nitrogen translocation in relation to grain yield and protein. *Crop Science*, 26, pp.737–740. <https://doi.org/10.2135/cropsci1986.0011183x002600040022x>
- Donald, C.M. and Hamblin, J., 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*, 28, pp.361–405. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60559-3](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60559-3)
- Enghiad, A., Ufer, D., Countryman, A. and Thilmany, D., 2017. An overview of global wheat market fundamentals in an era of climate concerns. *International Journal of Agronomy*, 19, pp.1–15. <https://doi.org/10.1155/2017/3931897>
- FAOSTAT., 2018. <http://faostat3.fao.org/download/q/qc/e>
- Farshadfar, E., 2005. *Principles of multivariate statistical methods* (2nd ed.). Kermanshah: Taq Bostan Publications. [In Persian].
- Golabadi, M., Arzani, A. and Mir Mohammadi Meibodi, S.A.M., 2018. Genetic analysis of some morphological traits in durum wheat by generation mean analysis under normal and drought stress conditions. *Seed and Plant Journal*, 24(1), pp.99–116. [In Persian].
- Hamzeh, H., Asghari, A., Mohammadi, S.A., Sofalian, O. and Mohammadi, S., 2018. Effect of variations of phenological traits and phenological and photosynthetic materials allocation on grain yield of bread wheat under different moisture conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(4), pp.989–1002. [In Persian].
- Hay, R.K.M., 1995. Harvest index: A review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annals of Applied Biology*, 126, pp.197–216. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1995.tb05015.x>
- Heidarinezhad, H., Esmaeili, A., Hosseinpour, T. and Eisvand, H.R., 2018. Factor analysis genetic correlation and path analysis of different traits in durum wheat genotypes. *Plant Ecophysiology*, 10(33), pp.117–126. [In Persian].

- Kirigwi, F.M., Van Ginkel, M., Brown-Guedira, G., Gill, B.S., Paulsen, G.M. and Fritz, A.K., 2007. Markers associated with a QTL for grain yield in wheat under drought. *Molecular Breeding*, 20, pp.401–413. <https://doi.org/10.1007/s11032-007-9100-3>
- Martínez-Moreno, F., Ammar, K. and Solís, I., 2022. Global changes in cultivated area and breeding activities of durum wheat from 1800 to date: A historical review. *Agronomy*, 12, pp.1135–1139. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051135>
- Mwadingeni, L., Shimelis, H., Tesfay, S. and Tsilo, T.J., 2016. Screening of bread wheat genotypes for drought tolerance using phenotypic and proline analyses. *Frontiers in Plant Science*, 7, pp.1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01276>
- Najafi Mirak, T., Aghaei Sarbarzeh, M., Moayedi, A., Kafashi, A. and Sayah Far, M., 2021. Yield stability analysis of durum wheat genotypes using AMMI method. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2), pp.17–28. [In Persian].
- Papakosta, D.K. and Gayians, A.A., 1991. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization and losses for Mediterranean wheat during grain filling. *Agronomy Journal*, 83, pp.864–870. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300050018x>
- Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Etminan, A., Shooshtari, L., Maleki-Tabrizi, N. and Poczai, P., 2020. Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. *Sustainability*, 12, pp.5610–5620. [In Persian]. <https://doi.org/10.3390/su12145610>
- Richard, C.A., Hickey, L.T., Fletcher, S., Jennings, R., Chenu, K. and Christopher, J.T., 2015. High-throughput phenotyping of seminal root traits in wheat. *Plant Methods*, 11, pp.1–11. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0055-9>
- Sadegh Ghol Moghadam, R., Saba, J., Shekari, F. and Roustaii, M., 2020. Study of relationships between root traits and yield and yield components of bread wheat under rainfed conditions. *Journal of Crop Breeding*, 12(36), pp.136–150. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/jcb.12.36.136>
- Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K.H.M., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R.K., HanumanthaRao, B., Nair, R.M., Prasad, P.V.V. and Nayyar, H., 2018. Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: Impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, pp.1–19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>
- Singh, C., Gupta, A., Gupta, V., Kumar, P., Sendhil, R., Tyagi, B.S., Singh, G., Chatrath, R. and Singh, G.P., 2019. Genotype × environment interaction analysis of multi-environment wheat trials in India using AMMI and GGE biplot models. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 19, pp.309–318. <https://doi.org/10.1590/1984-70332019v19n3a43>
- Tidiane Sall, A., Chiari, T., Legesse, W., Seid-Ahmed, K., Ortiz, R., Van Ginkel, M. and Bassi, F.M., 2020. Durum wheat (*Triticum durum* Desf.): Origin, cultivation and potential expansion in Sub-Saharan Africa. *Agronomy*, 9, pp.263–272. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050263>

- Tosimojarad, M., Ghanadha, M., Khodarahmi, M. and Shahabi, S., 2005. Factor analysis for grain yield and other characteristics. *Research and construction*, 67, pp.9-16. [In Persian].
- Wang, J., Vanga, S.K., Saxena, R., Orsat, V. and Raghavan, V., 2018. Effect of climate change on the yield of cereal crops: A review. *Climate*, 6, pp.41-48. <https://doi.org/10.3390/cli6020041>
- Wasaya, A., Zhang, X., Fang, Q. and Yan, Z., 2018. Root phenotyping for drought tolerance: A review. *Agronomy*, 8, pp.241-260. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110241>
- Wondifaw, M.A., Keneni, G. and Tesfay, K., 2020. Genetic diversity of Ethiopian durum wheat (*Triticum durum* Desf) landrace collections as revealed by morphological markers. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 12(4), pp.258-268. <https://doi.org/10.5897/jpbcs2020.0873>
- Xynias, I.N., Mylonas, I., Korpetis, E.G., Ninou, E., Tsaballa, A., Avdikos, I.D. and Mavromatis, A.G., 2020. Durum wheat breeding in the Mediterranean region: Current status and future prospects. *Agronomy*, 10(3), pp.1-27. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030432>

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 39-51

Identifying and determining factors affecting rainfed barley yield gap in drought stress conditions at the end of the growing season

Reza Ataei Azimi ^a, Ali Rahemi Karizaki ^{*b}, Abbas Biabani ^b, Masomeh Naeemi ^b

^a Master's Student of Agroecology, Plant Production Department, College of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

^b Plant Production Department, College of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

*Corresponding Author: alirahemi@yahoo.com

Received: 20 August 2023 Accepted: 19 December 2023 DOI: 10.22034/CSRAR.2024.410882.1368

How to cite this article:

Ataei Azimi, R., Rahemi Karizaki, A., Biabani, A. and Naeemi, M., 2025. Identifying and determining factors affecting rainfed barley yield gap in drought stress conditions at the end of the growing season. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 39-51. <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.410882.1368>

Abstract

Introduction: The barely (*Hurdium vulgare* L.) is one of the oldest cultivated plants and that is one of the most important cereals in Iran after wheat in terms of production and cultivated area. One of the main problems of barely production in the eastern region of Golestan province, Iran is considerable difference between actual yield and attainable yield which is called yield gap. In recent years, this gap has been impressive, which decreasing the gap between actual and potential yield (maximum production which can be achieved by proper management), requires detailed study and analysis of its causes. Therefore, identifying barely yield-limiting factors are essentially needed. Therefore, the present study was conducted in Kalaleh in the eastern region of Golestan province, Iran for simultaneous recognition of best management practices, percentage of the affected fields, estimation of barely yield potential and gaps using the Comparative Performance Analysis (CPA) method.

Materials and Methods: Therefore, identifying barely yield-limiting factors are essentially needed. In order to this study was conducted to evaluate the factors limiting barely yield in Kalaleh in the eastern region of Golestan province using the Comparative Performance Analysis (CPA) method in 2020-2021. Collection of the required information (such as planting date, holding and harvesting activities, soil physicochemical properties) was done by fieldwork, and personal interviews with farmers. To this aim, 38 barely fields in geographical location of the study area were monitored in each crop year. In the comparative performance analysis (CPA) method, using stepwise regression, the relationship between variables and yield were considered. And yield gap rate, its causes factors and it was also estimated the contribution of each of these factors to the creation of a yield gap.

Results and Discussion: Among the investigated variables, the model (final regression equation) with four independent variables was selected (nitrogen fertilization frequency, amount of phosphorus fertilization, frequency of fungicide use and frequency of pesticides). The results of yield model showed that there was a difference of 1253 kg/ha between attainable (5063 kg/ha) and actual yield (3810 kg/ha). Among studied variable, nitrogen fertilization frequency, amount of phosphorus fertilization, frequency of fungicide use and frequency of pesticide use with 29, 22.6, 24.2 and 24.2%



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

respectively, had the most influence on barely yield gap in the study area. The results showed that the number of times of fertilization caused 363.8 kg/ha of yield gap. Every plant needs the right time for fertilization for more yield. If the best fertilization time is not chosen for the plant, later or earlier fertilization will cause harmful effects in the plant. The amount of phosphorus consumed was the factor that had the least contribution to the limitation of barley yield in the studied fields (828.8 kg/ha). Phosphorus nitrogen affects root growth, and helps absorption of nutrients by plant, balances nitrogen deficiency in the soil. The results showed that frequency of fungicide use caused 302.8 kg/ha of yield loss. In other words, by using fungicide twice during the crop growing season, barley yield increased by 302.8 kg/ha. Also, the effect of frequency of pesticide use on the yield gap was similar to frequency of fungicide use. Therefore, farmers should consider weed control as an important factor in increasing the yield of this crop.

Conclusion: In this study by examining four important management factors in growing barely, optimal requirements of each factor to achieve the highest yield was determined by CPA. In order to with proper and principled agricultural management and modification of the influencing factors, the difference between the attainable yield and the actual yield can be reduced and the desired result can be achieved.

Keywords: Achievable yield, Actual yield, Regression, Yield potential

شناسایی و تعیین عوامل مؤثر بر خلأ عملکرد جو دیم در شرایط تنش خشکی انتهایی فصل رشد

رضا عطایی عظیمی^۱، علی راحمی کاریزکی^{۲*}، عباس بیابانی^۲، معصومه نعیمی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

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

* مسئول مکاتبه: alirahemi@yahoo.com

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.410882.1368

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

چکیده

کم کردن فاصله بین عملکرد واقعی کشاورزان و عملکردی که با مدیریت مناسب قابل دستیابی است، نیازمند بررسی دقیق دلایل و عوامل آن است. بنابراین شناسایی عوامل محدودکننده و خلأ عملکرد دارای اهمیت ویژه‌ای است. بدین منظور مطالعه‌ای در شهرستان کلاله، در ۳۸ مزرعه دیم به صورت پیمایشی و براساس روش تحلیل مقایسه کارکرد انجام شد. در این مطالعه کلیه اطلاعات مربوط به عملیات مدیریتی، خصوصیات خاک و وضعیت اجتماعی-اقتصادی کشاورزان مشخص و اندازه‌گیری شد. با استفاده از رگرسیون گام به گام، رابطه بین عملکرد و متغیرها مورد بررسی قرار گرفت و میزان خلأ عملکرد جو و عوامل ایجاد کننده آن و همچنین تعیین سهم هر یک از این عوامل در ایجاد خلأ عملکرد برآورد شد. نتایج نشان داد که عملکرد واقعی مزرعه و پتانسیل عملکرد، محاسبه شده با مدل گام به گام به ترتیب برابر با ۳۸۱۰ و ۵۰۶۳ کیلوگرم در هکتار و میزان خلأ عملکرد برابر ۱۲۵۳ کیلوگرم در هکتار برآورد شد، که از بین متغیرهای مورد بررسی، چهار متغیر، دفعات کوددهی، میزان فسفر مصرفی، دفعات مصرف قارچ‌کش و دفعات مصرف علف‌کش، سبب ایجاد خلأ عملکرد جو در منطقه مورد مطالعه شد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل عملکرد، رگرسیون، عملکرد واقعی، عملکرد قابل حصول

مقدمه

منطقه می‌باشد، خلأ عملکرد به اندازه‌گیری عملکرد پتانسیل بستگی دارد (Shirinzadeh et al., 2018; Van Ittersum et al., 2013). یکی از روش‌هایی که برای بررسی خلأ عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد تحلیل مقایسه کارکرد^۱ (CPA) است (Sekhvatifar et al., 2022). در این روش با استفاده از رگرسیون گام به گام محدودیت‌های عملکرد تعیین و در نهایت مدل تولید انتخاب می‌شود و با استفاده از مدل و میزان تأثیر هر کدام از محدودیت‌ها در ایجاد خلأ عملکرد مشخص می‌شود (Dastan et al., 2019). شناسایی و تعیین هر کدام از عوامل محدودکننده عملکرد و مدیریت درست آن می‌تواند باعث برطرف شدن یا کاهش خلأ عملکرد شود. به نظر می‌رسد روش CPA روش مناسبی است که با استفاده از آن می‌توان عوامل محدود کننده عملکرد را شناسایی و سپس نسبت به حذف این عوامل کاهش‌دهنده عملکرد اقدام کرد (Matourian et al., 2022).

جو (*Hordeum vulgare* L.) یکی از قدیمی‌ترین گیاهان زراعی بوده و این گیاه یکی از مهمترین غلات می‌باشد که در ایران بعد از گندم از نظر تولید و سطح زیر کشت رتبه دوم را دارد. همچنین جزو سازگارترین غلات است که در شرایط آب و هوایی مساعد، در خاک شور و همچنین در خاک‌هایی که PH آنها بین ۷ تا ۸ باشد رشد می‌کند. این گیاه نسبت به سایر غلات در برابر خشکی مقاوم‌تر است، بنابراین در شرایطی که آب، عامل محدودکننده تولید غلات باشد، جو می‌تواند محصول بیشتری را تولید کند (Halalkhor et al., 2018).

مفهوم خلأ عملکرد در حقیقت تفاوت بین عملکرد پتانسیل و عملکرد واقعی می‌باشد و تعریف خلأ عملکرد در پژوهش‌های گوناگون به عنوان یک شاخص مهم جهت افزایش عملکرد در گیاهان زراعی در مناطق مختلف می‌باشد (Haghshenas et al., 2018).

کاهش خلأ عملکرد یکی از روش‌های مطمئن برای کمک به مشکلات تغذیه‌ای جمعیت جهان است (Beza et al.,

اولین قدم جهت تعیین خلأ عملکرد در یک منطقه مشخص، سنجش پتانسیل عملکرد محصول مورد نظر در آن

۱ - Comparative performance analysis

بررسی عوامل محدود کننده عملکرد جو در شرق استان گلستان مخصوصاً کلاله در شرایط دیم و تنش خشکی انتهای فصل می‌باشد.

مواد و روش‌ها

شهرستان کلاله از نظر جغرافیایی بین ۵۵ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی در شرق استان گلستان قرار دارد. مساحت این شهرستان ۱۷۲۸ کیلومتر مربع می‌باشد و از شمال با شهرستان مراوه‌تپه و از سمت جنوب با شهرستان گالیکش و از سمت غرب به بخش داشلی برون و مرکزی گنبدکاووس و از سمت شرق به پارک ملی گلستان و شهرستان مراوه‌تپه متصل است. این تحقیق در منطقه شرقی استان گلستان (۳۸ مزرعه در شهرستان کلاله؛ روستای آقسو) در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد.

جمع‌آوری داده‌ها با کارهای میدانی و مصاحبه‌های حضوری با کشاورزان انجام شد. برای این منظور، حداقل ۳۸ مزرعه جو دیم (با مساحت متغییر بین ۱ تا ۵ هکتار) واقع در منطقه جغرافیایی مورد بررسی قرار گرفتند. عملیات نظارت به‌صورت هفتگی در طول فصل رشد انجام شد و مشاهدات از نظارت میدانی ثبت شد. مزارع انتخابی جهت پایش به گونه‌ای انتخاب شدند که دارای تنوع کافی مکانی (تنوع در خصوصیات مزرعه مانند کیفیت خاک و وسعت مزارع)، زمانی (تنوع در زمان انجام عملیات کاشت، داشت و برداشت) و اجتماعی-اقتصادی (سطح معلومات و شرایط درآمدی کشاورز) باشند. اطلاعات مربوط به مشخصات گیاه (نوع رقم، مراحل فنولوژیکی)، ویژگی‌های فیزیولوژیکی خاک، کلیه عملیات مدیریت زراعی مربوط به عملیات تهیه بستر بذر، کاشت، داشت و برداشت در هر مزرعه از طریق مشاهده، ملاقات چهره به چهره با کشاورزان و یا اندازه‌گیری، تکمیل گردیدند. برای تعیین کمیت خلأ عملکرد، روش CPA مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این روش، محدودیت‌های اصلی عملکرد و توابع کمی برای خلأ عملکرد تعیین شد. روش CPA مقدار تولید را در حالت حداکثر عملکرد و عملکرد واقعی مورد سنجش و مقیاس قرار می‌دهد (Hajjarpoor & Kashiri et al., 2018).

جهت تعیین مهم‌ترین متغیرهای مدیریتی مؤثر بر عملکرد

عملکرد پتانسیل، به این معنی است که عملکرد محصول مورد نظر در شرایط عدم محدودیت آب و عناصر غذایی و عدم تنش‌های زیستی به دست آید (Sekhavatifar et al., 2022). آنالیز خلأ عملکرد، افزایش در ظرفیت تولید محصول، در یک شرایط و منطقه مشخص را پیش‌بینی می‌کند و یک روش کارآمد در حل مشکلات تولیدی است (Soltani et al., 2016). جهت تخمین خلأ عملکرد محصولات مختلف، لازم است عملکرد محصول مورد نظر در مناطق جغرافیایی خاص و در طی سال‌های زراعی متعدد مورد مطالعه قرار گیرد (Foroughi Ayneh Deh et al., 2019).

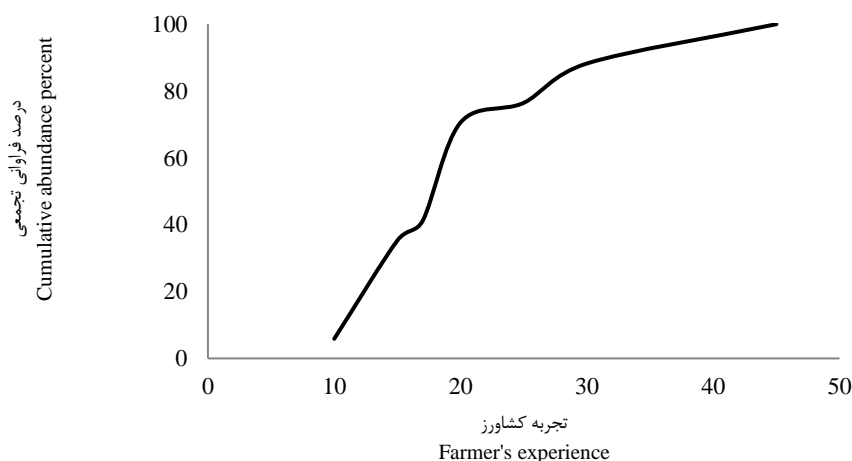
برای داده‌سازی و جمع‌آوری اطلاعات زراعی از منطقه و محصولات مورد نظر می‌توان از مطالعات چهره به چهره و میدانی با کشاورزان، استفاده از اطلاعات و داده‌های سازمان‌های خاص مثل هواشناسی و جهاد کشاورزی و برنامه‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرد (Hajjarpoor & Kashiri et al., 2018). مطالعات زیادی بر روی خلأ عملکرد گیاهان زراعی متفاوت در سطح ایران و جهان انجام شده است که از نظر وسعت مطالعاتی می‌توان آنها را در سطوح جهانی (Mojarrad et al., 2017) و منطقه‌ای (Sekhavatifar et al., 2022) جای داد که غالب پژوهش‌ها شامل گروه غلات به خصوص گندم، ذرت و برنج که جزو مهم‌ترین غلات تامین کننده غذای انسان هستند، انجام شده است. برخی روش‌ها شامل: انجام آزمایشات در مزرعه، عملکردهای رقابتی، حداکثر عملکرد کشاورزان با توجه و طبق پایش و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصولات هستند (Van Ittersum et al., 2013). اولین مرحله در هر روش، تخمین بیشترین و بالاترین عملکرد محصول مورد نظر است و هر کدام از روش‌های مورد استفاده مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند (Habib et al., 2019). در شیوه مدیریت زراعی توسط کشاورز ممکن است کمبودهایی وجود داشته باشد و این موضوع را باید در نظر گرفت که در طی تحقیقات تقریباً غیر ممکن است که هیچ گونه تنشی وجود نداشته باشد (Amini Mandi et al., 2023).

شرق استان گلستان شامل شهرستان‌های گالیکش و کلاله و مراوه تپه می‌باشد؛ سطح زیر کشت جو در کلاله ۱۵۵۰ هکتار می‌باشد. یکی از مشکلات آن منطقه پایین بودن عملکرد جو نسبت به شرایط منطقه است. بنابراین هدف از این مطالعه

نتایج و بحث

تجربه کشاورز در کشت جو

از لحاظ تجربه (سابقه کشت) بین کشاورزان تفاوت زیادی وجود داشت. دامنه تجربه کشاورزان از کسانی که برای دهمین بار اقدام به کشت جو نمودند تا کسانی که ۴۵ سال سابقه کشت داشتند، متغیر بود و در بین کشاورزان مورد مطالعه در حدود ۷۰ درصد افراد تجربه کشت ۲۰ سال جو را داشتند (شکل ۱). در پژوهشی با بررسی سابقه و مهارت تولیدکنندگان در استان گلستان در شهرستان کلاله گزارش نمودند که دامنه تجربه کشاورزان از ۱۰ تا ۶۵ سال نوسان داشت و ۷۵ درصد افراد از لحاظ سابقه کشت گندم در رده ۳۰ سال و کمتر قرار داشتند (Nobatiy et al., 2020a).



شکل ۱- درصد فراوانی تجمعی تجربه کشاورز در کشت جو در مزارع مورد مطالعه

Figure 1- Cumulative abundance percent of farmer's experience in barley cultivation in the fields under study

۱۵۰ کیلوگرم توصیه شده است که علت مصرف زیاد بذر به احتمال زیاد به دلایلی مثل شرایط خاک نامناسب، عدم تهیه بستر مناسب و از بین رفتن بذور به دلیل شرایط محیطی یا آفات و بیماری‌ها می‌باشد (شکل ۲).

سن کشاورزان

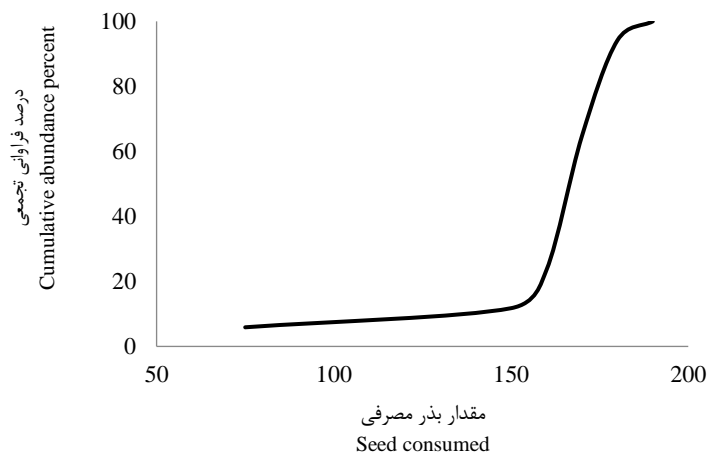
بررسی سن کشاورزان جوکار در شهرستان کلاله نشان داد که اکثریت این کشاورزان دارای سن ۴۰ تا ۴۵ (۸۰ درصد) سال بودند که کشاورزان ۲۰ تا ۴۰ ساله (حدود ۴۵ درصد) از کل کشاورزان مورد مطالعه را در بر گرفتند (شکل ۳).

و مدل عملکرد از رگرسیون گام به گام استفاده شد که در این رگرسیون عملکرد در واحد سطح به عنوان متغیر وابسته لحاظ گردید و سایر متغیرها از قبیل سن و تجربه کشاورز، نوع خاک‌ورزی (شخم زدن)، مصرف کودهای پایه و سرک، مقدار مصرف کودهای نیتروژن، فسفر و پتاس، مصرف آفت‌کش و علف‌کش‌ها و انواع آن، خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک (بافت خاک و ساختمان، عناصر ماکرو و عناصر میکرو، شوری و...) و سایر متغیرهای دیگر به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. همچنین، برای تجزیه آماری داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۴ استفاده شد (Soltani, 2007).

ترسیم شکل‌ها با نرم‌افزار Excel 2010 انجام شد.

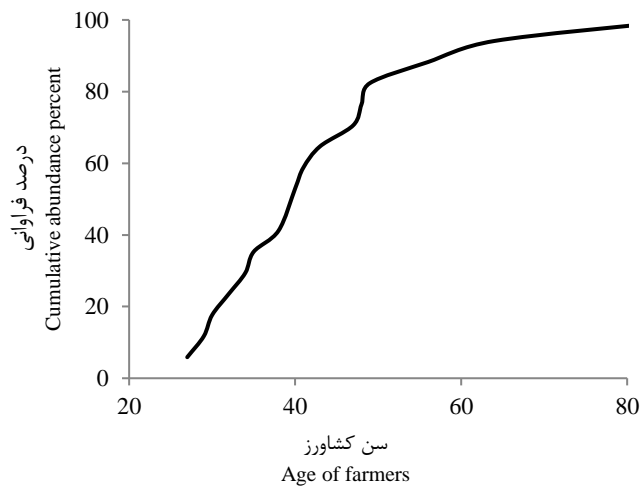
مقدار بذر مصرفی جو

یکی از مهمترین عوامل مدیریتی جهت رسیدن به بالاترین عملکرد در واحد سطح، میزان تراکم مطلوب می‌باشد که با مقدار بذر مصرف شده در هر هکتار به دست می‌آید. نتایج این بررسی نشان داد که میزان بذر مصرف شده در مزارع مورد پژوهش از ۷۵ تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نوسان داشت. در ۶۰ درصد مزارع مقدار بذر مصرفی ۱۷۰ کیلوگرم در هکتار و یا کمتر از آن بود. به طور معمول میزان بذر مصرف شده توسط کشاورزان بیشتر از میزان بذر توصیه شده توسط مراکز تحقیقاتی بوده به گونه‌ای که تحت شرایط دیم مصرف ۱۲۰ تا



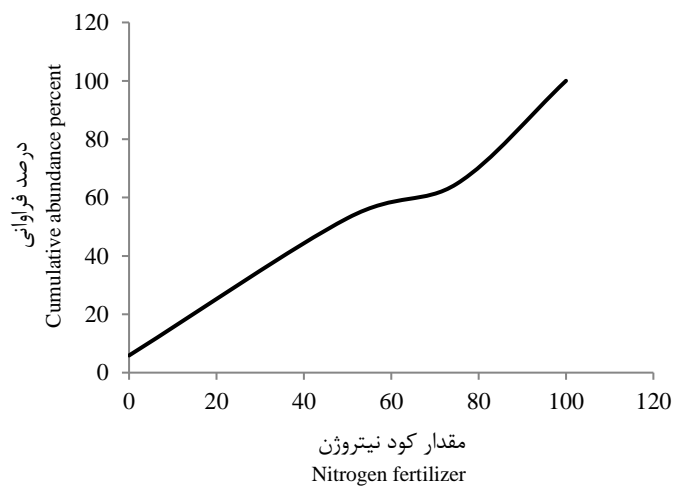
شکل ۲- درصد فراوانی تجمعی مقدار بذر مصرفی جو در مزارع مورد مطالعه

Figure 2- Cumulative abundance percent of the amount of barley seed consumed in the studied farms



شکل ۳- درصد فراوانی تجمعی و سن کشاورزان در منطقه مورد مطالعه

Figure 3- Cumulative abundance percent and age of farmers in the study area



شکل ۴- درصد فراوانی تجمعی و مقدار کود نیتروژن مصرفی

Figure 4- Cumulative abundance percent and amount of nitrogen fertilizer used

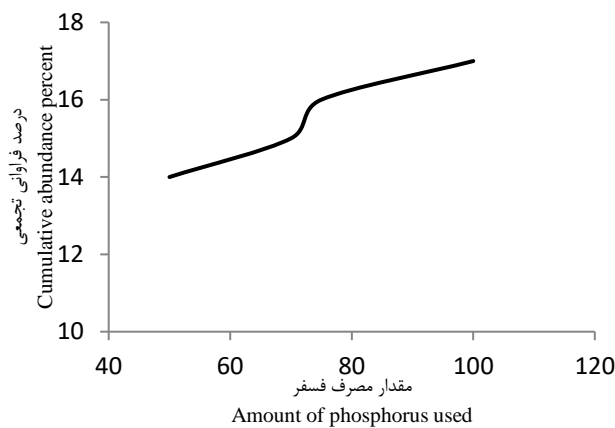
مقدار کود نیتروژن

حداقل از ۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن استفاده کردند (شکل ۴).

مقدار کود فسفر

منابع کودهای فسفره که کشاورزان استفاده کرده بودند شامل سوپرفسفات تریپل و سوپرفسفات ساده بود که تعداد کمی از کشاورزان از کود فسفر استفاده کرده بودند. دامنه مقدار مصرف کود فسفر تقریباً ۶۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در مزارع مورد بررسی متغیر بود (شکل ۵).

کشاورزان در مزارع مورد مطالعه، بسته به توان مالی و وضعیت کلی عناصر غذایی موجود در خاک منطقه از یک یا چند نوع کود و همچنین به دفعات مختلف از کودهای دسترس استفاده می‌کنند. با توجه به ماهیت کودهای نیتروژن‌دار به خصوص اوره، می‌بایست چندین نوبت در طی فصل رشد محصول مورد استفاده قرار گیرد تا عملکرد قابل انتظار حاصل شود. در مزارع مورد بررسی ۵۰ درصد کشاورزان



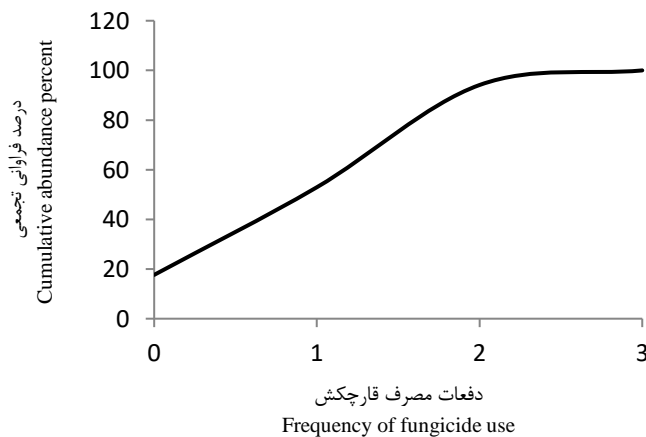
شکل ۵- درصد فراوانی تجمعی فسفر مصرف شده

Figure 5- Cumulative abundance percent of phosphorus used

دفعات مصرف قارچ‌کش

ناپذیری را به مزارع جو وارد می‌کند که مهم‌ترین بیماری در منطقه مورد بررسی، بیماری لکه خرمایی و زنگ زرد است که برای مبارزه با آنها از قارچ‌کش‌های تیلت، آلتوکمبی، فولیکور و فالکن استفاده می‌شود (شکل ۶).

به طور کلی در ۵۰ درصد مزارع مورد بررسی یک نوبت قارچ‌کش مصرف شده بود. در منطقه مورد مطالعه به دلیل رطوبت نسبتاً بالا شیوع بیماری‌های قارچی زیاد است و در بعضی از سال‌ها بشدت توسعه می‌یابد که خسارت جبران



شکل ۶- درصد تعداد دفعات مصرف قارچ‌کش در مزارع جو

Figure 6- Cumulative abundance percent usage in barley fields

مدل عملکرد

که در آن Y : عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، X_1 : دفعات کوددهی، X_2 : میزان فسفر مصرفی (کیلوگرم در هکتار)، X_3 : دفعات مصرف قارچ کش و X_4 : دفعات مصرف علف کش هستند. در جدول ۱ مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین دفعات کوددهی، میزان فسفر مصرفی (کیلوگرم در هکتار)، دفعات مصرف قارچ کش، دفعات مصرف علف کش و عملکرد واقعی آورده شده است.

از بین متغیرهای مورد بررسی، مدل (معادله نهایی رگرسیون) با چهار متغیر مستقل انتخاب شد که در جدول ۱ مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین متغیرهای انتخاب شده در مدل آورده شده است. این مدل ۶۸ درصد از کل تغییرات عملکرد را توجیه نمود ($P < 0.0001$) که به صورت زیر است.

(۱)

$$Y = 2795.8 + 265.2X_1 + 4.44X_2 + 173.7X_3 + 252.9X_4$$

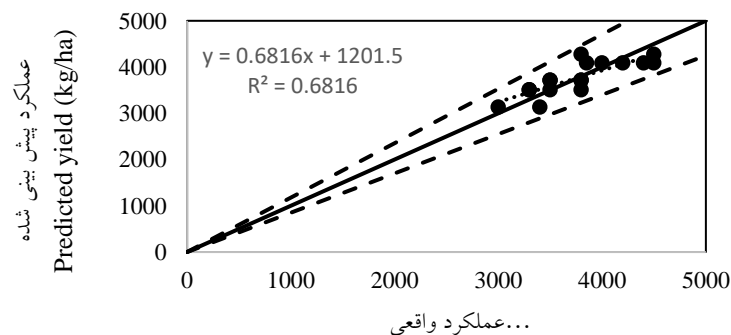
جدول ۱- مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین متغیرهای انتخاب شده در مدل CPA

Table 1- Minimum, maximum and average values of selected variables in the CPA model

متغیرها Variables	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean
دفعات کود دهی Fertilization frequency	۰	3	1.628
مقدار فسفر مصرفی Amount of phosphorus consumed	۰	100	36.428
دفعات مصرف قارچ کش Frequency of fungicide use	۰	3	1.257
دفعات مصرف علفکش Frequency of herbicide use	۰	2	0.8
عملکرد واقعی Actual yield (kg/ha)	3000	4500	3810

است. بر طبق مدل عملکرد، متوسط و حداکثر عملکرد به ترتیب ۳۸۱۰ و ۵۰۶۳ کیلوگرم در هکتار تخمین زده شده است که با متوسط و حداکثر عملکرد مشاهده شده قابل مقایسه می باشد (جدول ۱).

شکل ۷ رابطه بین عملکردهای واقعی مزارع و عملکرد تخمین زده شده توسط مدل تولید با ضریب همبستگی ۰/۶۸ را نشان می دهد. کل خلاً عملکرد جو و سهم هر یک از عوامل محدود کننده عملکرد نسبت به آن در جدول ۲ نشان داده شده



شکل ۷- رابطه بین عملکرد واقعی و پیش بینی شده. خطوط منقطع نشان دهنده اختلاف ۲۰ درصد بالا و پایین عملکرد مشاهده شده و پیش بینی شده هستند. خط وسط (ممتد)، خط ۱:۱ می باشد.

Figure 7- Relationship between actual and predicted performance. Dashed lines represent the top and bottom 20% difference between observed and predicted yield. The middle line (continuous) is the 1:1 line

۳۶۳/۸ کیلوگرم در هکتار) خلأ عملکرد شده بود (جدول ۲). هر گیاهی برای تولید محصول بیشتر به زمان مناسبی برای کوددهی نیاز دارد. اگر بهترین زمان کوددهی برای گیاه انتخاب نشود، کوددهی دیرتر یا زودتر باعث اثرات مضر و گاهی نابودی محصول در گیاه می‌شود.

گاهی استفاده چندین باره مقدار مشخصی از کود در زمان کوتاه برای به دست آوردن نتیجه بهتر، برعکس عمل کرده و باعث سوختن ریشه می‌شود. کود مازاد در اثر آبدهی و شسته شدن خاک به صورت نمک در خاک باقی می‌ماند و باعث شوری یا سمی شدن خاک می‌شود که سبب مشکلاتی در محصول دهی گیاه شده و به آن آسیب می‌زند. میزان درست کوددهی یک رویه اساسی در کشاورزی است. با توجه به اینکه کودها مسئول ۷۰ درصد از بازدهی محصول هستند؛ بهتر است، هرچه زودتر به بهینه‌سازی کود دهی پرداخته شود (Sang et al., 2019).

در مطالعه‌ای سهم کودهای شیمیایی در خلأ عملکرد گندم دیم در شرق استان گلستان در شهرستان کلاله بررسی شد، نتایج نشان داد که مصرف کود نیتروژن خالص تا ۵۸/۳ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش عملکرد دانه‌ی گندم شد و کاربرد بیشتر از این مقدار کود نیتروژن تأثیری بر عملکرد دانه گندم نداشت (Nobatiany et al., 2020).

کل خلأ عملکرد با وجود چهار متغیر دفعات کوددهی، مقدار فسفر مصرفی، دفعات مصرف قارچ‌کش و دفعات مصرف علف‌کش ۱۲۵۳ کیلوگرم در هکتار بود و مفهوم آن این است که میان عملکرد به دست آمده توسط کشاورز و آن مقدار عملکردی که با مدیریت زراعی مناسب کشاورز می‌توانست، برداشت کند، ۱۲۵۳ کیلوگرم در هکتار فاصله وجود داشت که با اعمال مدیریت‌های مناسب و اصولی می‌توان به آن رسید. در مطالعه‌ای بر روی خلأ عملکرد جو در مناطق اصلی کشت دیم جو (شمال شرقی، شمال غربی و غرب ایران) انجام شد، دریافتند که متوسط پتانسیل عملکرد جو دیم ۲۷۲۳ کیلوگرم در هکتار بود، که در مناطق مختلف بین ۱۰۷۲ تا ۴۰۰۲ کیلوگرم در هکتار بود. این در حالی بود که عملکرد واقعی در مناطق اصلی کشت جو دیم ایران بین ۶۱۵ تا ۳۱۲۵ کیلوگرم در هکتار با متوسط ۱۷۱۴ کیلوگرم در هکتار بود. به عبارتی خلأ عملکرد محاسباتی معادل ۵۳ تا ۸۲ درصد (متوسط ۶۳ درصد) بود. بنابراین با بهینه‌سازی مدیریت تولید، می‌توان تقریباً عملکرد جو را دو برابر کرد (Alsiti et al., 2021).

خلأ عملکرد حاصل از دفعات کود دهی

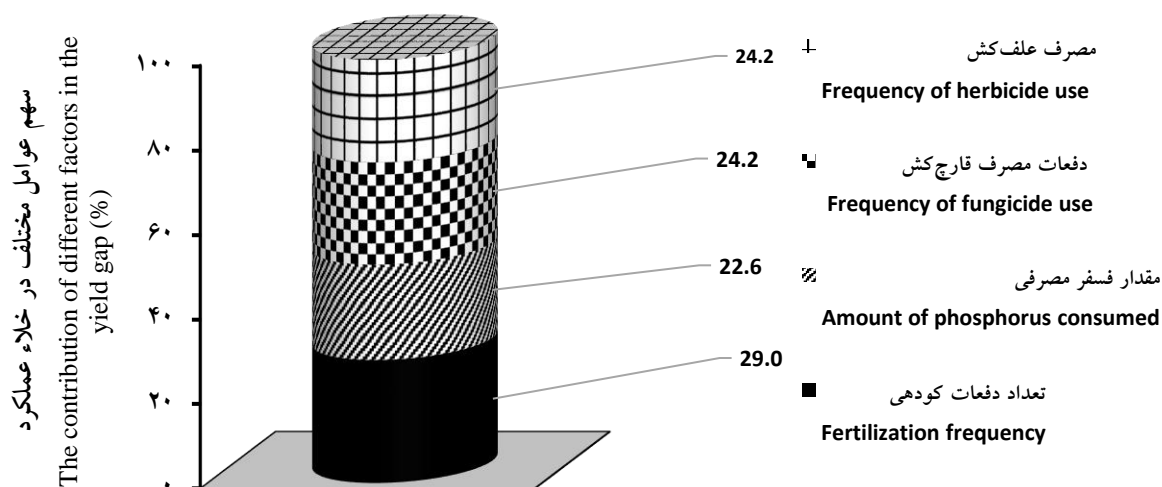
نتایج نشان داد که تعداد دفعات کوددهی سبب ۲۹ درصد

جدول ۲- مقدار عملکرد در حالت‌های متوسط و بهترین مقادیر صفات به همراه مقدار و درصد تغییر عملکرد ناشی از هر صفت

Table 2- Yield in state of the mean and the best amount of each trait in addition

متغیر Variable	ضریب Coefficient	مقادیر متغیر Amount of variables		عملکرد محاسبه شده با مدل Yield calculated with the model			خلأ عملکرد Gap yield
		میانگین Mean	بهینه Best	میانگین Mean	بهینه Best	تغییرات Gap	درصد تغییرات Gap%
عرض از مبدأ Intercept	2795.8	1	1	2795.8	2795.89	0	-
دفعات کود دهی Fertilization frequency	265.29	1.628	3	423.06	759.89	363.8	29
مقدار فسفر مصرفی Amount of phosphorus consumed	4.448	36.428	100	162.05	444.84	828.8	22.6
دفعات مصرف قارچ‌کش Frequency of fungicide use	173.73	1.257	3	218.42	521.23	302.8	24.2
دفعات مصرف علف‌کش Frequency of herbicide use	252.98	0.8	2	202.32	505.98	302.6	24.2
میانگین عملکرد Yield mean	-	3773	-	3810	5063	1253	100

خاک و کمبود فسفر قابل جذب برای گیاه خواهیم بود. همه کودهای فسفردار در همان سال اول توسط گیاهان جذب نمی‌شوند بلکه مقداری از آن در سال‌های بعد وارد فاز محلول خاک شده و مورد استفاده ریشه گیاهان قرار می‌گیرند (Masrahi et al., 2023). تقریباً ۷۰ درصد اراضی کشاورزی در کشور ایران از کمبود فسفر رنج می‌برند و کشاورزان حتماً باید برای افزایش محصول از کود فسفر استفاده کنند، معمولاً حد بحرانی فسفر ۱۵ پی‌پی‌ام در نظر می‌گیرند، درحالی‌که در استان گلستان در ۷۶/۷ درصد اراضی کشاورزی کمبود فسفر جهت کشت گندم گزارش شده است (Nobatiy et al., 2020). در تحقیقات انجام شده در شرق استان گلستان در مزارع گندم کمبود فسفر یکی از عوامل خلأ عملکرد گندم (۱۴/۹ درصد) گزارش شده است (Nobatiy et al., 2020).



شکل ۸- سهم عوامل مختلف در خلأ عملکرد جو در منطقه مورد مطالعه

Figure 8- the contribution of different factors in the barley yield gap in the study area

بالا در زراعت گندم و جو، بیماری‌های قارچی این محصولات هستند. در همین راستا نتایج تحقیقات بر روی گندم در شرایط استان گلستان نشان داد که عدم استفاده از قارچ‌کش نیز باعث پنج درصد (۲۰۸/۹ کیلوگرم در هکتار) خلأ عملکرد شده بود (Hajjarpoor & Kashiri et al., 2018).

خلأ عملکرد حاصل از مقدار فسفر مصرفی

مقدار فسفر مصرفی عاملی بود که کمترین سهم را در محدودیت عملکرد جو در مزارع بررسی شده داشت که باعث ۲۲/۶ درصد (۸۲۸/۸ کیلوگرم در هکتار) خلأ عملکرد شده بود (جدول ۲ و شکل ۸). فسفر رشد ریشه را تحت تاثیر قرار می‌دهد، به جذب مواد غذایی بیشتر، توسط گیاه کمک می‌کند، کمبود نیتروژن در خاک را متعادل، و به رسیدگی دلنه کمک می‌کند (Kong et al., 2023). از آنجا که تلفات اصلی در اثر رواناب سطحی و فرسایش خاک است، جهت تعیین بهترین زمان مصرف کود فسفر و دفعات مصرف آن، باید به نکاتی توجه داشت به عنوان مثال، استفاده از کود فسفر بالا، بخصوص در دست قیل از باران یا آبیاری سنگین، باعث هدر رفت بر اثر رواناب و فرسایش می‌شود. عنصر فسفر در زراعت و رشد غلات و به ویژه محصولات دلنه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. در صورت کشت متوالی یک محصول در مزرعه، شاهد کاهش حاصلخیزی

۳-۱۰- خلأ عملکرد حاصل از دفعات مصرف قارچ‌کش

نتایج نشان داد که تعداد دفعات مصرف قارچ‌کش سبب ۲۴/۲ درصد (۳۰۲/۸ کیلوگرم در هکتار) خلأ عملکرد شده بود (جدول ۲ و شکل ۸). به عبارتی با مصرف قارچ‌کش تا دو بار در طی فصل رشد محصول، عملکرد جو ۳۰۲/۸ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت. یکی از مهمترین موانع تولید و حصول عملکردهای

دانه‌ی کلزا (حدود ۱۱ درصد خلأ عملکرد) شد (Sekhvatifar et al., 2022).

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس یافته‌ها در ۳۸ مزرعه مورد مطالعه، از ۱۸ متغیر مورد بررسی، مدل نهایی با چهار متغیر مستقل انتخاب شد. در مدل عملکرد، عملکرد واقعی مزرعه و پتانسیل عملکرد، محاسبه شده با مدل به ترتیب برابر ۳۸۱۰ و ۵۰۶۳ کیلوگرم در هکتار و میزان خلأ عملکرد برابر ۱۲۵۳ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. با اصلاح عوامل ایجاد کننده خلأ عملکرد که در این مطالعه به آن پرداخته شده است، لازم است پایش و ارزیابی مدیریت زراعی در مزارع کشاورزان به طور پیوسته صورت گیرد و میزان خلأ عملکرد و عوامل مدیریتی ایجاد کننده آن، شناسایی و برطرف شوند. در این پژوهش، از میان تمامی مدیریت‌های زراعی رایج کشاورزان، مواردی که در خلأ عملکرد تأثیر بیشتری داشته و در مرحله اول نیاز به تغییر و بهبود دارند، مورد اشاره قرار گرفته‌اند. بنابراین، توصیه‌های این پژوهش، مکمل سایر مدیریت‌های توصیه شده و معمول است.

خلأ عملکرد حاصل از دفعات مصرف علف‌کش

نتایج نشان داد که تعداد دفعات مصرف علف‌کش سبب ۲۴/۲ درصد (۳۰۳/۶ کیلوگرم در هکتار) خلأ عملکرد شده بود (جدول ۲ و شکل ۸). با توجه به این که علف‌های هرز مخصوصاً از طریق رقابت در کاهش عملکرد گیاهان زراعی نقش مؤثری دارند و تأثیر استفاده از علف‌کش در افزایش محصولات کشاورزی ثابت شده است، انتخاب علف‌کشی که بتواند باعث کنترل مناسب علف‌های هرز شود، بسیار با اهمیت می‌باشد. رویش علف هرز در مزارع کشت شده و استفاده از انواع علف‌کش‌ها به عنوان یک معضل بزرگ در تولید محصولات کشاورزی مطرح است. به‌طور کلی می‌توان گفت، هر گیاه ناخواسته‌ای که هدف تولید آن نباشد، در یک مزرعه شروع به رشد کند می‌تواند به عنوان علف هرز تلقی گردد و وجود علف‌های هرز در مزارع گندم و جو باعث کاهش عملکرد و وزن هزار دانه می‌شود که معمولاً برای کنترل آن‌ها باید از علف‌کش‌ها استفاده کرد (Mueller et al., 2023). نتایج یک پژوهش روی مزارع کلزا در شرق استان گلستان توسط نشان داد که تراکم علف هرز در مزارع کلزا باعث کاهش حدود ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد

References

- Alsiti, O., Zeinali, E., Soltani, A. and Torabi, B., 2021. Estimation of yield gap and the potential of rainfed barley production increase in Iran. *Journal of Crops Production*, 13(3), pp.41–60. [In Persian]. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.16896.2250>
- Amini Mandi, V., Nakhzari Moghaddam, A., Rahemi Karizaki, A. and Naeemi, M., 2022. Investigation of the effective factors on yield gap of rice in Mazandaran province. *Journal of Crops Improvement*, 24(1), pp.205–217. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jci.2022.320259.2527>
- Beza, E., Silva, J.V., Kooistra, L. and Reidsma, P., 2017. Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *European Journal of Agronomy*, 82, pp.206–222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.016>
- Dastan, S., Nezamzadeh, S.E., Soltani, A. and Ajam Norouzi, H., 2019. Evaluation of yield gap associated with crop management in canola production by CPA method in Neka region. *Applied Field Crops Research*, 32(02), pp.76–107. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/aj.2019.120656.1251>
- Forough Ayneh Deh, A., Biabani, A., Rahemi Karizki, A. and Rassam, Q., 2019. Investigation of physiological characteristics affecting the yield improvement of rapeseed cultivars. *Journal of Field Crops Research*, 17(1), pp.53–73. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v17i1.63733>
- Habib, E., Niknezhad, Y., Fallah, H., Dastan, S. and Barari Tari, D., 2019. Estimation of Yield Gap of Rice by Comparative Performance Analysis (CPA) in Amol and Rasht Regions. *Journal of Plant Productions*

- (*Agronomy, Breeding and Horticulture*), 42(4), pp.551-562. [In Persian].
<https://doi.org/10.22055/ppd.2019.26083.1607>
- Haghshenas, H., Soltani, A., Ghanbari, A., Ajam Norouzi, H. and Dastan, S., 2018. Identification of effective agronomic traits on yield of local rice cultivars using multiple regression models. *Journal of Agroecology*, 8(2), pp.13-28. [In Persian]
- Hajjarpoor, A. and Kashiri, H., 2018. Determination of the optimum managements ranges in order to increasing wheat yield in Golestan province. *Journal of Crops Improvement*, 19(3), pp.577-590. [In Persian].
<https://doi.org/10.22059/jci.2017.60463>
- Halalkhor, S., Dastan, S., Soltani, A. and Ajam Norouzi, H., 2018. Documenting the process of rice production and yield gap associated with crop management in local cultivars of rice production (case study: Mazandaran province, Babol region). *Journal of Crops Improvement*, 20(2), pp.397-414. [In Persian].
<https://doi.org/10.22059/jci.2018.237805.1795>
- Kong, F., Ling, X., Iqbal, B., Zhou, Z. and Meng, Y., 2023. Soil phosphorus availability and cotton growth affected by biochar addition under two phosphorus fertilizer levels. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(1), pp.18–31. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1955355>
- Masrahi, A.S., Alasmari, A., Shahin, M.G., Qumsani, A.T., Oraby, H.F. and Awad-Allah, M.M., 2023. Role of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing bacteria in improving yield, yield components, and nutrients uptake of barley under salinity soil. *Agriculture*, 13(3), pp.537.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13030537>
- Matourian, H., Joghian, A.K., Telavat, M.M., Siadat, S. A. and Torabi, B., 2022. Analyzing rapeseed (*Brassica napus* L.) yield gap using comparative performance analysis (CPA) in Khorramshahr. *Journal of Agroecology*, 14(2), pp.275–289. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/agry.2021.67226.0>
- Mojarrad, F., Farhadi, B. and Kheyri, R., 2014. The role of climatic factors in determining the start date of planting and growing period of colza with application of CropSyst Model, case study: Coastal provinces of Caspian Sea in Iran. *Physical Geography Research*, 4(4), pp.463–476. [In Persian].
<https://doi.org/10.22059/jphgr.2014.52997>
- Mueller, N.G., Horton, E.T., Belcher, M.E. and Kistler, L., 2023. The taming of the weed: Developmental plasticity facilitated plant domestication. *PLOS ONE*, 18(4), e0284136. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284136>
- Nobatiany, M.S., Rahemi Karizaki, A., Biabani, A. and Mansourirad, A., 2020. Documentation of production process and determination of limiting factors of wheat yield by CPA method in Kalaleh County. *Crop Production*, 22(3), pp.261–272. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jci.2020.284310.2237>
- Sang, L. Z., Yan, X. P., Wall, A., Wang, J. and Mao, Z., 2016. CPA calculation method based on AIS position prediction. *The Journal of Navigation*, 69(6), pp.1409–1426. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000229>
- SekhavatiFar, Sh., Rahemi Karizaki, A., Moghaddam, N. and Mollashahi, M., 2020. Identifying oilseed rape limiting factors by means of performance comparison analysis. *Journal of Crops Improvement*, 22(1), pp.13–25. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jci.2019.280944.2212>

- Shirinzadeh, A., Heidari Sharif Abad, H., Nour Mohammadi, G., Haravan, E. M. and Madani, H., 2018. Yield gap associated with crop management in wheat (case study: Ardabil Province-Parsabad Moghan). *Egyptian Journal of Agronomy*, 40(3), pp.223–246. <https://doi.org/10.21608/agro.2018.3708.1103>
- Soltani, A., 2007. *Application of SAS in statistical analysis*. Mashhad Academic Jihad Publications. [In Persian].
- Soltani, A., Alimagham, M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi, S., Vadez, V., Sinclair, T. R. and van Ittersum, M. K., 2020. Modeling plant production at country level as affected by availability and productivity of land and water. *Agricultural Systems*, 183, 102859. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102859>
- Soltani, A., Hajjarpoor, A. and Vadez, V., 2016. Analysis of chickpea yield gap and water-limited potential yield in Iran. *Field Crops Research*, 185, pp.21–30. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.015>
- Van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittone, P. and Hochman, Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance: A review. *Field Crops Research*, 143, pp.4–17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Yousefian, M., Dastan, S., Soltani, A. and Ajam Norouzi, H., 2021. Identification of production constraining factors of local rice cultivars production in Sari region. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(2), pp.67–82. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.277054.654585>
- Yu, X., Zhang, J., Zhang, Y., Ma, L., Jiao, X., Zhao, M. and Li, J., 2023. Identification of optimal irrigation and fertilizer rates to balance yield, water and fertilizer productivity, and fruit quality in greenhouse tomatoes using TOPSIS. *Scientia Horticulturae*, 311, 111829. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111829>

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 53-76

Morpho-physiological and essential oil of *Satureja mutica* Fisch. affected by elicitors and irrigation regimes

Mehrab Yadegari ^{*a}

^a Research Center of Nutrition and Organic Products, Shk.C., Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

*Corresponding Author: mehrabyadegari@gmail.com

Received: 18 December 2023 Accepted: 16 April 2024

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.431219.1389

How to cite this article:

Yadegari, M., 2025. Morpho-physiological and essential oil of *Satureja mutica* Fisch. affected by elicitors and irrigation regimes. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 53-76. <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.431219.1389>

Abstract

Introduction: *Satureja mutica* commonly belongs to the family Lamiaceae, is one of the important species in Iran. This plant is rich in essential oil, flavonoids, monoterpene glycosides, trypanocidal terpenoids. The main compounds of the essential oil from *S. mutica* collected from natural habitats are alpha-pinene, thymol, Beta-thujone, carvacrol, alpha-terpinene, gamma-terpinene and germacren-d. The environmental factors cause changes in the growth, quantity, and quality of active substances (such as alkaloids, glycosides, steroids and volatile oils) in the medicinal and aromatic plants. Among environmental stresses, water deficit stress plays an important role in the biosynthesis of secondary metabolites in medicinal and aromatic plants in arid and semi-arid regions like Iran. Drought stress has detrimental effects on plants growth and yield and can upset the balance between the antioxidant defense system and free radicals by stimulating a series of biochemical reactions, where free radicals cause cell damage. In sustainable production systems of the medicinal and aromatic plants, stable quantitative and qualitative functions can be achieved under conditions of environmental stress and it is possible to improve the production of secondary metabolites in these plants under adverse environmental conditions. Therefore, this study was done to evaluate the organic and alcoholic elicitors on the physiological and phytochemical characters of *S. mutica* to determine and introduce the best elicitor under water stress.

Materials and Methods: This investigation was done from spring (May) 2022 to fall (September) 2023 in Shahrekord, Iran (latitude. 32°20' N, longitude. 50°51' E, altitude. 2061 m). Based on the Köppen climate classification, the climate of the area of study is classified as cold and semiarid. The present study was conducted in a randomized complete block design (RCBD) with three replications to investigate the effect of foliar application of different elicitors of organic (chitosan, salicylic acid, phenylalanine) and alcoholic (ethanol, methanol, acetone) and control level (without any spraying). Three irrigation regimes (3, 6, 9 day interval) in main plots and foliar application of elicitors in sub plots were done. In each year, treatments were applied in 3 stage (before flowering, beginning of flowering and flowering in 50% completing) and harvesting were done in complete flowering. The essential oils were extracted by hydro-distillation and analyzed by using GC/MS.

Results and Discussion: According to obtained results, applied elicitors significantly influenced the morpho-physiological and phytochemical characters of *Satureja mutica*. In two years, the highest



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

chlorophyll content (1.29-1.31 mg.g⁻¹FW) and total phenol content (2.23-2.11 mg.g⁻¹FW) were obtained in chitosan (0.25 mg.l⁻¹), phenylalanine (1 mg.l⁻¹) and ethanol (10 %) treatments by irrigation regimes 3 and 6 day interval, respectively. The highest essential oil contents (1.31-1.21 %) were obtained from the plants treated by chitosan (0.25 mg.l⁻¹), ethanol (10%) and salicylic acid (1.5 mM) by irrigation regime 3 day interval. According to the biennial results of the chemical analysis of the essential oils from by GC/MS, the most important chemical compounds that determine the quality of *S. mutica* essential oil included alcoholic monoterpenes such as Thymol (41.12-41.3 %), P-cymene (32.1-33.9 %), gamma-terpinene (18.91-19.11 %), Carvacrol (3.12-3.91 %) and Alpha-terpinene (3.12-2.93 %) made the most components of essential oil plants. Thymol belonging to phenolic monoterpenoid was the predominant constituent of essential oil of *Satureja mutica*. Proline content in irrigation regime of 9 day interval more than other regimes and in other hand, the irrigation regime of 3 day interval with chitosan and ethanol treatments was leaser than other treatments. Foliar application of chitosan (0.25 mg.l⁻¹), ethanol (10 %) and salicylic acid (1.5 mM) significantly increased the monoterpene alcohols compounds in essential oils of *S. mutica*.

Conclusion: Morpho-physiological and essential oil of *Satureja mutica* had significant differences by elicitors and irrigation regimes. Foliar application of chitosan, ethanol and salicylic acid significantly increased the cyclic monoterpene alcohols compounds in essential oils of *S. mutica* so that the content of these compounds in treated plants by elicitors approximately 65% was more than the control plants. Finally, the application of chitosan at 0.25 gr.l⁻¹ can be a good strategy to improve morpho-physiological characters and essential oil quantity and quality of *S. mutica* in cold and semi-arid climates.

Keywords: Chitosan, Medicinal plant, P-cymene, Salicylic acid, Thymol

ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و اسانس گیاه دارویی مرزه جنگلی (*Satureja mutica* Fisch.) تحت تأثیر محرک‌های رشدی و دوره‌های آبیاری

مه‌راب یادگاری^{۱*}

۱- مرکز تحقیقات تغذیه و محصولات ارگانیک، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

* مسئول مکاتبه: mehrabiyadegari@gmail.com

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.431219.1389

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

چکیده

مرزه جنگلی (*Satureja mutica*) از گیاهان دارویی با ارزش و بومی ایران و از خانواده نعنائیان است. این پژوهش از بهار (اردیبهشت ماه) ۱۴۰۱ تا پاییز (مهرماه) ۱۴۰۲ در شهرکرد به صورت کرت‌های یکبار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گردید. تیمارهای دوره آبیاری (۳، ۶ و ۹ روز یکبار) در کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی برگ‌های محرک‌های آلی (کیتوزان، اسید سالیسیلیک و فنیل آلانین) و الکل (متانول، اتانول و استون) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. در هر سال، در سه مرحله (قبل از گلدهی، شروع گلدهی و ۵۰ درصد گلدهی) محلول‌پاشی انجام شد و در زمان گلدهی اقدام به برداشت شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، محرک‌های آلی و الکل به‌طور معنی‌داری بر صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس مرزه جنگلی تأثیر داشتند. بالاترین محتوای کلروفیل (۱/۲۹-۱/۳۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و فنل (۲/۲۳-۲/۱۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در تیمارهای کیتوزان (۰/۲۵ گرم در لیتر) و فنیل آلانین (۱ گرم در لیتر) تحت دوره آبیاری ۳ و ۶ روز به دست آمد. بیشترین میزان اسانس (۱/۲۱-۱/۳۱ درصد) در گیاهان تحت تیمار با کیتوزان (۰/۲۵ میلی‌گرم در لیتر)، اتانول (۱۰ درصد) و اسید سالیسیلیک (۱/۵ میلی‌مولار) با دوره آبیاری ۳ روز یکبار وجود آمد. مونوترپن‌های حلقوی عامل اصلی تعیین‌کننده کیفیت شامل تیمول (۴۱/۱۲-۴۱/۳ درصد)، پی-سایمن (۳۲/۱-۳۳/۹ درصد)، گاما-ترپینن (۱۸/۹۱-۱۹/۱۱ درصد)، کارواکرول (۳/۳-۹۱/۱۲ درصد)، آلفا-ترپینن (۳/۱۲-۲/۹۳ درصد) بودند. استفاده از کیتوزان با غلظت ۰/۲۵ گرم در لیتر می‌تواند نقش مؤثری در بهبود صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس مرزه جنگلی تحت شرایط اقلیمی سرد و نیمه خشک داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: اسید سالیسیلیک، پارا-سیمن، تیمول، کیتوزان، گیاه دارویی

مقدمه

اسهال کاربرد دارد و همچنین هضم‌کننده غذا، ادرارآور، خلط‌آور، ضد درد، ضد سرطان، محرک و مقوی معده است (Momtaz and Abdollahi, 2008). مهم‌ترین مواد متشکله اسانس، ترکیباتی نظیر تیمول، کارواکرول، پارا-سیمن، گاما-ترپینن، جرماکرن-دی، بتا-توزان و آلفا-ترپینن می‌باشند (Yadegari, 2022).

ویژگی‌های رشد و عملکرد گیاهان دارویی و معطر از جمله مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی، متأثر از عوامل ژنتیکی، تغییرات محیطی و مدیریتی و اثرات متقابل آنها است (Thakur and Kumar, 2020). با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه خشک، تنش آب یکی از مسائل محدودکننده رشد و نمو گیاهان است. تنش آب منجر به افزایش مقادیر اسانس گیاهان دارویی آویشن دانایی (*T. daenensis* L.)، آویشن باغی (*T. vulgaris* L.) (Askary et al., 2018)، ترخون (*Artemisia dracunculus*) (Mumivand, et

خانواده نعنائیان، یکی از بزرگترین خانواده‌های گیاهی است که تاکنون ۲۰۰ جنس و ۲۰۰۰ گونه متعلق به آن شناخته شده است. در ایران این جنس ۱۲ گونه علفی یکساله و چند ساله دارد که ۸ گونه آن مختص ایران است. این گونه‌ها بومی مناطق مدیترانه شرقی و غرب آسیا هستند و در مناطق با اقلیم مرطوب و خاک‌های عمیق تا مناطق با اقلیم خشک آفتابی و خاک‌های سنگلاخی رشد می‌کنند. از این خانواده، مرزه جنگلی با نام علمی *Satureja mutica* از گیاهان دارویی با ارزش و بومی ایران است. مرزه جنگلی گیاهی بوته‌ای و نسبتاً چوبی، با ارتفاع ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و شاخه‌های گل‌دهنده بسیار زیاد است. حجم رشدی گیاه نیز زیاد بوده و از کرک‌های کوتاه خاکستری رنگ پوشیده شده و رویشگاه طبیعی این گیاه در شمال ایران است (Mozaffarian, 2008). گیاه دارویی مرزه در درمان دردهای عضلانی، کرامپ، تهوع، بیماری‌های عفونی و

باعث بیوسنتز و انباشت متابولیت‌های ثانویه و همچنین تغییرات فیزیولوژیک و مورفولوژیک در گیاهان می‌شوند (Alavi Samany et al., 2022; Fooladi Vanda et al., 2019). افزایش راندمان مصرف آب، کاهش تنفس نوری، افزایش سطح دوام برگ و در نهایت افزایش عملکرد از اثرات این محرک‌های رشدی است (Kheiri et al., 2020; Yadegari, 2018). تیمار گیاهان با محرک‌ها، مشابه حمله عوامل بیماری‌زا، موجب بروز آرایشی از عکس‌العمل‌های دفاعی، از قبیل تجمع مجموعه‌ای از متابولیت‌های ثانویه‌ی دفاعی در گیاه می‌شود. محرک‌های رشد در گیاه به مقدار کمی وجود دارند، اما برای رشد و نمو گیاه ضروری بوده و رشد و نمو گیاهان در معرض آن‌ها تغییر می‌کند (Thakur and Kumar, 2020).

از محرک‌های رشدی دارای پایه آلی می‌توان اسید سالیسیلیک، فنیل آلانین و کیتوزان را نام برد. کیتوزان از ترکیبات اصلی دیواره سلولی بسیاری از گونه‌های قارچی، میگو و خرچنگ است که برای بهبود بخشیدن به فرایند ساخت متابولیت‌های ثانویه گیاهان دارویی تأیید شده است (Dzung, 2011; Falcon-Rodriguez et al., 2009).

از صفات کیتوزان می‌توان به دارا بودن خاصیت ضدویروسی، ضد قارچی، ضدباکتریایی، غیرسمی، غیر آلرژیک بودن، امکان تشکیل ترکیبات پیچیده با یون‌های فلزی و هیدروکربن آروماتیک، ابرجاذب بودن، قابلیت فوق‌العاده برای تبدیل به مواد و مشتقات متعدد در شرایط مختلف، انحلال در محلول‌های اسید آلی ضعیف مانند اسید لاکتیک و اسید استیک و افزایش عملکرد اشاره نمود (Dzung, 2011).

در این راستا کیتوزان باعث افزایش مقادیر آرتیمیزین درمنه (*Artemisia annua*) (Caiyan et al., 2011)، فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و فنیل‌آلانین آمونیلایز توتون (*Nicotiana tabacum*) (Falcon-Rodriguez et al., 2009)، لیگنان و فنیل پروپانویید کتان سفید (*Linum album*) (Esmailzadeh bahabadi and Sharifi et al., 2013)، عملکرد اسانس گیاهان دارویی ریحان (*Ocimum basilicum*) و بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) (Hawrylak-Nowak et al., 2021)، مرزه (*Satureja hortensis* L.) (Alizadeh et al., 2020)، مرزنگوش (*Origanum vulgare*) (Heng et al., 2012)، نعناع فلفلی

(*Salvia officinalis*)، مریم‌گلی (*al., 2021*)، جعفری (*Petroselinum crispum*) و (*Tropaeolum majus*) (Reham et al., 2016)، اسانس و ماده مؤثره تیمول، مالون دی‌الدئید و فنل همیشه بهار مکزیکی (*Tagetes minuta*) (Babaei et al., 2021)، اسیدهای فنلیک، فلاونوئید و کربوهیدرات‌های محلول در آب در چچم (*Lolium multiflorum*) و علف بره (*Festuca arundinacea*) (Fariaszewska, et al., 2020)؛ کاهش پتانسیل آب برگ، هدایت روزنه‌ای، فتوسنتز خالص، تعرق و افزایش سزکویی‌ترین‌های مریم‌گلی (*Salvia dolomitica* Codd) (Caser et al., 2019) می‌شود. این تنش منجر به افزایش مقادیر آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز دیسموتاز و پرولین گیاه سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) (Hayati et al., 2021)، آنزیم آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز گیاه بادرشجویه (*Dracocephalum moldavica*) (Ghanbarzadeh et al., 2019) شده است.

گیاهان تحت تنش خشکی متابولیت‌هایی تولید می‌نمایند که از آنها در مقابل رادیکال‌های آزاد از جمله اکسیژن رادیکال محافظت نموده و از کاهش فتوسنتز جلوگیری می‌نمایند (Albergaria et al., 2020). در تنش خشکی اسیدهای آمینه، قندها و متابولیسم تحت تأثیر قرار می‌گیرند. از آنجا که تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان به‌وسیله عوامل محیطی تغییر می‌یابد و تنش رطوبتی نیز عامل مؤثری در کاهش رشد و همچنین ساخت ترکیبات طبیعی گیاهان دارویی می‌باشد (Zandalinas et al., 2017)، لذا ارائه‌ی روش‌هایی که گیاه بتواند ماده مؤثره‌ی بیشتر تولید نماید، ضروری به نظر می‌رسد که باید به طور کامل مورد ارزیابی قرار گیرد. از جمله روش‌هایی که به منظور افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه از جمله ترپنوئیدها به کار می‌رود، استفاده از محرک‌های زیستی و غیرزیستی است (Esmailzadeh bahabadi and Sharifi, 2013; Ghasemi Pirbalouti et al., 2017).

کاربرد محرک‌های رشدی به میزان محدود و در غلظت‌های پایین، ساخت ترکیبات خاصی را در سلول زنده، تحریک یا بهبود بخشیده و زمان دستیابی به مقادیر بالای متابولیت‌های ثانویه را کاهش می‌دهد. محرک‌های رشدی، ترکیباتی با منشأ زیستی یا غیرزیستی هستند که از طریق القای سیستم دفاعی،

ترکیبات ثانویه آویشن باغی (*Thymus vulgaris*) (Mousavi et al., 2021) شده است.

با توجه به بررسی منابع، تاکنون تحقیق جامعی راجع به اثرگذاری محلول‌پاشی اتانول، متانول و استون (محرک‌های الکلی) و اسید سالیسیلیک، فنیل آلانین و کیتوزان (محرک‌های آلی) بر صفات مورفوفیزیولوژیکی و اسانس مرزه جنگلی انجام نشده است. این پژوهش در جهت یافتن بهترین محرک رشدی برای بدست آوردن بالاترین مقادیر صفات مورفوفیزیولوژیکی و کمیت و کیفیت اسانس مرزه جنگلی انجام شد.

مواد و روش‌ها

طرح تحقیق: پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی پژوهشی شهرکرد با مشخصات عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۰۶۱ متر از سطح دریا، در طی سال‌های زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ انجام گردید. خصوصیات اقلیمی و خاکشناسی منطقه در جدول ۱ و خصوصیات آب مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. تحقیق حاضر به صورت کرت‌های یکبار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در جهت ارزیابی محرک‌های رشدی آلی (کیتوزان، اسید سالیسیلیک و فنیل آلانین) و الکلی (اتانول، متانول و استون) به همراه شاهد تحت تنش آبی بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی، اسانس و ترکیبات اسانس گیاه دارویی مرزه جنگلی انجام گردید. تیمارهای دوره آبیاری (۳، ۶ و ۹ روز یکبار) منطبق بر میزان تبخیر از تشت تبخیر کلاس A به ترتیب در سه سطح ظرفیت مزرعه، ۵۰ درصد و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی (Yadegari, 2022) در کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی برگ‌گی محرک‌های آلی (کیتوزان، اسید سالیسیلیک و فنیل آلانین) و الکلی (متانول، اتانول و استون) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. نشاء‌های ۴-۶ برگ‌گی مرزه جنگلی تهیه شده از شرکت پاکان بذر اصفهان، در سال اول در تاریخ ۱۵ اردیبهشت ماه و در سال دوم در ۲۰ اردیبهشت ماه در کرت‌های آزمایشی کاشت شدند و بلافاصله آبیاری انجام شد. فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

(*Mentha piperita L.*) (Ahmad et al., 2017)، آویشن دنیایی (*Thymus daenensis*) (Emami-Bistgani et al., 2017) و صفات مورفولوژیکی گونه‌های از گیاه مرزنگوش (*Greek oregano*) (Heng et al., 2012) شده است. از دیگر محرک‌های آلی اسید سالیسیلیک است که کاربرد آن منجر به افزایش مقدار اسانس و تحمل به خشکی گیاهان دارویی آویشن دنیایی (*Thymus daenensis Celak*) (Abdi et al., 2022)، مریم‌گلی (*Salvia officinalis*) (Yadegari, 2018)، بومادران (*Achillea millefolium L.*) (Gorni et al., 2020)، زرین گیاه (*Dracocephalum kotschy Boiss*) (al., 2020)، گونه‌های آویشن (*Thymus vulgaris* و *Thymus kotschyanus*) (Shaykh-Samani et al., 2023) و گیاه (*Thymbra spicata L.*) (Mohammadi et al., 2019) و افزایش مقادیر فنیل پروپانوییدی کنگر فرنگی (*Cynara scolymus*) (Zamani et al., 2016) شده است.

محلول‌پاشی توأم اسید سالیسیلیک، کیتوزان و فنیل آلانین، منجر به افزایش اسانس و ترکیبات اسانس گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis L.*) (Poorghadir et al., 2020) و گل محمدی (*Rosa damascena Mill.*) (Rajabzadeh et al., 2023) شده است.

از جمله محرک‌های الکلی اثربخش بر رشد و نمو گیاه می‌توان اتانول، متانول و استون را نام برد. متانول به صورت فرم آلدهید و دی‌اکسید کربن در گیاه، اکسید شده و به صورت اسیدهای آمینه (سرین و متیونین) و کربوهیدرات‌ها، در بافت‌های مختلف گیاهان سنتز می‌شوند. افزایش راندمان مصرف آب، کاهش تنفس نوری، افزایش سطح و دوام برگ و در نهایت افزایش عملکرد از اثرات این محرک‌های الکلی است (Kheiri et al., 2020). محلول‌پاشی اتانول و متانول منجر به افزایش طول عمر گل و برگ گیاه سوسن (*Alstroemeria hybrida*) (Yaghoubi Kiaseh and Yadegari, 2015)، افزایش ترکیبات ثانویه و موثره ریحان (*Ocimum basilicum c.v.*) (Keshkeni et al., 2018)، افزایش تحمل به شوری در گیاه ژرانیوم (*Pelargonium graveolens*) (Vojodi Mehrabani, 2019)، افزایش ماده خشک و میزان

جدول ۱- مشخصات خاکشناسی و اقلیمی محل پژوهش

Table 1- Physicochemical and climatic properties of experimental field

خصوصیات	۱۴۰۱	۱۴۰۲
Characters	2022	2023
بافت	Clay loam	
Texture		
فسفر	82	83
P (ppm)		
پتاسیم	209.2	212
K(ppm)		
نیتروژن	0.09	0.08
N (ppm)		
هدایت الکتریکی	0.41	0.42
EC (ds.m ⁻¹)		
کربن آلی	0.77	0.85
Organic Carbon (%)		
اسیدیتته	7.4	7.3
pH		
متوسط بارش	311.1	309.3
Average rainfall (mm)		
متوسط دما	11.6	11.2
Average temperature (C ⁰)		
متوسط بیشینه دما	22.6	21.8
Average maximum temperature (C ⁰)		
متوسط کمینه دما	-12.4	-12.1
Average minimum temperature (C ⁰)		

جدول ۲- مشخصات آب مورد استفاده جهت آبیاری

Table 2- characters of used water for irrigation

اسیدیتته هدایت الکتریکی کل مواد جامد محلول سدیم پتاسیم کلسیم منیزیم کلر بی کربنات کربنات سولفات کادمیم آهن مس منگنز روی نیترات														TDS	EC	pH
NO3	Zn	Mn	Cu	Fe	Cd	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	Cl	Mg	Ca	K	Na	میلی گرم در لیتر	میلی زیمنس بر متر	
میلی اکی والان در لیتر														میلی گرم در لیتر	میلی زیمنس بر متر	
meq/l														mg/l	ms/m	
24.55	0.001	0.001	0.001	0.008	0	0.001	0.22	3.44	0.93	1.45	2.31	0.18	0.543	245.2	366	7.4

۴۱۴/۳۶ گرم، از آن، ابتدا در الکل اتانول ۷۰ درصد حل نموده و سپس با آب، به حجم ۱۰۰۰ میلی لیتر رسانده شد. برای تهیهی کیتوزان ۰/۲۵ و ۰/۵۰ گرم در لیتر، به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵۰ گرم کیتوزان در یک لیتر آب حل شد. در هر سال، در سه مرحله (قبل از گلدهی، شروع گلدهی و ۵۰ درصد گلدهی) محلول پاشی انجام شد.

برداشت نمونه‌ها: کرت‌ها شامل ۶ ردیف به طول ۶ متر بود که ۲ ردیف کناری به عنوان اثرات حاشیه‌ای در زمان برداشت حذف گردیدند. نمونه‌های گیاهی، در زمان گلدهی کامل به طور جداگانه از هر کدام از تیمارهای تحت آزمایش در سال اول در ۲۴ مرداد ماه و در سال دوم در ۲۸ مرداد ماه جمع

مشخصات تیمارها: طی دو سال زراعی تیمارهای پایه الکلی شامل متانول (۱۰ و ۲۰ درصد)، اتانول (۱۰ و ۲۰ درصد) و استون (۱۰ و ۲۰ درصد) و پایه آلی شامل کیتوزان (۰/۲۵ و ۰/۵ گرم در لیتر)، اسید سالیسیلیک (۱/۵ و ۳ میلی مولار) و فنیل آلانین (۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر) و تیمار شاهد (بدون هر نوع محلول پاشی) برای این پژوهش انتخاب شد. برای تهیهی محلول فنیل آلانین، با حل کردن به ترتیب یک گرم و ۲ گرم در یک لیتر آب، محلول‌های مورد نظر به دست آمد. با توجه به جرم مولکولی اسید سالیسیلیک (۱۳۸/۱۲) گرم بر مول، برای تهیه اسید سالیسیلیک ۱/۵ میلی مولار، ۲۰۷/۱۸ گرم و برای تهیه محلول اسید سالیسیلیک ۳ میلی مولار،

(میلی لیتر) × پرولین عصاره (میکروگرم در میلی لیتر) × [وزن نمونه (گرم) / ۵]

میزان فنل کل: محتوای ترکیبات فنل کل با استفاده از معرف فولین - سیوکالتو اندازه‌گیری شد. ابتدا به ۰/۲ میلی لیتر از عصاره‌های مختلف یا محلول استاندارد گالیک اسید (۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر)، ۱/۸ میلی لیتر آب دوبار تقطیر، ۰/۲ میلی لیتر معرف فولین - سیوکالتو (رقیق شده با نسبت ۱ به ۱۵) اضافه و به خوبی مخلوط گردید. پس از گذشت ۵ دقیقه ۰/۲ میلی لیتر محلول بیکربنات سدیم ۷ درصد و ۰/۸ میلی لیتر آب دوبار تقطیر به محلول اضافه شده، ۹۰ دقیقه در دمای اتاق و شرایط تاریکی نگهداری شد. سپس جذب نمونه‌ها در ۷۵۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر ساخت کشور آمریکا مدل Perkin elmer قرائت و محتوای ترکیبات فنلی کل عصاره‌ها بر حسب میلی گرم اسید گالیک به گرم وزن خشک اندام هوایی محاسبه گردید (Marinova et al., 2005).

اسانس‌گیری: پس از برداشت، به منظور محافظت نوری نمونه‌ها و حداقل آسیب به کیفیت اسانس، ساختارهای هوایی در پاکت‌های کاغذی جمع‌آوری شدند. به روش هوای آزاد در سایه با دمای معمولی ۳۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد، کاملاً خشک شدند. بعد از خشک شدن ساختارهای هوایی، اقدام به خرد کردن اندام‌های گیاهی گردید. سپس مقدار ۳۰۰ گرم از هر نمونه با ترازوی دیجیتالی مدل Sartorius ساخت کشور آلمان با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شد.

اسانس‌گیری به روش تقطیر با آب، در دستگاه کلونجر (بروسیلیکات آلمانی ساخت شیشه آلات ایران) و براساس درصد وزنی با حداکثر دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، صورت گرفت که برای هر نمونه مدت دو ساعت به طول انجامید. اسانس گیاهان مورد نظر پس از آماده‌سازی، جهت شناسایی ترکیبات به دستگاه GC/MS (مدل 7890A/5975C ساخت اجیلنت آمریکا) مجهز به ستون موئینه HP-5MS به طول ۳۰ متر و قطر داخلی ۰/۲۵ میکرون با محدوده دمایی آن ستون از ۶۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد تزریق گردید. شناسایی طیف‌ها به کمک شاخص بازداری آن‌ها و مقایسه آن با شاخص‌های موجود در کتب مرجع (Adams, 2007) و با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیبات استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در

آوری گردید. همچنین از برگ گیاهان تیمار شده جهت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی، نمونه‌برداری انجام گرفت و نمونه‌های برداشت شده در مزرعه بلافاصله در فویل آلومینیومی پیچیده و بعد از برچسب زدن نام تیمار در تانک حاوی نیتروژن مایع قرار داده و به آزمایشگاه انتقال داده شد.

محتوای نسبی آب برگ: برای برآورد محتوای نسبی آب برگ، ۰/۵ گرم از جوان‌ترین برگ توسعه یافته هر گیاه (FW) جدا کرده و سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر شناور گردیدند. پس از گذشت این مدت، وزن اشباع برگ با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ برآورد گردید (TW). سپس برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و بعد از گذشت این مدت، وزن خشک برگ‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ برآورد گردید (DW). در نهایت محتوای آب نسبی با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید (Arnon, 1975):

$$\% R.W.C = (FW - DW) / (TW - DW) \quad (1)$$

کلروفیل کل: برای اندازه‌گیری کلروفیل کل، ۰/۱۲۵ گرم بافت برگ تازه با ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد و ۰/۱ گرم کربنات کلسیم (برای خنثی نمودن حالت اسیدی مایع درون سلولی و ممانعت از تخریب کلروفیل) در یک هاون چینی ساییده شد تا به صورت توده یکنواختی درآمد. این عمل در نور کم و محیط خنک انجام شد. پس از سانتریفیوژ کردن عصاره حاصل، محلول رویی برداشته شد و جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر (حداکثر جذب نور کلروفیل a) و ۶۴۵ نانومتر (حداکثر جذب نور کلروفیل b) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل CARY-100 ساخت واریان استرالیا) و با استفاده از استون ۸۰ درصد به‌عنوان محلول مرجع قرائت و با معادله ۲ محاسبه گردید (Dere et al., 1998):

$$\text{Chl total (mg.Kg Fw}^{-1}\text{)} = (20.21 \times A645) + (8.02 \times A663) \quad (2)$$

میزان پرولین: پرولین نمونه‌های برگ بر اساس میکرومول در گرم وزن تر، توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۵ نانومتر و با استفاده از تولوئن به عنوان محلول مرجع و با کمک معادله ۳ محاسبه شد (Bates et al., 1973). عدد ۱۱۵/۵ وزن مولکولی پرولین است.

$$\text{[} \mu\text{g/g (} \mu\text{g/g در میکرومول) / حجم عصاره} \quad (3)$$

تیمارهای آزمایشی در هر دو سال، بجز مواد مؤثره بتاتوزان و کارواکرول، بر سایر ترکیبات غالب اسانس و محتوای اسانس، معنی‌دار بود (جدول ۳). از ۱۱ ترکیب شناسایی شده، ترکیبات عمده و غالب اسانس شامل پاراسیمن، گاماترپینن، تیمول، آلفا-ترپینن، میرسن، بتاتوزن، کارواکرول و جرماکرن-دی بود. در بین اجزای اسانس، ماده مؤثره تیمول بیشترین میزان را در تمامی گیاهان تحت تیمار در هر دو سال تحقیق، به خود اختصاص داد (جدول ۴-۹). مشخص گردید که اثرگذاری تیمارهای آزمایشی بر مواد مؤثره مونوترپنه اکسیژنه الکل دار و نیز میزان اسانس، معنی‌دار و در گروه‌های مختلفی قرار گرفتند. با اعمال تیمارهای پایه آلی و مقایسه با نمونه شاهد، روند افزایشی در میزان کمی و کیفی اسانس مشاهده گردید (جدول ۴-۹).

کتابخانه کامپیوتری (Wiley and NIST) صورت گرفت.

روش انجام تجزیه داده‌ها: پس از انجام آزمون همگنی واریانس‌های خطای آزمایشی (بارتلت) و مشخص شدن عدم معنی‌داری در هر دو سال، تجزیه مرکب اطلاعات برآمده از تحقیق به وسیله نرم‌افزار آماری SAS_{ver.9} انجام شد. مقایسات میانگین اسانس و ترکیبات اسانس از روش حداقل اختلاف معنی‌دار (L.S.D) در سطح ۱ درصد انجام شد و برای اطمینان از مقادیر خطای استاندارد (SE)، به‌طور جداگانه نیز با نرم‌افزار Excel ver. 2013، برآورد مجدد انجام شد.

نتایج و بحث

اسانس و ترکیبات اسانس: نتایج نشان داد که اثرگذاری

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب مربعات اسانس و ترکیبات عمده اسانس مرزه جنگلی در سال‌های اجرای تحقیق

Table 3- Complex analysis variance of mean of squares of essential oil content and the main components of essential oil of *Satureja mutica*

منابع تغییرات	درجه آزادی	تیمول	جرماکرن-دی	آلفا-ترپینن	کارواکرول	بتا-توجن	گاما-ترپینن	پی-سایمن	اسانس
SOV ^z	DF ^y	Thymol	Germacen-D	Alpha-Terpinene	Carvacrol	Beta-thujone	Gamma-Terpinene	P-Cymene	Essential oil
سال	1	2.33**	2.8**	2.77**	0.055 ^{ns}	0.091 ^{ns}	0.079**	2.77**	5.33**
Year (Y)									
تکرار (سال)	4	0.065	0.044	0.023	0.061	0.081	0.009	0.06	0.55
R(Y)									
آبیاری	2	1.34**	4.31**	2.24**	0.077 ^{ns}	0.051 ^{ns}	2.77**	1.55**	2.99**
Irrigation(A)									
آبیاری×سال	2	1.62**	1.12**	3.65**	0.044 ^{ns}	0.042 ^{ns}	2.44**	1.88**	2.77**
A×Y									
خطای کرت‌های اصلی	8	0.021	0.03	0.043	0.082	0.04	0.043	0.022	0.023
E _a									
محرك	12	1.43**	2.23**	2.99**	0.088 ^{ns}	0.045 ^{ns}	1.99**	1.49**	1.99**
Elicitor (B)									
آبیاری×محرك	24	1.66**	1.93**	3.52**	0.081 ^{ns}	0.033 ^{ns}	2.44**	1.88**	2.77**
A×B									
محرك×سال	12	1.21**	4.21**	3.77**	0.071 ^{ns}	0.021 ^{ns}	2.66**	12.7**	2.66**
B×Y									
آبیاری×محرك×سال	24	0.011 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.077 ^{ns}	0.014 ^{ns}	0.091 ^{ns}	0.033 ^{ns}	0.044 ^{ns}
A×B×Y									
خطای کرت‌های فرعی	144	0.021	0.11	0.15	0.095	0.043	1.44	0.045	0.22
E _b									
ضریب تغییرات (/)		7.12	6.5	5.33	7.44	4.45	8.55	8.91	3.44
C.V ^x									

^{ns}, ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

^z SOV: source of variation, ^ydf: degree of freedom, ^xCV: coefficient of variation, *, ** significant at P=0.05 and P=0.01 levels of probability respectively, ns: not significant.

جدول ۴- مقایسات میانگین اسانس و ترکیبات عمده اسانس مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی و دور آبیاری ۳ روز یکبار (۱۴۰۱)

Table 4- Means of essential oil content and main chemical composition of essential oil of *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 3 day interval (1st year)

تیمار	تیمول	جرماکرن-دی	آلفا-ترپینن	کارواکرول	بتا-توجن	گاما-ترپینن	پی-سایمن	اسانس
Treatment	Thymol	Germacen-D	Alpha-Terpinene	Carvacrol	Beta-thujone	Gamma-Terpinene	P-Cymene	Essential oil
کنترل	32.5±0.6 ^d	0.76±0.01 ^b	2.32±0.03 ^c	2.04±0.06 ^d	0.85±0.01 ^a	15.78±0.4 ^c	22.18±0.9 ^d	0.84±0.03 ^c
Control								
متانول	10 35.5±0.9 ^c	0.44±0.02 ^c	2.35±0.01 ^c	3.09±0.01 ^{ab}	0.99±0.02 ^a	18.81±0.3 ^a	23.66±0.8 ^c	0.85±0.02 ^c
Methanol	20 33.02±0.4 ^{cd}	0.73±0.02 ^b	1.81±0.02 ^d	2.73±0.03 ^b	0.81±0.02 ^{ab}	17.39±0.5 ^b	24.51±0.9 ^c	0.96±0.01 ^b
اتانول	10 38.9±0.9 ^{ab}	0.85±0.02 ^a	2.85±0.01 ^a	2.85±0.02 ^b	0.89±0.02 ^a	16.38±0.4 ^b	31.31±0.9 ^a	1.31±0.03 ^a
Ethanol	20 36.88±0.8 ^b	0.44±0.01 ^c	2.12±0.03 ^c	2.21±0.02 ^d	0.79±0.03 ^{ab}	17.44±0.5 ^b	23.92±0.7 ^c	1.09±0.01 ^b
استون	10 36.43±0.7 ^b	0.76±0.02 ^b	2.89±0.01 ^a	2.99±0.06 ^b	0.91±0.03 ^a	18.1±0.6 ^{ab}	27.69±0.8 ^b	0.88±0.03 ^c
Acetone	20 34.82±0.6 ^c	0.55±0.01 ^c	1.81±0.01 ^d	2.65±0.05 ^{bc}	0.88±0.03 ^{ab}	16.22±0.4 ^b	24.22±0.7 ^c	0.92±0.01 ^b
LSD	0.66	0.99	0.77	0.98	1.00	0.88	0.93	0.2
اسید سالیسیلیک	1 31.82±0.6 ^d	0.76±0.02 ^b	3.12±0.02 ^a	3.12±0.06 ^a	1.01±0.02 ^a	17.82±0.3 ^b	25.69±0.8 ^c	1.21±0.02 ^a
*Salicylic Acid	2 33.1±0.58 ^{cd}	0.22±0.01 ^d	2.29±0.01 ^c	2.91±0.01 ^b	0.81±0.01 ^{ab}	16.02±0.4 ^{bc}	23.14±0.9 ^{cd}	1.12±0.04 ^{ab}
فنیل آلانین	1 32.21±0.5 ^d	0.11±0.03 ^e	2.98±0.03 ^a	2.95±0.05 ^b	0.91±0.02 ^a	16.91±0.5 ^b	29.37±0.7 ^c	1.11±0.03 ^{ab}
Phenylalanine	2 31.78±0.8 ^d	0.57±0.02 ^c	2.57±0.01 ^b	2.62±0.07 ^{bc}	0.81±0.02 ^{ab}	17.44±0.5 ^b	26.75±0.9 ^c	0.92±0.01 ^b
کیتوزان	1 36.82±0.8 ^b	0.76±0.01 ^b	1.88±0.02 ^{cd}	2.77±0.08 ^b	0.85±0.01 ^a	16.1±0.4 ^b	32.1±0.8 ^a	1.31±0.02 ^a
Chitosan	2 33.82±0.7 ^d	0.66±0.02 ^b	1.76±0.01 ^d	2.31±0.06 ^{cd}	0.71±0.01 ^b	17.96±0.5 ^{ab}	29.78±0.9 ^b	0.99±0.03 ^b
LSD	0.99	0.85	0.77	0.98	0.94	0.99	0.55	0.55

اسید سالیسیلیک: ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر --- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹. Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

جدول ۵- مقایسات میانگین اسانس و ترکیبات عمده اسانس مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی و دور آبیاری ۳ روز یکبار (۱۴۰۲)

Table 5- Means of essential oil content and main chemical composition of essential oil of *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 3 day interval (2nd year)

تیمار	تیمول	جرماکرن-دی	آلفا-ترپینن	کارواکرول	بتا-توجن	گاما-ترپینن	پی-سایمن	اسانس
Treatment	Thymol	Germacen-D	Alpha-Terpinene	Carvacrol	Beta-thujone	Gamma-Terpinene	P-Cymene	Essential oil
کنترل	33.5±0.7 ^c	0.81±0.02 ^{ab}	1.32±0.03 ^e	2.21±0.01 ^d	0.44±0.03 ^c	15.78±0.3 ^c	20.11±0.91 ^d	0.84±0.03 ^c
Control								
متانول	10 36.5±0.6 ^b	0.66±0.03 ^b	2.32±0.01 ^c	2.91±0.01 ^b	0.41±0.03 ^c	16.81±0.6 ^b	21.21±0.95 ^d	1.12±0.02 ^{ab}
Methanol	20 35.02±0.8 ^c	0.73±0.02 ^b	2.73±0.01 ^b	2.61±0.02 ^c	0.33±0.03 ^d	17.39±0.35 ^b	22.76±0.96 ^d	0.96±0.01 ^b
اتانول	10 34.1±0.8 ^c	0.85±0.01 ^a	1.85±0.03 ^d	3.77±0.02 ^a	0.42±0.01 ^c	18.38±0.44 ^a	29.9±0.93 ^{ab}	1.12±0.03 ^{ab}
Ethanol	20 29.88±0.9 ^e	0.55±0.02 ^c	1.44±0.03 ^e	3.14±0.03 ^{ab}	0.32±0.01 ^d	18.44±0.35 ^a	25.44±0.88 ^c	1.09±0.01 ^b
استون	10 35.43±0.6 ^c	0.81±0.01 ^a	2.76±0.02 ^a	3.09±0.01 ^{ab}	0.44±0.01 ^c	17.1±0.38 ^b	26.69±0.78 ^b	0.98±0.03 ^b
Acetone	20 30.82±0.9 ^d	0.86±0.03 ^a	1.76±0.01 ^d	3.01±0.05 ^b	0.77±0.02 ^b	16.22±0.47 ^b	24.91±1.04 ^c	0.89±0.04 ^{bc}
LSD	0.69	0.74	0.88	0.88	0.88	0.94	0.66	0.95
اسید سالیسیلیک	1 32.82±0.6 ^{cd}	0.76±0.02 ^b	1.86±0.01 ^d	3.91±0.05 ^a	0.66±0.01 ^b	19.01±0.5 ^a	21.14±0.91 ^d	1.21±0.01 ^a
*Salicylic Acid	2 34.1±0.7 ^c	0.55±0.04 ^c	1.22±0.02 ^e	3.45±0.01 ^a	0.56±0.01 ^c	18.02±0.4 ^{ab}	22.33±0.84 ^d	1.12±0.01 ^{ab}
فنیل آلانین	1 33.21±0.5 ^c	0.82±0.01 ^a	1.01±0.01 ^f	2.99±0.05 ^b	0.91±0.02 ^a	15.91±0.3 ^c	23.11±1.01 ^{cd}	1.14±0.03 ^{ab}
Phenylalanine	2 32.78±0.8 ^{cd}	0.57±0.02 ^c	2.57±0.01 ^b	2.55±0.02 ^c	0.33±0.01 ^d	17.44±0.5 ^b	22.55±0.77 ^d	0.92±0.01 ^b
کیتوزان	1 35.82±0.8 ^{bc}	0.85±0.01 ^a	1.11±0.01 ^{ef}	3.01±0.03 ^b	0.85±0.02 ^a	15.1±0.5 ^c	31.69±0.88 ^a	1.21±0.02 ^a
Chitosan	2 34.82±0.7 ^c	0.76±0.03 ^b	1.76±0.02 ^d	2.18±0.01 ^d	0.22±0.01 ^d	16.96±0.4 ^b	26.41±0.99 ^c	0.99±0.02 ^b
LSD	0.65	0.88	0.88	0.95	1.00	0.91	1.00	0.78

اسید سالیسیلیک: ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر --- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹. Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

جدول ۶- مقایسات میانگین اسانس و ترکیبات عمده اسانس مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی و دور آبیاری ۶ روز یکبار (۱۴۰۱)

Table 6- Means of essential oil content and main chemical composition of essential oil of *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 6 day interval (1st year)

تیمار Treatment	تیمول Thymol	جرماکرن-دی Germacren-D	آلفا-ترپینن Alpha-Terpinene	کارواکرول Carvacrol	بتا-توجن Beta-thujone	گاما-ترپینن Gamma-Terpinene	پی-سایمن P-Cymene	اسانس Essential oil
کنترل Control	34.5±0.8 ^c	0.79±0.01 ^{ab}	1.32±0.01 ^e	2.14±0.08 ^d	0.65±0.02 ^b	14.31±0.7 ^{cd}	27.41±0.88 ^b	0.66±0.03 ^d
متانول Methanol	10 38.5±0.7 ^b	0.77±0.02 ^b	1.42±0.03 ^e	2.91±0.01 ^b	0.87±0.03 ^a	15.81±0.8 ^c	25.91±0.99 ^c	0.89±0.02 ^{bc}
اتانول Ethanol	20 34.02±0.4 ^c	0.89±0.03 ^a	1.73±0.01 ^d	2.73±0.05 ^b	0.73±0.02 ^b	16.39±0.35 ^b	24.33±1.02 ^c	0.71±0.01 ^c
استون Acetone	10 39.1±1.01 ^a	0.99±0.04 ^a	1.85±0.02 ^d	2.85±0.02 ^b	0.89±0.03 ^a	17.38±0.34 ^b	32.1±0.77 ^a	0.99±0.03 ^b
LSD	0.55	0.75	0.98	1.00	0.55	0.77	0.75	0.94
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1 34.82±0.7 ^c	0.79±0.01 ^{ab}	1.96±0.02 ^c	2.18±0.05 ^d	0.91±0.01 ^a	15.82±0.3 ^c	30.55±1.01 ^a	1.14±0.01 ^{ab}
فنیل آلانین Phenylalanine	2 32.1±0.8 ^d	0.88±0.02 ^a	1.22±0.01 ^e	2.55±0.02 ^c	0.81±0.03 ^{ab}	16.02±0.4 ^{bc}	25.14±0.88 ^c	1.02±0.04 ^b
کیتوزان Chitosan	1 39.21±0.8 ^a	0.63±0.03 ^b	2.01±0.03 ^c	2.78±0.02 ^b	0.87±0.02 ^a	18.91±0.3 ^a	29.44±0.77 ^b	1.11±0.03 ^{ab}
LSD	0.93	0.82	1.00	0.98	0.98	0.66	0.65	0.66

اسید سالیسیلیک ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر --- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹. Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

جدول ۷- مقایسات میانگین اسانس و ترکیبات عمده اسانس مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی و دور آبیاری ۶ روز یکبار (۱۴۰۲)

Table 7- Means of essential oil content and main chemical composition of essential oil of *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 6 day interval (2nd year)

تیمار Treatment	تیمول Thymol	جرماکرن-دی Germacren-D	آلفا-ترپینن Alpha-Terpinene	کارواکرول Carvacrol	بتا-توجن Beta-thujone	گاما-ترپینن Gamma-Terpinene	پی-سایمن P-Cymene	اسانس Essential oil
کنترل Control	37.5±0.9 ^b	0.76±0.01 ^b	2.32±0.01 ^b	2.94±0.04 ^b	0.65±0.02 ^b	14.78±0.38 ^c	28.25±0.99 ^b	0.67±0.03 ^d
متانول Methanol	10 39.5±0.7 ^a	0.81±0.02 ^a	2.52±0.02 ^b	2.21±0.03 ^d	0.89±0.02 ^a	16.81±0.36 ^b	27.31±1.02 ^b	0.99±0.01 ^b
اتانول Ethanol	20 37.02±0.4 ^b	0.73±0.03 ^b	2.23±0.01 ^c	2.73±0.05 ^b	0.78±0.02 ^{ab}	17.39±0.45 ^b	26.76±0.89 ^b	0.81±0.02 ^c
استون Acetone	10 39.1±0.8 ^{ab}	0.85±0.02 ^a	1.85±0.03 ^d	2.85±0.02 ^b	0.85±0.02 ^a	18.38±0.34 ^a	25.52±0.78 ^c	1.03±0.01 ^b
LSD	0.95	0.88	0.93	0.96	0.69	0.55	0.77	0.88
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1 41.29±0.9 ^a	0.88±0.01 ^a	2.73±0.01 ^a	2.18±0.08 ^d	0.94±0.01 ^a	16.82±0.3 ^b	33.9±0.89 ^a	1.19±0.01 ^a
فنیل آلانین Phenylalanine	2 38.1±0.8 ^b	0.63±0.02 ^b	2.22±0.01 ^c	2.01±0.01 ^{de}	0.66±0.02 ^b	17.02±0.52 ^b	29.14±0.95 ^b	0.89±0.01 ^{bc}
کیتوزان Chitosan	1 39.21±0.5 ^a	1.01±0.03 ^a	2.93±0.01 ^a	2.78±0.05 ^b	0.89±0.01 ^a	19.11±0.4 ^a	30.44±0.79 ^{ab}	1.11±0.03 ^a
LSD	0.65	0.91	1.00	0.91	0.99	0.59	0.63	0.95

اسید سالیسیلیک ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر --- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹. Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

جدول ۸- مقایسات میانگین اسانس و ترکیبات عمده اسانس مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی و دور آبیاری ۹ روز یکبار (۱۴۰۱)

Table 8- Means of essential oil content and main chemical composition of essential oil of *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 9 day interval (1st year)

تیمار Treatment	تیمول Thymol	جرماکرن-دی Germacren-D	آلفا-ترپینن Alpha-Terpinene	کارواکرول Carvacrol	بتا-توجن Beta-thujone	گاما-ترپینن Gamma-Terpinene	پی-سایمن P-Cymene	اسانس Essential oil
کنترل Control	31.99±0.9 ^d	0.09±0.02 ^e	1.12±0.01 ^e	2.01±0.06 ^{de}	0.63±0.02 ^b	14.21±0.3 ^{cd}	21.01±0.81 ^d	0.45±0.03 ^d
متانول Methanol	10 33.5±0.7 ^c	0.33±0.01 ^c	2.32±0.03 ^b	2.21±0.01 ^d	0.89±0.03 ^a	16.81±0.41 ^b	26.99±0.77 ^{bc}	0.78±0.01 ^c
اتانول Ethanol	20 30.12±0.8 ^e	0.11±0.01 ^e	2.12±0.01 ^c	2.11±0.03 ^d	0.66±0.01 ^b	17.39±0.5 ^b	25.44±1.01 ^c	0.66±0.02 ^d
استون Acetone	10 34.1±0.5 ^c	0.44±0.01 ^c	1.99±0.02 ^c	2.22±0.02 ^d	0.88±0.02 ^a	18.38±0.46 ^a	25.36±0.67 ^c	0.99±0.03 ^b
LSD	0.85	0.88	0.95	0.96	0.88	0.66	0.99	0.77
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1 34.82±0.7 ^c	0.31±0.02 ^d	1.96±0.01 ^c	2.18±0.06 ^d	0.93±0.02 ^a	15.82±0.5 ^c	28.11±1.3 ^b	0.66±0.02 ^d
فنیل آلانین Phenylalanine	2 32.1±0.8 ^d	0.21±0.01 ^d	1.22±0.02 ^e	2.33±0.01 ^c	0.86±0.01 ^a	16.02±0.3 ^{bc}	26.77±1.1 ^c	0.55±0.01 ^d
کیتوزان Chitosan	1 33.21±0.5 ^c	0.41±0.02 ^c	1.49±0.03 ^{de}	2.78±0.05 ^b	0.94±0.01 ^a	16.91±0.4 ^b	29.11±0.89 ^{bc}	0.75±0.03 ^c
LSD	1.00	0.92	0.95	0.91	0.88	0.55	0.88	0.55

اسید سالیسیلیک: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر --- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹, Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹-----Numbers in each column that have same word, have same group.

جدول ۹- مقایسات میانگین اسانس و ترکیبات عمده اسانس مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی و دور آبیاری ۹ روز یکبار (۱۴۰۲)

Table 9- Means of essential oil content and main chemical composition of essential oil of *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 9 day interval (2nd year)

تیمار Treatment	تیمول Thymol	جرماکرن-دی Germacren-D	آلفا-ترپینن Alpha-Terpinene	کارواکرول Carvacrol	بتا-توجن Beta-thujone	گاما-ترپینن Gamma-Terpinene	پی-سایمن P-Cymene	اسانس Essential oil
کنترل Control	30.5±0.7 ^e	0.11±0.02 ^e	1.32±0.01 ^e	1.91±0.06 ^e	0.73±0.02 ^b	15.78±0.22 ^c	26.99±0.92 ^c	0.66±0.02 ^d
متانول Methanol	10 31.5±0.6 ^d	0.44±0.01 ^c	1.41±0.02 ^e	2.21±0.01 ^d	0.79±0.02 ^{ab}	16.81±0.31 ^b	25.91±0.89 ^c	0.79±0.01 ^c
اتانول Ethanol	20 29.91±0.8 ^e	0.22±0.02 ^d	1.73±0.02 ^d	2.13±0.03 ^d	0.59±0.02 ^{bc}	16.39±0.4 ^b	24.76±0.77 ^c	0.69±0.02 ^{cd}
استون Acetone	10 34.1±0.9 ^c	0.51±0.01 ^c	1.85±0.01 ^d	2.31±0.02 ^{cd}	0.63±0.02 ^b	17.38±0.55 ^b	26.36±0.85 ^{bc}	0.81±0.03 ^c
LSD	0.88	0.73	0.88	1.00	0.99	0.88	0.77	0.99
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1 31.82±0.6 ^d	0.55±0.02 ^c	1.93±0.02 ^c	2.18±0.06 ^d	0.61±0.01 ^b	16.82±0.55 ^b	28.69±1.2 ^b	0.77±0.01 ^c
فنیل آلانین Phenylalanine	2 30.1±0.7 ^e	0.33±0.01 ^d	0.99±0.01 ^f	2.33±0.01 ^c	0.56±0.01 ^c	13.92±0.47 ^d	22.77±0.95 ^d	0.65±0.01 ^d
کیتوزان Chitosan	1 33.21±0.5 ^c	0.38±0.01 ^{cd}	1.08±0.01 ^{ef}	2.78±0.05 ^b	0.41±0.02 ^c	16.91±0.36 ^b	28.11±0.93 ^b	0.66±0.03 ^d
LSD	0.95	0.66	0.92	0.78	0.77	0.99	0.55	0.99

اسید سالیسیلیک: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر --- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹, Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

چرخه سننتر اسید آمینه و آنزیم‌های پروتئینی در افزایش ترکیبات اسانس مؤثرند. به‌طور کلی هر افزایشی در کل کربوهیدرات‌های گیاه، موجب افزایش سننتر اسانس در بافت مسئول ساخت این ترکیبات می‌شود. یکی از دلایل بیشتر شدن مقدار اسانس را می‌توان به دلیل افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه و تأثیر افزایش جذب عناصر غذایی در ساختمان و کارکرد کلروپلاست دانست که این افزایش ممکن است به تولید بیشتر غده‌های ترشح کننده اسانس در برگ منجر شود. از آنجایی که غده‌های ترشح کننده اسانس گیاهان نعنایان در برگ‌ها قرار دارند، هر عاملی که سبب افزایش سطح و وزن برگ‌ها شود، مقدار اسانس را نیز افزایش خواهد داد (Ali et al., 2021; Abdul-Hafeez and Ibrahim, 2021).

از سوی دیگر بیوسنتز ترپنوئیدها با اتصال سر به دم ایزوپنتیل دی‌فسفات به ایزومر دی‌متیل آلیل دی‌فسفات ادامه می‌یابد که با این اتصال ژرانیل دی‌فسفات (GPP) حاصل می‌شود. علاوه بر این، اتصال GPP با واحدهای IPP، پرنیل دی‌فسفات‌های (PDP) مانند فارنسیل دی‌فسفات (FPP) و ژرانیل دی‌فسفات (GGPP) را تشکیل می‌دهد. محصول GPP و FPP طی فرآیندهای حلقوی شدن به ترتیب اسکلت‌های مونوترپن و سزکویی‌ترپنی را تشکیل می‌دهند. تشکیل مونوترپنه‌های الکلی از جمله تیمول و کارواکرول با مونوترپن گاماترپنین (GT) شروع شده و در ادامه از طریق پارا-سیمن آروماتیک، واکنش‌ها به سمت سننتر آن‌ها پیش می‌رود. گاماترپنین که به وسیله آنزیم گاماترپنین‌سننتر (GTS) کاتالیز می‌شود، پیش ماده‌ی مونوترپن‌های آروماتیک، در ادامه مسیر بوده و بنابراین نقش اساسی را در این مسیر ایفاء می‌نماید (Zhao and Sakai, 2003; Thakur and Kumar, 2020). از آنجایی که ترکیبات غالب اسانس‌ها از گروه ترپن‌ها می‌باشد و به دلیل این که گلوکز به‌عنوان پیش ماده ضروری در سننتر اسانس و به ویژه مونوترپن‌هاست، بنابراین فتوسنتز و تولید فرآورده‌های فتوسنتزی ارتباط مستقیمی با تولید اسانس دارد (Farahani et al., 2020). در گیاهان معطر، بیوسنتز و تجمع اسانس‌ها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با ظرفیت فتوسنتز گیاه مرتبط است. به‌طوری که تغییرات مشاهده شده در کیفیت اسانس گیاهان تیمار شده را می‌توان به تفاوت در اثرات هر یک از محرک‌ها بر رشد گیاه، پاسخ گیاه به عوامل زیستی و غیرزیستی

میزان ترکیبات اسانس در سطوح تیماری استون و متانول، در کمترین مقادیر قرار گرفتند. تیمارهای کیتوزان و اسید سالیسیلیک بیشترین اثر را بر میزان ماده مؤثره تیمول و سایر ترکیبات غلب اسانس تمامی گیاهان در هر دو سال، ایجاد نمودند. در تولید مواد مؤثره تیمول، پارا-سیمن و بتا-توژان، کاربرد تیمارهای متانول (۲۰ درصد)، فنیل آلانین (۲ گرم در لیتر) و استون (۲۰ درصد) دارای اثر کاهنده و یا مانند شاهد بود و بقیه تیمارها از جمله کیتوزان، اتانول و اسید سالیسیلیک منجر به افزایش این مواد مؤثره گردیدند. در بسیاری از مواد مؤثره غالب اسانس، کمترین مقادیر در تیمار شاهد بوجود آمد. بیشترین ترکیبات اسانس به ترتیب تیمول، پارا-سیمن و گاما-ترپنین بودند که در تیمارهای مختلف بیش از ۹۰ درصد اسانس را به خود اختصاص دادند. در تحقیق حاضر محلول‌پاشی کیتوزان (۰/۲۵ گرم در لیتر)، مقدار اسانس استخراج شده از ساختار هوایی گیاهان مرزه جنگلی را به میزان ۱/۳۱ و ۱/۲۱ درصد رسانید که بیانگر کارایی بالاتر تیمارهای مذکور در افزایش سننتر و تجمع اسانس گیاه مرزه جنگلی است، هرچند که تیمارهای اتانول (۱۰ درصد) و اسید سالیسیلیک (۱/۵ میلی مولار) نیز در گروه‌های آماری مشابه با کیتوزان (۰/۲۵ گرم در لیتر) قرار گرفتند. در مورد اسانس و ترکیبات غالب اسانس، در بیشتر موارد، دوره آبیاری ۹ روز یکبار منجر به کاهش مقادیر گردید (جداول ۴-۹).

محرک‌ها برای گیاه، پیام‌های شیمیایی ارسال می‌کنند که سبب پاسخ‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی و تجمع فیتوالکسین می‌شوند. طی پاسخ به محرک، سیستم دفاعی گیاه، فعال شده و در نتیجه، بیان ژن‌های دفاعی، متابولیت‌های ثانویه و محتوای اسانس، افزایش می‌یابند (Zhao et al., 2004). اتانول با داشتن مولکول‌های کوچک‌تر از دی‌اکسید کربن به راحتی از طریق انتشار ساده بدون صرف انرژی از غشاء سلول گیاهی عبور کرده و جذب سلول‌های گیاهی می‌شود و حتی در زمان خشکی و کم آبی که روزه‌های گیاهی بسته باشد به آسانی کربن خود را در اختیار گیاه، جهت انجام فرآیند فتوسنتز قرار می‌دهد و ماده خشک گیاه افزایش می‌یابد (Thakur and Kumar, 2020; Ho et al., 2020).

ترکیبات اسانس با محلول پاشی ترکیبات الکلی و آلی به ویژه اسید سالیسیلیک، فنیل آلانین و اتانول به دلیل راه اندازی

متوسط، میزان برخی ترکیبات مؤثره و مهم نظیر تیمول را در گونه‌های آویشن افزایش داد (Abdi et al., 2022; Askary et al., 2018, Zakerian et al., 2020) که در این خصوص نتایج مشابهی در پژوهش حاضر بدست آمد. تحت تنش خشکی، مقادیر مواد مؤثره گیاهان دارویی رفتار مختلفی دارند؛ چنانچه در زمان گلدهی و بروز تنش خشکی، میزان ماده آلفا-پینن در گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis*) کاهش ولی در اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia*) افزایش یافت. ترکیبات مؤثره آلفا-پینن، لیمونن و اوکالیپتول در مریم گلی (*Salvia officinalis*) کاهش یافت در حالی که این ترکیبات در ریحان (*Ocimum basilicum*) افزایش یافتند (Kulak et al., 2020). در گیاهان دارویی قدومه (*Alyssum desertorum*)، آویشن (*Thymus vulgaris*)، همیشه بهار (*Calendula officinalis*)، گاوزبان (*Borago officinalis*) (Yadegari et al., 2017) و گونه‌های مرزه (*Satureja*) (Yadegari, 2022)، تنش آبی شدید منجر به کاهش درصد اسانس و نیز برخی از مواد مؤثره اسانس گردید.

که منجر به افزایش مواد مؤثره گیاه می‌شود، نسبت داد (Hawrylak-Nowak et al., 2021). کمبود آب عموماً باعث تخریب و شکسته شدن کلروپلاست‌ها و کاهش میزان کلروفیل شده و مقدار فعالیت آنزیم‌ها را طی فرآیند فتوسنتز کاهش می‌دهد (Xiaolu et al., 2017; Zandalinas et al., 2016; al., 2016). به نظر می‌رسد کاربرد محرک کیتوزان از طریق افزایش سطح برگ و فراهم نمودن زمینه مناسب جهت دریافت انرژی و نیز شرکت در ساختار کلروفیل و آنزیم‌های درگیر در متابولیسم کربن فتوسنتزی، موجب افزایش بازده فتوسنتزی تحت شرایط تنش آبی می‌شود (Alavi Samany et al., 2022; Alizadeh et al., 2020). تنش خشکی با اختلال در فتوسنتز و تنفس، درصد و ترکیب شیمیایی اسانس را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Pradhan et al., 2017). در مطالعات مشخص شد که تنش خشکی اثر معنی‌داری بر افزایش میزان متیل کائوکیول به عنوان یکی از ترکیبات مهم اسانس در ریحان بنفش (*Ocimum basilicum*) دارد (Malekpoor et al., 2017). تنش خشکی در حد

جدول ۱۰- تجزیه واریانس مرکب مربعات صفات مورفوفیزیولوژیکی مرزه جنگلی در سال‌های اجرای تحقیق

Table 10- Complex analysis variance of mean of squares of morpho-physiological characters in <i>Satureja mutica</i>						
منابع تغییرات	درجه آزادی	ماده خشک اندام هوایی	پرولین	کل کلروفیل	کل فنل	محتوای نسبی آب
SOV ^z	DF ^y	Shoot Dry Matter	Proline	Total Chlorophyll	Total Phenol	R.W.C (%)
سال	1	24.1**	0.78**	29.1**	35.1**	33.1**
Year (Y)						
تکرار (سال)	4	0.77	1.55	0.45	0.55	1.6
R(Y)						
آبیاری	2	18.9**	25.7**	32.4**	44.5**	44.9**
Irrigation(A)						
آبیاری × سال	2	15.5**	22.56**	32.2**	24.6**	18.1**
A×Y						
خطای کرت‌های اصلی	8	0.29	0.23	0.77	0.99	0.33
E _a						
محرک	12	12.2**	18.2**	28.8**	34.12**	29.9**
Elicitor (B)						
آبیاری × محرک	24	15.5**	20.23**	33.2**	23.7**	45.6**
A×B						
محرک × سال	12	11.1**	24.56**	33.44**	24.67**	16.5**
B×Y						
آبیاری × محرک × سال	24	0.12 ^{ns}	0.85 ^{ns}	1.12 ^{ns}	0.87 ^{ns}	0.13 ^{ns}
A×B×Y						
خطای کرت‌های فرعی	144	0.33	1.31	1.55	0.75	0.22
E _b						
ضریب تغییرات		18.32	9.12	6.65	7.33	6.84
C.V ^x (%)						

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

^z SOV: source of variation, ^ydf: degree of freedom, ^xCV: coefficient of variation, *, ** significant at P=0.05 and P=0.01 levels of probability respectively, ns: not significant.

جدول ۱۱- مقایسات میانگین صفات مورفوفیزیولوژیکی مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی تحت دور آبیاری ۳ روز یکبار

Table 11- Means of morpho-physiological characters in *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 3 day interval

سال Year	کل فنل Total phenol (mg.g ⁻¹ FW)	کل کلروفیل Total Chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)	محتوای نسبی آب Relative Water Content (%)			
			۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023		
کنترل Control	1.21±0.01 ^e	1.01±0.01 ^f	1.22±0.04 ^a	1.18±0.03 ^a	49.8±1.2 ^{ab}	48.7±1.4 ^b
متانول Methanol	10 1.67±0.01 ^c	1.44±0.02 ^d	1.21±0.02 ^a	1.19±0.01 ^a	56.5±1.5 ^a	55.3±1.3 ^a
اتانول Ethanol	20 1.16±0.02 ^f	1.69±0.01 ^c	0.91±0.01 ^b	0.79±0.03 ^b	57.6±2.5 ^a	49.99±1.2 ^{ab}
استون Acetone	10 1.99±0.02 ^{ab}	2.05±0.01 ^a	1.02±0.03 ^{ab}	1.29±0.02 ^a	50.7±2.2 ^{ab}	58.61±1.3 ^a
	20 1.22±0.02 ^e	2.06±0.02 ^a	1.14±0.02 ^a	1.01±0.01 ^{ab}	48.5±1.2 ^b	49.81±2.2 ^{ab}
LSD	1.00	0.95	1.00	0.88	1.00	0.78
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1 1.81±0.01 ^b	1.76±0.01 ^{bc}	1.13±0.02 ^a	1.18±0.01 ^a	51.1±1.2 ^{ab}	50.1±1.4 ^{ab}
فنیل آلانین Phenylalanine	2 1.55±0.01 ^{cd}	2.04±0.02 ^a	0.89±0.06 ^b	1.21±0.02 ^a	57.8±1.8 ^a	48.3±2.3 ^b
کیتوزان Chitosan	1 2.21±0.02 ^a	2.03±0.01 ^a	1.01±0.02 ^{ab}	1.31±0.03 ^a	55.8±2.2 ^a	46.4±2.4 ^b
	2 1.62±0.01 ^c	1.59±0.01 ^c	0.87±0.01 ^b	1.01±0.01 ^{ab}	52.2±1.4 ^a	43.1±1.1 ^b
LSD	0.95	0.85	1.00	1.00	1.00	0.86

اسید سالیسیلیک ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر--- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹, Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

ادامه جدول ۱۱- مقایسات میانگین صفات مورفوفیزیولوژیکی مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی (دور آبیاری ۳ روز یکبار)

Continued-Table 11- Means of morpho-physiological characters in *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 3 day interval

سال Year	ماده خشک اندام هوایی (g.m ⁻²) Shoot Dry Matter	پرولین (µg.g ⁻¹ FW) Proline		
		۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023	
کنترل Control	34.9±2.5 ^b	35.1±1.2 ^b	8.1±0.2 ^c	8.7±0.2 ^c
متانول Methanol	10 35.87±2.9 ^b	35.9±2.3 ^{ab}	8.5±0.3 ^c	7.55±0.1 ^{cd}
اتانول Ethanol	20 35.2±2.3 ^b	32.1±2.1 ^b	9.1±0.1 ^{bc}	8.3±0.2 ^c
استون Acetone	10 41.5±2.1 ^a	40.65±1.2 ^a	7.65±0.2 ^c	8.15±0.1 ^c
	20 39.9±2.1 ^a	35.8±1.2 ^{ab}	8.99±0.2 ^{bc}	9.55±0.1 ^b
LSD	0.76	0.88	0.96	0.88
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1 37.1±1.2 ^a	37.99±3.4 ^a	8.1±0.2 ^c	7.99±0.1 ^c
فنیل آلانین Phenylalanine	2 35.1±2.1 ^b	34.88±3.2 ^b	8.5±0.3 ^c	9.1±0.1 ^{bc}
کیتوزان Chitosan	1 38.1±3.1 ^a	39.9±2.9 ^a	7.45±0.1 ^{cd}	7.49±0.2 ^d
	2 35.9±2.2 ^{ab}	30.9±1.8 ^{ab}	8.65±0.2 ^c	8.11±0.3 ^b
LSD	0.85	0.87	1.00	0.99

اسید سالیسیلیک ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر--- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹, Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

جدول ۱۲- مقایسات میانگین صفات مورفوفیزیولوژیکی مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی تحت دور آبیاری ۶ روز یکبار

Table 12- Means of morpho-physiological characters in *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 6 day interval

سال Year	کل فنل Total phenol (mg.g ⁻¹ FW)	کل کلروفیل Total Chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)	محتوای نسبی آب Relative Water Content (%)			
			۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023
کنترل Control	1.55±0.05 ^{cd}	1.61±0.01 ^c	0.98±0.01 ^b	0.99±0.03 ^{ab}	35.8±1.5 ^c	41.7±0.91 ^{bc}
متانول Methanol	10 1.91±0.03 ^b	1.99±0.01 ^{ab}	0.88±0.02 ^b	1.01±0.01 ^{ab}	46.5±1.4 ^b	48.3±1.1 ^b
اتانول Ethanol	20 1.88±0.08 ^b	1.66±0.01 ^c	0.72±0.01 ^c	0.86±0.03 ^b	47.6±1.3 ^b	45.4±0.9 ^b
استون Acetone	10 1.99±0.04 ^{ab}	2.04±0.02 ^a	1.02±0.01 ^{ab}	1.09±0.02 ^a	40.7±1.2 ^{bc}	51.3±1.4 ^{ab}
	20 1.14±0.05 ^{ef}	1.89±0.01 ^b	0.65±0.02 ^c	0.87±0.01 ^b	43.5±1.4 ^b	45.5±1.3 ^b
	10 2.32±0.03 ^a	2.02±0.02 ^a	0.85±0.02 ^b	1.01±0.06 ^{ab}	45.9±1.2 ^b	51.6±1.2 ^{ab}
	20 2.11±0.09 ^a	1.89±0.01 ^b	0.76±0.01 ^{bc}	0.73±0.03 ^b	33.5±1.1 ^c	42.9±1.1 ^b
LSD	0.65	1.00	0.96	1.00	0.67	0.78
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1 1.99±0.04 ^{ab}	2.05±0.03 ^a	1.01±0.02 ^{ab}	1.02±0.04 ^{ab}	41.1±1.4 ^{bc}	50.1±1.4 ^{ab}
فنیل آلانین Phenylalanine	2 2.22±0.03 ^a	2.04±0.01 ^a	0.84±0.02 ^b	0.81±0.02 ^b	48.8±1.2 ^b	48.3±1.3 ^b
کیتوزان Chitosan	1 2.23±0.04 ^a	2.11±0.01 ^a	0.71±0.02 ^c	1.02±0.05 ^{ab}	45.8±1.5 ^b	46.4±1.4 ^b
	2 1.93±0.05 ^b	1.89±0.01 ^b	0.77±0.03 ^{bc}	0.91±0.07 ^b	42.2±1.3 ^{bc}	43.1±1.1 ^b
	1 2.14±0.06 ^a	1.99±0.04 ^{ab}	0.84±0.02 ^b	1.01±0.02 ^{ab}	43.2±1.2 ^b	44.7±1.2 ^b
	2 1.99±0.08 ^{ab}	1.14±0.05 ^{ef}	0.63±0.01 ^c	0.89±0.03 ^b	34.7±1.1 ^c	41.5±1.1 ^{bc}
LSD	0.95	0.87	0.78	1.00	0.88	0.77

اسید سالیسیلیک ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر--- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹, Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

ادامه جدول ۱۲- مقایسات میانگین صفات مورفوفیزیولوژیکی مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی (دور آبیاری ۶ روز یکبار)

Continued-Table 12- Means of morpho-physiological characters in *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 6 day interval

سال Year		ماده خشک اندام هوایی (g.m ⁻²) Shoot Dry Matter		پرولین (µg.g ⁻¹ FW) Proline	
		۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023
کنترل Control		30.1±1.3 ^{bc}	25.1±1.1 ^{cd}	9.1±0.5 ^{bc}	9.7±0.6 ^b
متانول Methanol	10	31.8±1.2 ^b	30.5±1.9 ^{bc}	10.15±0.8 ^b	10.66±0.5 ^b
اتانول Ethanol	20	30.2±1.1 ^c	27.1±1.8 ^c	11.01±0.7 ^{ab}	10.98±0.6 ^{ab}
استون Acetone	10	32.1±1.7 ^b	31.9±1.5 ^{bc}	10.79±0.6 ^b	10.15±0.5 ^b
	20	31.9±1.8 ^b	28.88±1.3 ^c	11.09±0.5 ^{ab}	10.55±0.6 ^b
	10	32.8±1.2 ^b	30.8±1.2 ^{bc}	9.8±0.6 ^b	10.3±0.7 ^b
	20	30.99±1.9 ^{bc}	28.4±1.1 ^c	11.02±0.7 ^{ab}	10.99±0.6 ^{ab}
LSD		1.00	0.69	0.88	0.77
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1	37.1±1.7 ^a	32.3±1.5 ^b	10.51±0.5 ^b	9.99±0.6 ^b
فنیل آلانین Phenylalanine	2	35.1±1.1 ^b	30.3±1.8 ^{bc}	11.01±0.7 ^{ab}	11.02±0.5 ^{ab}
کیتوزان Chitosan	1	38.1±2.2 ^a	36.9±2.1 ^{ab}	10.1±0.8 ^b	9.2±0.7 ^{bc}
	2	33.2±1.5 ^b	32.9±1.4 ^c	10.98±0.9 ^{ab}	10.11±0.6 ^b
	1	35.8±1.3 ^{ab}	33.7±1.3 ^b	9.88±0.5 ^b	9.61±0.6 ^b
	2	32.1±1.1 ^b	30.9±1.1 ^{bc}	10.99±0.6 ^{ab}	11.01±0.5 ^{ab}
LSD		0.95	1.00	0.94	0.58

اسید سالیسیلیک ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر--- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹, Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

جدول ۱۳- مقایسات میانگین صفات مورفوفیزیولوژیکی مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی تحت دور آبیاری ۹ روز یکبار

Table 13- Means of morpho-physiological characters in *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 9 day interval

سال Year		کل فنل Total phenol (mg.g ⁻¹ FW)		کل کلروفیل Total Chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)		محتوای نسبی آب Relative Water Content(%)	
		۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023
کنترل Control		1.13±0.01 ^{ef}	1.01±0.01 ^f	0.47±0.01 ^d	0.51±0.01 ^d	21.8±0.9 ^d	21.31±0.8 ^d
متانول Methanol	10	1.19±0.02 ^e	1.22±0.01 ^e	0.51±0.02 ^d	0.79±0.01 ^b	30.5±1.3 ^{cd}	25.3±0.95 ^d
	20	1.31±0.01 ^e	1.19±0.02 ^e	0.73±0.01 ^c	0.66±0.03 ^c	27.6±1.1 ^d	28.4±0.99 ^d
اتانول Ethanol	10	1.32±0.02 ^e	1.11±0.02 ^f	0.62±0.03 ^c	0.79±0.02 ^b	30.7±1.2 ^{cd}	29.3±0.89 ^{cd}
	20	1.19±0.01 ^e	1.46±0.02 ^d	0.52±0.02 ^d	0.58±0.01 ^c	28.5±1.2 ^d	25.5±0.99 ^d
استون Acetone	10	1.14±0.02 ^{ef}	1.13±0.01 ^{ef}	0.65±0.02 ^c	0.75±0.06 ^c	25.9±0.98 ^d	34.6±1.1 ^c
	20	1.15±0.01 ^{ef}	1.01±0.02 ^f	0.51±0.01 ^d	0.55±0.03 ^{cd}	20.91±1.1 ^d	32.9±1.2 ^c
LSD		0.98	1.00	0.78	0.65	0.95	0.77
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1	1.11±0.01 ^f	1.44±0.03 ^d	0.88±0.02 ^b	0.67±0.04 ^c	31.1±1.2 ^c	30.1±1.1 ^{cd}
	2	1.01±0.02 ^f	0.99±0.01 ^f	0.74±0.01 ^c	0.58±0.02 ^c	27.8±1.1 ^d	28.3±0.88 ^d
فنیل آلانین Phenylalanine	1	1.14±0.02 ^{ef}	1.53±0.01 ^d	0.51±0.02 ^d	0.75±0.05 ^c	35.8±1.2 ^c	26.4±0.99 ^d
	2	1.12±0.01 ^f	1.39±0.01 ^d	0.57±0.01 ^c	0.55±0.01 ^{cd}	22.2±1.4 ^d	23.1±0.88 ^d
کیتوزان Chitosan	1	1.14±0.02 ^{ef}	1.65±0.01 ^c	0.74±0.02 ^b	0.74±0.02 ^c	33.2±1.2 ^d	34.7±1.2 ^c
	2	1.13±0.01 ^{ef}	1.55±0.02 ^{de}	0.53±0.01 ^d	0.69±0.03 ^c	28.7±0.99 ^d	21.5±1.1 ^d
LSD		0.95	0.88	0.55	0.78	0.74	0.89

اسید سالیسیلیک ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر --- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹. Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹

Numbers in each column that have same word, have same group.

ادامه جدول ۱۳- مقایسات میانگین صفات مورفوفیزیولوژیکی مرزه جنگلی تحت تأثیر محرک‌های رشدی (دور آبیاری ۹ روز یکبار)

Continued-Table 13- Means of morpho-physiological characters in *Satureja mutica* plants affected by elicitors and irrigation regimes by 9 day interval

سال Year		ماده خشک اندام هوایی Shoot Dry Matter (g.m ⁻²)		پرولین Proline (µg.g ⁻¹ FW)	
		۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023
کنترل Control		16.27±1.2 ^f	15.14±0.88 ^f	10.81±0.7 ^b	10.88±0.3 ^b
متانول Methanol	10	20.8±1.8 ^e	24.5±0.94 ^d	11.02±0.9 ^{ab}	10.85±0.4 ^b
	20	16.24±1.4 ^f	21.1±1.01 ^e	12.1±0.8 ^a	11.99±0.4 ^a
اتانول Ethanol	10	20.1±1.3 ^e	23.9±1.1 ^{de}	11.05±0.9 ^{ab}	10.15±0.5 ^b
	20	18.9±1.5 ^{ef}	21.88±0.89 ^e	11.88±0.8 ^a	11.55±0.5 ^a
استون Acetone	10	22.8±1.2 ^e	20.8±1.1 ^e	10.8±0.9 ^b	10.88±0.6 ^b
	20	19.5±1.1 ^e	15.13±0.99 ^f	11.03±0.8 ^{ab}	12.4±0.5 ^a
LSD		0.81	0.91	0.88	0.98
اسید سالیسیلیک *Salicylic Acid	1	24.1±0.89 ^d	24.3±0.95 ^d	10.1±0.6 ^b	11.99±0.5 ^a
	2	22.1±1.1 ^e	22.3±1.1 ^e	12.66±0.5 ^a	12.39±0.7 ^a
فنیل آلانین Phenylalanine	1	24.1±0.99 ^d	26.9±1.1 ^c	11.1±0.6 ^{ab}	10.2±0.6 ^b
	2	22.2±1.2 ^e	21.9±0.89 ^e	11.65±0.8 ^a	11.11±0.6 ^a
کیتوزان Chitosan	1	24.8±1.1 ^{cd}	23.7±0.99 ^{de}	10.88±0.7 ^b	10.61±0.5 ^b
	2	23.1±1.1 ^e	20.9±1.1 ^e	11.8±0.6 ^a	11.7±0.5 ^a
LSD		0.99	0.78	1.00	0.71

اسید سالیسیلیک ۱: ۱/۵ میلی مولار، اسید سالیسیلیک ۲: ۳ میلی مولار، فنیل آلانین ۱: ۱ گرم در لیتر، فنیل آلانین ۲: ۲ گرم در لیتر، کیتوزان ۱: ۰/۲۵ گرم در لیتر، کیتوزان ۲: ۰/۵ گرم در لیتر --- اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشابه هستند دارای گروه مشابه هستند.

*Salicylic Acid 1: 1.5 mM, Salicylic Acid 2: 3 mM, Phenylalanine 1: 1 g.l⁻¹, Phenylalanine 2: 2 g.l⁻¹, Chitosan 1: 0.25 g.l⁻¹. Chitosan 2: 0.5 g.l⁻¹-----Numbers in each column that have same word, have same group.

مختلف سیتوکرم P₄₅₀، سیکلواکسیژناز، الکل دهیدروژناز، لیپواکسیژناز و زانتین‌اکسیداز شوند که در طی فعالیت خود مقادیر بالای رادیکال‌های آزاد تولید می‌کنند و از طرفی میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش دهند (Thakur and Kumar, 2020).

متانول به عنوان یک محرک در فرم آلدئید، اکسید شده و به صورت اسیدهای آمینه (سرین و متیونین) و کربوهیدرات‌ها، در بافت‌های مختلف گیاهان سنتز می‌شود. متانول به صورت محلول‌پاشی برگ‌ی بر روی چندین گیاه استفاده شده که افزایش ماده تر و کارایی مصرف آب (WUE) به واسطه اثر محرک متانول، به اثبات رسیده است (Kheiri et al., 2020). یکی از مسیرهای پاسخ دفاعی سلول گیاهی، در برابر پاتوژن یا محرک انفجار اکسیداتیو و آزاد شدن اکسیژن فعال است. مشخص شده است که در برخی از کشت‌های سلول گیاهی، با اکسیژن فعال (Reactive Oxygen Species) و در گروهی از گیاهان پس از تیمار با محرک و میانجی‌گری یون سوپراکسید (O^{۲-}) و پراکسید هیدروژن (H₂O₂)، تجمع متابولیت‌های ثانویه انجام می‌شود. اکسیژن آزاد دارای یون سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال هیدروکسیل (OH⁻)، بوسیله اکسید کردن رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، چربی‌های غشایی، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک؛ باعث آسیب‌های اکسیدکنندگی می‌شود (Zhao et al., 2003). محرک‌ها با تحت تأثیر قرار دادن خصوصیات فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اسید سالیسیلیک با دو مکانیسم افزایش میزان کلروفیل و بهبود فعالیت آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز نقش مهمی در متابولیسم کربوهیدرات‌ها و بهبود رشد زایشی گیاهان تیمار شده دارد (Ali et al., 2021). محرک‌های آلی از جمله کیتوزان منجر به، بهبود سنتز و تجمع کلروفیل می‌شوند و کارایی فتوسیستم‌ها را افزایش می‌دهند و همچنین از طریق افزایش رشد ریشه، جذب عناصر غذایی و میزان سنتز کلروفیل در گیاهان را بهبود می‌بخشند که منجر به افزایش رشد و عملکرد می‌گردند (Abdul-Hafeez and Ibrahim, 2020). محرک‌ها با افزایش ظرفیت فتوسنتزی و کربوهیدرات‌ها، مواد اولیه را برای سنتز ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی و آنتوسیانین‌ها فراهم می‌آورند. علت افزایش ترکیبات فنلی در تیمار با محرک‌های مختلف، اثر این ترکیبات بر فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیلایز و افزایش

صفات مورفوفیزیولوژیکی: نتایج دو ساله اطلاعات برآمده از این پژوهش نشان داد که میزان پرولین، عملکرد ساختار هوایی، محتوای نسبی آب برگ، مقادیر کلروفیل و فنل کل گیاهان مرزه جنگلی تحت تأثیر تیمارهای مورد استفاده در این تحقیق، تغییرات چشم‌گیری داشتند (جدول ۱۰) و در گروه‌های مختلف قرار گرفتند (جدول ۱۱-۱۳). تیمار کیتوزان (۰/۲۵ گرم در لیتر) و اتانول (۱۰ درصد) میزان عملکرد ساختار هوایی را به ۴۱/۵۱ گرم در متر مربع در سال نخست و در سال دوم به ۴۰/۶۵ گرم در متر مربع رساند. عملکرد ساختار هوایی تیمار شاهد در دو سال انجام پژوهش به ترتیب به میزان ۱۶/۲۷ و ۱۵/۱۴ گرم در متر مربع تحت تنش شدید آبی بود. لذا استفاده از تیمارهای کیتوزان و اتانول به همراه دور آبیاری مطلوب، نقش بسیار مؤثری در افزایش عملکرد ساختار رویشی داشتند. در این پژوهش مشخص شد با افزایش عملکرد، میزان اسانس هم بیشتر شد (جدول ۱۱-۱۳).

به نظر می‌رسد تیمارهای به کار رفته در این پژوهش، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و در نتیجه بازده فتوسنتزی در مرزه جنگلی را افزایش داده و از این طریق بر ترکیبات تشکیل دهنده اسانس نیز تأثیر گذار بوده‌اند. با توجه به این‌که بیوسنتز ترپنوئیدها در تریکوم‌ها، توسط ژن‌ها کنترل می‌شوند، اثر اصلی محرک‌ها بر تولید اسانس به تأثیر آنها بر ژن‌ها و آنزیم‌های درگیر در متابولیسم ثانویه گیاه مربوط می‌شود (Pandey et al., 2017).

فتوسنتز از مهم‌ترین واکنش‌های حیاتی در گیاه می‌باشد که نقش تعیین‌کننده در عملکرد و همچنین خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارد. استفاده از ترکیبات محرک رشد، به گیاه کمک می‌کند تا بر عوامل بازدارنده رشدی غلبه کند. این ترکیبات با تحت تأثیر قرار دادن خصوصیات فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Ali et al., 2021). بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش، محلول‌پاشی گیاهان مرزه جنگلی با محرک‌های آلی و الکلی موجب افزایش عملکرد ماده خشک گیاه گردید که همراه با افزایش میزان اسانس بود. از سوی دیگر اسیدهای فنلیک با داشتن ساختار ویژه دارای پتانسیل بالایی برای برهمکنش با پروتئین‌های مختلف از جمله آنزیم‌ها می‌باشند. به همین دلیل آن‌ها می‌توانند باعث ممانعت از فعالیت آنزیم‌هایی مانند ایزوفرم‌های

گرم ماده تر) در تیمارهای با دور آبی ۹ روز یکبار و کمترین مقادیر (۷/۱۵-۷/۴۸ میکروگرم در گرم ماده تر) در تیمارهای با دور آبیاری ۳ روز یکبار بدست آمد که در این روند تیمارهای کیتوزان و اتانول به همراه دوره آبیاری مطلوب، منجر به کاهش این اسید آمینه گردیدند.

محتوای نسبی آب برگ روندی معکوس با میزان پرولین اندام گیاهی داشت، چنانچه بیشترین میزان محتوای نسبی آب برگ (۵۹/۶۷-۵۸/۶۱ درصد) در تیمار کیتوزان ۰/۲۵ گرم در لیتر تحت دوره آبیاری ۳ روز یکبار در هر دو سال انجام پژوهش بدست آمد. کمترین مقدار (۲۱/۸-۲۱/۳۱ درصد) در گیاهان شاهد تحت شرایط تنش خشکی شدید (دوره آبیاری ۹ روز یکبار) بدست آمد. صفات مورد برآورد در گیاهان مرزه جنگلی، تحت تیمار تنش خشکی کاهش محسوسی داشتند. تیمارهای استون ۲۰ درصد و فیل آلانین ۲ گرم در لیتر منجر به تشدید کاهش صفات مختلف مورد ارزیابی در شرایط تنش خشکی گردیدند (جداول ۱۱-۱۳). با افزایش مقادیر صفات مورفولوژیکی مورد برآورد و در نتیجه آن رشد و فتوسنتز بیشتر، بدیهی است که میزان محتوای نسبی آب برگ افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در مجموع، کمترین مقادیر صفات مورد ارزیابی در گیاهان تحت تیمار شاهد و در تنش آبی شدیدتر بدست آمد. بنابراین گیاهان مرزه جنگلی قابلیت تحمل به تنش خشکی شدید را ندارند. تنش‌های محیطی غیرزنده مانند تنش خشکی اثرات مهمی بر صفات فیتوشیمیایی گیاهان دارویی ایجاد می‌نمایند (Ghasemi Pirbalouti et al., 2017; Babaei et al., 2021).

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که تنش کم‌آبی بر میزان کلروفیل، محتوای نسبی آب و فنل اثر معنی‌دار داشته است. نتایج به دست آمده از آنالیز رنگی‌های فتوسنتزی نشان داد که با افزایش شدت کمبود آب به‌طور معنی‌داری از میزان رنگی‌های فتوسنتزی کاسته شد. دلیل دیگر کاهش کلروفیل برگ‌ها، تغییر متابولیسم نیتروژن و استفاده بیشتر از گلوتامات (ماده اولیه سنتز کلروفیل و پرولین) در مسیر تولید پرولین است (Caser et al., 2019). به عبارتی، کاهش مقدار کلروفیل و محتوای نسبی آب به هنگام تنش کمبود آب می‌تواند به دلیل تحریک آنزیم بیوسنتز پرولین یعنی گلوتامیل کیناز در پتانسیل آبی پایین باشد. با افزایش تبدیل گلوتامات به پرولین در هنگام

فعالیت این آنزیم است (Alizadeh and Fattahi, 2021). از آنجا که این آنزیم یک کلیدی در بیوسنتز همه ترکیبات فنلی است، به نظر می‌رسد که در تحقیق حاضر نیز تغییر فعالیت این آنزیم یکی از دلایل افزایش مقدار ترکیبات فنلی در گیاهان مرزه جنگلی باشد. سنتز ترکیبات فنلی در بافت‌های گیاهی وابسته به کربوهیدرات‌ها می‌باشد. به نظر می‌رسد که افزایش جذب عناصر غذایی در تیمارهای محلول‌پاشی به‌طور غیرمستقیم با تحت تأثیر قرار دادن متابولیسم کربوهیدرات‌ها، این ترکیبات را به سمت سنتز ترکیبات فنلی هدایت می‌کند که نتیجه آن افزایش مقدار این ترکیبات می‌باشد (Ghasemi Pirbalouti et al., 2017).

بطور کلی محرک‌های مختلف از جمله کیتوزان (Alizadeh et al., 2020) و اتانول (Rajabzadeh et al., 2023) نقش مهمی در فعال کردن آنزیم‌های مسیر متابولیسم ثانویه گیاهان می‌کنند. کاربرد کیتوزان احتمالاً به دلیل افزایش جذب دی اکسیدکربن، کاهش تعرق، تنظیم ژن و القای آنزیم‌های مرتبط با بیوسنتز ترپنوئیدها، محتوای اسانس را تغییر می‌دهد (Hawrylak-Nowak et al., 2021). تغییر در پاسخ گیاه به غلظت‌های مختلف هر محرک رشد می‌تواند در ارتباط با گونه گیاهی، مرحله رشد، روش‌های کاربرد و شرایط محیطی مرتبط باشد (Abdul-Hafeez and Ibrahim, 2021). ساخت متابولیت‌های ثانویه تحت تأثیر رشد و نمو گیاه است که به رفتارهای فیزیولوژیکی گیاه به ویژه ظرفیت فتوسنتز بستگی دارد. تغییر در فعالیت فتوسنتز باعث تغییر در فعالیت متابولیکی گیاه می‌شود (Poorghadir et al., 2020).

تجمع پرولین در زمان تنش، به علت تغییر در سرعت اکسیداسیون پرولین به گلوتامات یا عدم دخالت آن در سنتز پروتئین و یا مجموعه این عوامل می‌باشد. از طرف دیگر در گیاهان متحمل به خشکی میزان اکسیداسیون مولکول‌ها کاهش می‌یابد که یکی از پیامدهای آن افزایش پرولین و کاهش محتوای نسبی آب است (Esmailzadeh bahabadi and Sharifi, 2013). از سویی دیگر کاهش سطح برگ و محتوای نسبی آب در اثر تنش خشکی، موجب بالا رفتن نسبی تراکم غده‌های تولیدکننده اسانس در برگ‌ها شده و مقدار تجمع اسانس را افزایش می‌دهد (Pradhan et al., 2017). در پژوهش حاضر بیشترین میزان پرولین (۱۲/۶۷-۱۲/۵۹ میکروگرم در

باشد (Sasani et al., 2021).

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر، تنش خشکی منجر به کاهش میزان کل کلروفیل و فنل گیاه گردید و مشخص شد که محرک‌های رشدی به خصوص کیتوزان (۰/۲۵ گرم در لیتر)، اسید سالیسیلیک (۱/۵ میلی مولار) و اتانول (۱۰ درصد) نقش مثبتی بر افزایش کمیت و کیفیت اسانس مرزه جنگلی داشتند. در بین اجزای اسانس، مواد مؤثره مونوترپنه اکسیژنه الکل دار (تیمول، گاما-ترپینن و پارا-سیمن)، در محلول پاشی کیتوزان، اسید سالیسیلیک و اتانول، بیشترین مقدار را به دست آوردند. در حالی که در برخی موارد، محلول پاشی متانول و استون در مقایسه با شاهد اثرات کاهشی بر مقدار این ترکیبات داشت. با توجه به قیمت نسبتاً پایین کیتوزان، اسید سالیسیلیک و اتانول از یکسو و از سوی دیگر قیمت بالای اسانس مرزه جنگلی و استفاده‌های متعدد این گیاه ارزشمند در صنایع مختلف غذایی و دارویی و همچنین افزایش بیش از ۵۵ درصدی اسانس و ترکیبات اسانس گیاهان تحت تیمار با این محرک رشدی؛ در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که تحت شرایط تنش رطوبتی، محلول پاشی کیتوزان، اسید سالیسیلیک و اتانول به عنوان یک روش مفید و اقتصادی می‌تواند برای کاهش اثرات تنش و به دنبال آن افزایش عملکرد اسانس گیاه مرزه جنگلی در اقلیم‌ها و شرایط خاک مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

تنش خشکی، در واقع گلوتامات که پیش‌ساز کلروفیل نیز می‌باشد، از دسترس خارج شده و سنتز کلروفیل‌ها دچار نقصان می‌شود. به عبارتی کاهش سنتز کلروفیل می‌تواند به علت کاهش تجمع اسید آمینولولیتیک باشد. این اسید پیش‌ساز همه تتراپیرول‌ها و پیش‌ساز پروتوکلروفیلید است که در معرض نور به کلروفیل تبدیل می‌شود و در تنش خشکی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، فعالیت آنزیم گلوتامات کیناز که اولین آنزیم مسیر بیوسنتز کلروفیل است، با تنش خشکی بسیار کاهش می‌یابد (Caser et al., 2019; Esch et al., 2019).

به طور کلی، متابولیت‌های ثانویه به گیاهان دارویی کمک می‌کنند تا گیاه به شرایط و تنش‌های محیطی مانند خشکی سازگاری بیشتری پیدا کند. به علاوه، تأثیرات ناشی از تنش در افزایش اسانس عمدتاً به علت اثر آن بر رشد و نمو گیاه است. گیاهان غلظت بالایی از متابولیت‌ها را تحت شرایط کمبود آب تولید می‌کنند و مقدار کمتری از کربن را به رشد تخصیص می‌دهند که نشان از یک تعادل بین دفاع و رشد می‌باشد (Esmailzadeh bahabadi and Sharifi, 2013). تغییرات بیوسنتز ترکیبات ترپنوئیدی از جمله مونوترپن‌ها و سزکوئی‌ترین‌ها ممکن است به علت تغییرات بیو-انرژی‌تیک سلول‌های گیاهی در پاسخ به عناصر مغذی باشد و به نظر می‌رسد که یکی از دلایل اختلاف در مقدار و نوع برخی از ترکیبات اسانس گیاه مورد آزمایش، مربوط به اختلاف جایگاه‌های بیوسنتزی ترکیبات از نظر بهره‌گیری از منابع انرژی

References

- Abdi, L., Asghari, H.R., Tolyat Abolhasani, M., Amerian, M.R. and Naghdi Badi, H., 2022. Effect of salicylic acid on growth and phytochemical characteristics of *Thymus daenensis* under drought irrigation. *Plant Process and Function*, 11, pp.195–210. [In Persian]. <https://doi.org/20.1001.1.23222727.1401.11.48.13.4>
- Abdul-Hafeez, E.Y. and Ibrahim, O.H.M., 2021. Effects of chitosan and BABA foliar application on flowering and chemical characteristics of German chamomile 'Bode-gold'. *South African Journal of Botany*, 139, pp.241–245. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.01.037>
- Adams, R.P., 2007. *Identification of essential oil components by gas chromatography/quadrupole mass spectroscopy*. Allured Publishing Corporation.
- Ahmad, B., Khan, M.M.A., Jaleel, H., Sadiq, Y., Shabbir, A. and Uddin, M., 2017. Exogenously sourced γ -irradiated chitosan-mediated regulation of growth, physiology, quality attributes, and yield in *Mentha piperita* L. *Turkish Journal of Biology*, 41, pp.388–401. <https://doi.org/10.3906/biy-1608-64>

- Alavi Samany, S.M., Ghasemi Pirbalouti, A. and Malekpoor, F., 2022. Phytochemical and morpho-physiological changes of hyssop in response to chitosan-spraying under different levels of irrigation. *Industrial Crops and Products*, 176, 114330. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114330>
- Albergaria, E.T., Oliveira, A.F. and Albuquerque, U.P., 2020. The effect of water deficit stress on the composition of phenolic compounds in medicinal plants. *South African Journal of Botany*, 131, pp.12–17. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.02.002>
- Ali, B., 2021. Salicylic acid: An efficient elicitor of secondary metabolite production in plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 31, 101884. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101884>
- Alizadeh, A., Moghaddam, M., Asgharzade, A. and Mahmoodi Sourestani, M., 2020. Phytochemical and physiological response of *Satureja hortensis* L. to different irrigation regimes and chitosan application. *Industrial Crops and Products*, 158, 112990. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112990>
- Alizadeh, Z. and Fattahi, M., 2021. Essential oil, total phenolic, flavonoids, anthocyanins, carotenoids and antioxidant activity of cultivated Damask Rose (*Rosa damascena*) from Iran: With chemotyping approach concerning morphology and composition. *Scientia Horticulturae*, 288, 110341. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110341>
- Arnon, D.I., 1975. Physiological principles of dry land crop production. In U. S. Gupta (Ed.), *Physiological aspects of dry land farming* (pp. 3–14). Oxford Press.
- Askary, M., Behdani, M.A., Parsa, S., Mahmoodi, S. and Jamialahmadi, M., 2018. Water stress and manure application affect the quantity and quality of essential oil of *Thymus daenensis* and *Thymus vulgaris*. *Industrial Crops and Products*, 111, pp.336–344. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.056>
- Babaei, Kh., Moghaddam, M. and Farhadi, N., 2021. Morphological, physiological and phytochemical responses of Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 284, 110116. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110116>
- Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, pp.205–207. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
- Caiyan, L., Dongming, M., Gaobin, P., Xiaofang, Q., Zhigao, D. and Hong, W., 2011. Foliar application of chitosan activates artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua* L. *Industrial Crops and Products*, 33, pp.176–182. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.001>
- Caser, M., Chitarra, W., Angiolillo, F. and Perrone, I., 2019. Drought stress adaptation modulates plant secondary metabolite production in *Salvia dolomitica* Codd. *Industrial Crops and Products*, 129, pp.85–96. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.068>
- Dere, S., Güneş, T. and Sivaci, R., 1998. Spectrophotometric determination of chlorophyll-A, B and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. *Turkish Journal of Botany*, 22, pp.13–17. <https://www.researchgate.net/publication/235938850>

- Dzung, N.A., 2011. Enhancing crop production with chitosan and its derivatives. In S.-K. Kim (Ed.), *Chitin, chitosan, oligosaccharides and their derivatives* (Chap. 42). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/ebk1439816035-c42>
- Emami-Bistgani, Z., Siadat, S.A., Bakhshandeh, A. and Ghasemi-Pirbalouti, A., 2017. Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of *Thymus daenensis* Celak. *Crop Journal*, 5(5), pp.407-415. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.04.003>
- Esch, E.H., Lipson, D.A. and Cleland, E.E., 2019. Invasion and drought alter phenological sensitivity and synergistically lower ecosystem production. *Ecology*, 100, e02802. <https://doi.org/10.1002/ecy.2802>
- Esmailzadeh Bahabadi, S. and Sharifi, M., 2013. Increasing the production of plant secondary metabolites, using biotic elicitors. *Journal of Cell Tissue*, 4, pp.119–128. <https://doi.org/10.52547/jct.4.2.119>
- Falcon-Rodriguez, A.B., Cabrera, J.C., Ortega, E. and Martinez-Tellez, M.A., 2009. Concentration and physicochemical properties of chitosan derivatives determine the induction of defense responses in roots and leaves of *Nicotiana tabacum* plants. *American Journal of Agriculture Biology Science*, 4, pp.192–200. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2009.192.200>
- Farahani, H., Sajedi, N.A., Madani, H., Changizi, M. and Naeini, M.R., 2020. Effect of foliar-applied silicon on flower yield and essential oil composition of Damask Rose (*Rosa damascena* Mill.) under water deficit stress. *Silicon*, 13, pp.4463–4472. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00762-1>
- Fariaszewska, A., Aper, J., Van Huylenbroeck, J. and De Swaef, T., 2020. Physiological and biochemical responses of forage grass varieties to mild drought stress under field conditions. *International Journal of Plant Production*, 14, pp.335–353. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00088-3>
- Fooladi Vanda, G., Shabani, L. and Razavizadeh, R., 2019. Chitosan enhances rosmarinic acid production in shoot cultures of *Melissa officinalis* L. through the induction of methyl jasmonate. *Botanical Studies*, 60, No.26. <https://doi.org/10.1186/s40529-019-0274-x>
- Ghanbarzadeh, Z., Mohsenzadeh, S., Rowshan, V. and Moradshahi, A., 2019. Evaluation of the growth, essential oil composition and antioxidant activity of *Dracocephalum moldavica* under water deficit stress and symbiosis with *Claroideoglossum etunicatum* and *Micrococcus yunnanensis*. *Scientia Horticulturae*, 256, 108652. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108652>
- Ghasemi Pirbalouti, A., Malekpoor, F., Salimi, A. and Golparvar, A., 2017. Exogenous application of chitosan on biochemical and physiological characteristics, phenolic content and antioxidant activity of two species of basil (*Ocimum ciliatum* and *Ocimum basilicum*) under reduced irrigation. *Scientia Horticulturae*, 217, pp.114–122. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.01.031>
- Gorni, P.H., Pacheco, A.C., Moro, A.L., Albuquerque Silva, J.F., Moreli, R.R. and Rodrigues de Miranda, G., 2020. Salicylic acid foliar application increases biomass, nutrient assimilation, primary metabolites and essential oil content in *Achillea millefolium* L. *Scientia Horticulturae*, 270, 109436. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109436>

- Hawrylak-Nowak, B., Dresler, S., Rubinowska, K. and Matraszek-Gawron, R., 2021. Eliciting effect of foliar application of chitosan lactate on the phytochemical properties of *Ocimum basilicum* L. and *Melissa officinalis* L. *Food Chemistry*, 342, 128358. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128358>
- Hayati, A., Rahimi, M.M., Kelidari, A. and Hosseini, S.M., 2021. Effects of humic acid and iron nanochelate on osmolytes content of black cummin (*Nigella sativa* L.) under drought stress conditions. *Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 37, pp.809–821. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.354715.2995>
- Heng, Y., Xavier, C., Frette, S., Lars, P., Christensen, S. and Kai, G., 2012. Chitosan oligosaccharides promote the content of polyphenols in Greek oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, pp.136–143. <https://doi.org/10.1021/jf204376j>
- Kheiri, A., Mohajjel Shoja, H. and Sarajoughi, M., 2020. Study on the effect of drought stress and methanol spraying on *dehydrin1* gene expression in *Carthamus tinctorius*. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, 9, pp.67–75. [In Persian] <https://doi.org/20.1001.1.25885073.1399.9.1.4.7>
- Kulak, M., 2020. Recurrent drought stress effects on essential oil profile of Lamiaceae plants: An approach regarding stress memory. *Industrial Crops and Products*, 154, 112695. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112695>
- Malekpoor, F., Ghasemi Pirbalouti, A., Salimi, A. and Momtaz, H., 2017. Effects of chitosan on gene expression of chavicol-O-methyl transferase and phenylpropanoid components of *Ocimum basilicum* (purple cultivar) under water deficit. *Journal of Biology Society*, 30, pp.391–401. [In Persian] <https://doi.org/20.1001.1.23832738.1396.30.3.7.0>
- Marinova, D., Ribarova, F. and Atanassaova, M., 2005. Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. *Journal of University of Chemical Technology and Metallurgy*, 40, pp.255–260.
- Moghaddam, M., Narimani, R., Rostami, G. and Mojarab, S., 2018. Studying the effect of foliar application of methanol and ethanol on morphological and biochemical characteristics of sweet basil (*Ocimum basilicum* cv. Keshkeni luvellou). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16, pp.345–354. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i2.57520>
- Mohammadi, H., Amirikia, F., Ghorbanpour, M., Fatehi, F. and Hashempour, H., 2019. Salicylic acid induced changes in physiological traits and essential oil constituents in different ecotypes of *Thymus kotschyanus* and *Thymus vulgaris* under well-watered and water stress conditions. *Industrial Crops and Products*, 129, pp.561–574. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.046>
- Momeni, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Mousavi, A. and Badi, H.N., 2020. Effect of foliar applications of salicylic acid and chitosan on the essential oil of *Thymbra spicata* L. under different soil moisture conditions. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 23, pp.1142–1153. <https://doi.org/10.1080/0972060x.2020.1801519>
- Momtaz, S. and Abdollahi, M., 2008. A systematic review of the biological activities of *Satureja* L. species. *Pharmacologyonline*, 2, pp.34–54.

- Mousavi, S. M., Akbarpour, V., Moradi, H. and Sadeghi, H., 2021. Effect of methanol and ethanol foliar application on some growth characteristics and some of secondary metabolites thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Journal of Plant Production Research*, 28, pp.213–229. <https://doi.org/10.22069/jopp.2021.18130.2685>
- Mozaffarian, V., 2008. *A pictorial dictionary of botanical taxonomy Latin-English-French-Germany-Persian*. Koeltz Scientific Books.
- Mumivand, H., Ebrahimi, A., Morshedloo, M.R. and Shayganfar, A., 2021. Water deficit stress changes in drug yield, antioxidant enzymes activity and essential oil quality and quantity of Tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). *Industrial Crops and Products*, 164, 113381. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113381>
- Pandey, P., Irulappan, V., Bagavathiannan, M.V. and Senthil-Kumar, M., 2017. Impact of combined abiotic and biotic stresses on plant growth and avenues for crop improvement by exploiting physio-morphological traits. *Frontiers in Plant Science*, 8, 537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00537>
- Poorghadir, M., Mohammadi Torkashvand, A., Mirjalili, S.A. and Moradi, P., 2020. Interactions of amino acids (proline and phenylalanine) and biostimulants (salicylic acid and chitosan) on the growth and essential oil components of Savory (*Satureja hortensis* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, 101815. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101815>
- Pradhan, J., Sahoo, S.K., Lalotra, S. and Sarma, R.S., 2017. Positive impact of abiotic stress on medicinal and aromatic plants. *International Journal of Plant Sciences*, 12(2), pp.309–313. <https://doi.org/10.15740/has/ijps/12.2/309-313>
- Rajabzadeh, Sh., Ghasemi, A., Yadegari, M. and Rahimi, T., 2023. Evaluation of the foliar application effect on the chemical compositions of *Rosa damascena* Mill. essential oil of Chaharmahal va Bakhtiari province. *Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants*, 10, pp.80–95. [In Persian]. <https://doi.org/10.30495/ejmp.2022.1954175.1682>
- Reham, M., Sabry, M.A.M., Kandil, M. and Ahmed, S.S., 2016. Growth and quality of sage (*Salvia officinalis*), parsley (*Petroselinum crispum*), and nasturtium (*Tropaeolum majus*) as affected by water deficit. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 5, pp.286–294. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.28.06.13846>
- Sasani, N., Pâques, L.E., Boulanger, G. and Singh, A.P., 2021. Physiological and anatomical responses to drought stress differ between two larch species and their hybrid. *Trees*, 35, pp.1467–1484. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02129-4>
- Shaykh-Samani, A., Ghasemi Pirbalouti, A., Yadegari, M. and Rajabzadeh, F., 2023. Foliar application of salicylic acid improved the yield and quality of the essential oil from *Dracocephalum kotschy* Boiss. under water deficit stress. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 26, pp.769–779. <https://doi.org/10.1080/0972060x.2023.2236647>
- Thakur, M. and Kumar, R., 2020. Foliar application of plant growth regulators modulates the productivity and chemical profile of damask rose (*Rosa damascena* Mill.) under mid hill conditions of the western Himalaya. *Industrial Crops and Products*, 158, 113024. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113024>

- Vojodi Mehrabani, L., 2019. The effects of methanol and ethanol foliar application under salinity stress on some physiological characteristics of *Pelargonium graveolens* L. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 9, pp.63–73.
- Xiaolu, W., Jie, Y., Aoxue, L. and Yu, Ch., 2016. Drought stress and re-watering increase secondary metabolites and enzyme activity in *Dendrobium moniliforme*. *Industrial Crops and Products*, 94, pp.385–393. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.041>
- Yadegari, M., 2017. Irrigation periods and Fe, Zn foliar application on agronomic characters of *Borago officinalis*, *Calendula officinalis*, *Thymus vulgaris* and *Alyssum desertorum*. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 48, pp.307–315. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1269796>
- Yadegari, M., 2018. Foliar application effects of salicylic acid and jasmonic acid on the essential oil composition of *Salvia officinalis*. *Turkish Journal of Biochemistry*, 43, pp.417–424. <https://doi.org/10.1515/tjb-2017-0183>
- Yadegari, M., 2022. Effects of NPK, botamisol, and humic acid on morphophysiological traits and essential oil of three *Satureja* species under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 38, pp.61–80. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2022.356264.3073>
- Yaghoubi Kiaseh, D. and Yadegari, M., 2015. The effect of ethanol and cycloheximide on the vase life of cut flowers *Alstroemeria* (*Alstroemeria hybrida*). *Journal of Ornamental Plants*, 6, pp.73–82.
- Zakerian, F., Sefidkon, F., Abbaszadeh, A. and Kalateh, S., 2020. Drought stress and micorrhiza fungi effects on physiologic and essential oil characters of *Thymus sahandica* Bornm. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 51, pp.189–201. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.267489.1521>
- Zamani, S., Ghasemnejad, A., Alizadeh, M. and Alami, M., 2016. Investigating the effect of salinity and salicylic acid on the activity of phenylalanine ammonialyase enzyme and phenylpropanoids compounds of *Cynara scolymus* L. in vitro. *Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants*, 3, pp.28–39. [In Persian]. <https://doi.org/10.30495/ejmp.2016.694504>
- Zandalinas, S.I., Mittler, R., Balfagon, D., Arbona, V. and Gomez-Cadenas, A., 2017. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiology of Plant*, 162, pp.2–12. <https://doi.org/10.1111/ppl.12540>
- Zhao, D.X., Fu, C.X., Han, Y.S. and Lu, D.P., 2004. Effects of elicitation on jaceosidin and hispidulin production in cell suspension cultures of *Saussurea medusa*. *Process Biochemistry*, 40, pp.739–745. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.01.040>
- Zhao, J. and Sakai, K., 2003. Multiple signaling pathways mediate fungal elicitor-induced β -thujaplicin biosynthesis in *Cupressus lusitanica* cell culture. *Journal of Experimental Botany*, 55, pp.647–656. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg062>

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropsceince.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 77-90

Effect of drought stress, organic manure and potassium on grain yield and quality and water productivity of rapeseed

Hamdollah Eskandari ^a, Kamyar Kazemi ^{*a}

^a Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

*Corresponding Author: kamyar.kazemi@pnu.ac.ir

Received: 31 March 2024

Accepted: 16 May 2024

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.450569.1413

How to cite this article:

Eskandari, H. and Kazemi, K., 2025. Effect of drought stress, organic manure and potassium on grain yield and quality and water productivity of rapeseed. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 77-90. <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2024.450569.1413>

Abstract

Introduction: Oil production is very important in the economy of any country, because oil consumption in the world has an increasing pattern. However, in Iran, there is only about 10% self-sufficiency in oil production, and to meet the needs, it is necessary to import this important food item. For this reason, in recent years, more attention has been paid to the cultivation of oilseeds. Water deficit stress in the stage of reproductive growth severely reduces the yield of rapeseed because the number of seeds and the weight of seeds decrease. In some areas of Khuzestan province, rapeseed is mainly cultivated as a suitable plant for crop diversification and creating plant diversity. On the other hand, periodic conditions in Khuzestan province cause this plant to be cultivated outside the recommended planting date. This issue causes the growth period of rapeseed to coincide with the growth of some other crops. In this situation, some irrigation turns are necessarily allocated to other plants (including wheat which is in the pollination stage and okra which is in the germination stage), which causes rapeseed to face water shortage stress, even in the Flowering is possible. Based on this, it is necessary to apply appropriate management methods to reduce the effects of drought stress on rapeseed during the flowering stage. Thus, the current research was aimed to evaluate the response of rapeseed to organic fertilizer (cow manure) and potassium, and the possible effect of these food sources on reducing the effects of drought stress in the flowering stage on the quantitative and qualitative yield of rapeseed.

Materials and Methods: In this study, which was carried out during 2022-23 growing season at Payame Noor University of Shadegan, the effect of cow manure and potassium on the yield of rapeseed and oil under different irrigation conditions was evaluated. The experiment was split split plot with three replications, in which irrigation (full irrigation and interruption of irrigation during the flowering stage) was applied in the main plot, cow manure (0.0, 15 and 30 t ha⁻¹) in the sub plot and potassium fertilizer (0.0, 75 and 150 kg/ha) were placed in the sub-sub plot. To evaluate the effect of treatments on rapeseed, grain yield and grain yield components (including number of spikelet per plant and number of seeds per spikelet, 1000-grain weight), harvest index, biological yield and water productivity were measured. The quality of the grain was also determined by measuring the amount of protein and oil of the grain.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Results and Discussion: Drought stress during the flowering stage decreased the number of spikelet per plant, the number of grain per spikelet and consequently the grain yield by 27.3%, 19.2% and 19.6% respectively. By water shortage at flowering stage, the protein percentage of rapeseed increased from 24.2 to 27.6 percent. With the consumption of 30 t ha⁻¹ cow manure, the number of silique per plant, the number of grain per silique, and the grain yield increased by 27.4, 57.4, and 14.1 percent, respectively. In terms of grain quality, the use of cow manure improved the oil percentage and yield (10.4% and 24.2%, respectively), but the protein percentage of rapeseed decreased with the use of cow manure. Rapeseed grain quality increased in terms of oil percentage and oil yield in response to potassium consumption (4.3% and 25.8% for oil percentage and yield, respectively). Water productivity in drought stress conditions was about 39% higher than in full irrigation conditions. In any case, the highest water productivity was obtained by applying drought stress and using 30 t ha⁻¹ of cow manure. Under full irrigation conditions, rapeseed had the lowest water productivity and the use of cow manure could not significantly improve water productivity in rapeseed.

Conclusion: Drought stress reduced components of grain yield, grain yield and grain quality (based on oil percentage) of rapeseed. The consumption of potassium and cow manure led to the improvement of the studied traits. The use of cow manure (at the rate of 30 tons per hectare) in drought stress conditions resulted in achieving the highest water productivity. Therefore, it is recommended to use 30 t ha⁻¹ of cow manure and 150 kg ha⁻¹ of potassium fertilizer to achieve the highest yield and quality of rapeseed in conditions of interruption of irrigation during the flowering stage.

Keywords: Grain oil, Grain production, Grain protein, Irrigation interruption, Water consumption

اثر تنش خشکی، کود آلی و پتاسیم بر عملکرد کمی و کیفی دانه و بهره‌وری آب کلزا

حمداله اسکندری^۱، کامیار کاظمی^{*}

۱- گروه علمی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^{*} مسئول مکاتبه: kamyar.kazemi@pnu.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.450569.1413

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲

چکیده

به منظور بررسی اثر کود آلی و پتاسیم بر عملکرد کمی و کیفی دانه و بهره‌وری آب کلزا در شرایط متفاوت آبیاری، آزمایش مزرعهای در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در دانشگاه پیام نور شادگان به اجرا گذاشته شد. آزمایش به صورت کرت دوبار خرد شده با سه تکرار اجرا گردید که در آن آبیاری (آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی) در کرت اصلی، کود گاوی (صفر، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار) در کرت فرعی و کود پتاسیم (صفر، ۷۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) در کرت فرعی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که قطع آبیاری باعث کاهش عملکرد دانه (۱۹/۶ درصد) شد. قطع آبیاری در مرحله گلدهی، درصد پروتئین دانه کلزا را از ۲۴/۲ به ۲۷/۶ درصد افزایش داد. با مصرف ۳۰ تن در هکتار کود گاوی، عملکرد دانه ۱۴/۱ درصد افزایش یافت. مصرف کود گاوی باعث بهبود درصد و عملکرد روغن (به ترتیب ۱۰/۴ و ۲۴/۲ درصد) شد ولی درصد پروتئین دانه کلزا با مصرف ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کود گاوی به ترتیب ۵/۵ و ۱۰/۵ درصد کاهش یافت. با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم، عملکرد دانه ۲۰/۵ درصد بهبود یافت. درصد و عملکرد روغن در واکنش به پتاسیم افزایش یافت (به ترتیب ۴/۳ و ۲۵/۸ درصد). بیشترین بهره‌وری آب با تنش خشکی و مصرف ۳۰ تن در هکتار کود گاوی به دست آمد. در شرایط آبیاری کامل، کلزا کمترین میزان بهره‌وری آب را داشت. استفاده از کود گاوی نیز نتوانست بهره‌وری آب را بهبود بخشد اما مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم، بهره‌وری آب را ۲۲/۳ درصد بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: پروتئین دانه، تولید دانه، روغن دانه، قطع آبیاری، مصرف آب

(Jahani, 2023)

مقدمه

تنش کمبود آب در مرحله رشد زایشی (گلدهی و تولید خورجین) به شدت عملکرد دانه کلزا را با افت مواجه می‌سازد چرا که در اثر کمبود آب، تعداد دانه و وزن دانه دچار کاهش می‌شود (Khani et al., 2018). کمبود آب در مرحله گلدهی، درصد و عملکرد روغن کلزا را نیز با کاهش مواجه می‌سازد (Elferjani and Soolanayakanahally, 2018). در برخی مناطق استان خوزستان، کلزا عمدتاً به عنوان یک گیاه مناسب جهت تنوع زراعی و ایجاد تنوع گیاهی کشت می‌شود. از طرف دیگر، شرایط تناوبی در استان خوزستان باعث می‌شود که این گیاه معمولاً خارج از تاریخ کاشت توصیه شده کشت شود (Rahnama and Jafar Nezhadi, 2009). این موضوع سبب می‌شود دوره رشد کلزا با رشد برخی گیاهان زراعی دیگر مصادف باشد. در این شرایط، برخی نوبت‌های آبیاری الزاماً به گیاهان دیگر (از جمله گندم که در مرحله گرده‌افشانی و بامیه که در مرحله جوانه‌زنی است) اختصاص می‌یابد که باعث مواجه شدن کلزا با تنش کمبود آب، حتی در مرحله گلدهی، می‌شود.

تولید روغن در اقتصاد هر کشور دارای اهمیت زیادی است، چرا که مصرف روغن در جهان دارای یک الگوی افزایشی است (Dossa et al., 2017). با این حال، در ایران تنها حدود ۱۰ درصد خودکفایی در تولید روغن وجود دارد (Eskandari and Kazemi, 2024) و برای تامین نیازهای کشور، واردات این ماده غذایی مهم ضروری است. به همین دلیل در سال‌های اخیر، توجه بیشتری به کشت دانه‌های روغنی شده است. در این زمینه، کلزا بعد از سویا به عنوان دومین گیاه مهم برای تولید روغن معرفی شده است، چرا که دارای درصد مناسبی از روغن در دانه (بیش از ۴۰ درصد) است (Zali et al., 2020)، به برخی تنش‌های محیطی مقاوم است (Kabooosi et al., 2019) و ترکیب مناسبی از اسیدهای چرب را داراست (Moradbeigi et al., 2018). در این میان، استان خوزستان پتانسیل ویژه‌ای را برای افزایش تولید روغن در کشور ایجاد کرده است چرا که با تولید ۲۹۱ هزار تن کلزا، سهم ۳۸ درصدی از کل تولید کلزا در کشور (رتبه اول تولید) را به خود اختصاص داده است (Ashraf-

شد که با قطع آبیاری در ۵۰ درصد گلدهی، عملکرد و اجزای عملکرد دانه کاهش پیدا می‌کند ولی کاربرد کود دامی (به عنوان اصلاح کننده‌ی خاک) باعث شد که اثرات تنش خشکی بر گیاه نخود کاهش پیدا کند (Norouzi, 2019). در یک مطالعه دیگر در اقلیم گرم و خشک (استان خوزستان) نیز گزارش شد که در مناطق با کمبود آب آبیاری و یا عدم بارندگی، می‌توان با مصرف ۳۰ تن در هکتار کود دامی از اثرات تنش خشکی در ابتدای مرحله گلدهی گندم، بر عملکرد دانه کاست (Moshatati et al., 2019). در یک اقلیم گرم و خشک (منطقه زابل) مشاهده گردید که مصرف ۲۰ تن در هکتار کود دامی و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم در شرایط تنش خشکی، باعث طولانی‌تر شدن طول دوره فتوسنتز جاری بخصوص در دوره پر شدن دانه در گیاه کینوا می‌شود (Yazdanpoor et al., 2023). در کدو پوست کاغذی در منطقه زابل نتیجه گرفته شد که هر چند کاهش میزان مصرف آب (تنش خشکی) بر خصوصیات فیزیولوژیک گیاه تاثیر منفی دارد اما مصرف کود دامی و پتاسیم تا حدودی از بروز اثرات تنش خشکی جلوگیری می‌کند (Safavi et al., 2017).

به دلیل وجود برخی شرایط در استان خوزستان (الگوی کاشت در جهت افزایش تنوع زیستی و همزمانی دوره رشد گیاهان با هم) وقوع تنش خشکی در دوره‌ی گلدهی کلزا محتمل است. در نتیجه، اعمال روش‌های مدیریتی مناسب برای کاهش اثرات تنش خشکی بر کلزا در مرحله گلدهی ضروری است. بر این اساس، در پژوهش حاضر کوشش شده است تا ضمن بررسی پاسخ کلزا به کود آلی (کود گاوی) و پتاسیم، اثر احتمالی این منابع غذایی بر کاهش اثرات تنش خشکی در مرحله‌ی گلدهی بر عملکرد کمی و کیفی کلزا مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

یک آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۴۰۱-۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور شهرستان شادگان واقع در استان خوزستان (عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰ متر از سطح دریا) اجرا شد. اقلیم منطقه از نوع گرم و خشک بوده و متوسط دما و بارندگی سالیانه آن به ترتیب ۲۸/۸ درجه

بر این اساس، اعمال روش‌های مدیریتی مناسب برای کاهش اثرات تنش خشکی بر کلزا در مرحله گلدهی ضروری است.

استفاده از سطوح مناسب پتاسیم می‌تواند باعث بهبود رشد و عملکرد گیاهان زراعی در شرایط تنش خشکی شود و در نهایت کارایی مصرف آب را بهبود ببخشد. در این مورد در گیاه گندم مشاهده شد که هر چند کاربرد کود پتاسیم تاثیر معنی‌داری بر وزن دانه در شرایط تنش خشکی نداشت ولی باعث افزایش تعداد پنجه بارور در شرایط تنش خشکی متوسط و شدید شد که به واسطه‌ی آن، عملکرد دانه حدود ۲۹ درصد بهبود پیدا کرد (Noori and Talemin, 2022). در گیاه کینوا گزارش شد که تنش خشکی موجب افت میزان روغن دانه می‌شود ولی کاربرد کود پتاسیم می‌تواند تا حدودی اثرات کمبود آب بر تولید روغن را کاهش دهد به طوری که درصد روغن دانه در شرایط استفاده از کود پتاسیم حدود ۴ درصد بهبود یافت (Mirtayebi et al., 2022). در یک پژوهش دیگر در شهرستان ری، در گیاه سویا نتیجه گرفته شد که استفاده از کود پتاسیم می‌تواند باعث بهبود عملکرد دانه‌ی سویا شود (Irani et al., 2018). در تحقیقی که در اقلیم سرد و خشک تبریز در گیاه دانه روغنی کلزا (ارقام اکایی و لیکورد) انجام گرفت مشاهده شد که با افزایش فاصله آبیاری از ۸۰ به ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم توانست اثرات تنش خشکی بر تولید دانه را کاهش دهد به طوری که در این شرایط، طول دوره پر شدن دانه و تعداد خورجین در بوته ۲۸ و ۲۰ درصد بهبود پیدا کردند (Yarnia and Pirouzkah, 2014).

کودهای دامی از منابع مهم تغذیه‌ای در کشاورزی زیستی هستند چرا که علاوه بر تاثیرات مثبت بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین عملکرد گیاهان زراعی، اثرات آن بر بوم‌نظام‌های زراعی حالت تخریبی ندارد. در منطقه کرج در یک مطالعه در سویا مشاهده شد که تنش خشکی ملایم و شدید (به ترتیب آبیاری پس از ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) باعث کاهش عملکرد دانه به میزان ۲۲ و ۳۹ درصد گردید. این در حالی بود که مصرف ۴۰ تن در هکتار کود دامی باعث شد که کاهش عملکرد ناشی از تنش خشکی به طور میانگین به ۱۱ درصد برسد (Poormousavi et al., 2009). در پژوهشی در گیاه نخود در منطقه شاهرود نیز اگر چه ملاحظه

سانتی‌گراد و ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل و برخی خصوصیات اقلیمی منطقه محل اجرای آزمایش در طول دوره رشد گیاه به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ درج شده است.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of the experimental site

عمق	بافت	هدایت الکتریکی	pH	پتاسیم	فسفر	نیترژن	کربن آلی
Depth (cm)	Texture	EC (ds m ⁻¹)		K (mg kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	N (%)	Organic C (%)
0-60	Silt-loam	1.88	7.3	224	14.0	0.08	0.51

جدول ۲ - برخی خصوصیات اقلیمی محل اجرای آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۱-۴۰۲

Table 2- Some climatic properties of the experimental site during 2022-23 growing season.

ماه	حد اقل دمای ماهانه	حداکثر دمای ماهانه	رطوبت نسبی	میزان بارندگی
Month	Monthly minimum temperature (°C)	Monthly maximum temperature (°C)	Relative humidity (%)	Precipitation (mm)
مهرماه	27	38	48	-
October				
آبان	23	31	23	6.2
November				
آذر	18	26.2	65	9
December				
دی	8.6	16.8	68.4	16.5
January				
بهمن	9.8	19.1	78.2	41
February				
اسفند	15.4	24.5	61.3	4
March				
فروردین	17.9	28.2	64.7	-
April				
اردیبهشت	22	37	53	-
April				

فرعی و کود پتاسیم در ۳ سطح (صفر، ۷۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) به عنوان کرت فرعی فرعی در نظر گرفته شدند. برخی خصوصیات کود گاوی استفاده شده در آزمایش در جدول ۳ آمده است.

آزمایش به صورت اسپلیت- اسپلیت پلات در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار اجرا شد. عامل‌های آزمایش شامل آبیاری در ۲ سطح (I₁: آبیاری معمول و I₂: قطع آبیاری در مرحله‌ی گلدهی) در کرت اصلی، کود گاوی در سه سطح (صفر، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کود گاوی پوسیده) در کرت

جدول ۳- محتوای رطوبتی و عناصر غذایی در کود آلی (گاوی) مورد استفاده در آزمایش.

Table 3- Moisture content and nutrients of manure used in the experiment

رطوبت	مس	منگنز	آهن	روی	فسفر	پتاسیم	نیترژن	منیزیم
Moisture content	Cu	Mn	Fe	Zn	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	Mg
(%)	ppm				(%)			
21	21	320	7225	95	0.48	1.64	3.1	0.65

۷۵ کیلوگرم در هکتار اضافه و با استفاده از دیسک با خاک مخلوط شد. در مرحله بعد، در ادامه، اقدام به مشخص کردن

برای تهیه‌ی کرت‌ها، ابتدا زمین با استفاده از گاواهن بشقابی شخم زده شد. در مرحله‌ی بعد، کود پایه اوره به میزان

درصد پروتئین دانه محاسبه شدند. برای اندازه‌گیری عملکرد روغن، ابتدا درصد روغن دانه از ۱۰۰ گرم دانه و با استفاده از روش استخراج از حلال و دستگاه سوکسله دستی (مدل SKU 3307) اندازه‌گیری شد (Joshi et al., 1998) و سپس، از شاخص‌های درصد روغن و عملکرد دانه استفاده گردید. درصد پروتئین دانه نیز با استفاده از دستگاه کج‌دال تعیین شد. بدین صورت که ابتدا میزان نیتروژن دانه تعیین گردید و برای محاسبه درصد پروتئین، درصد نیتروژن در عدد ۶/۲۵ ضرب گردید (Eskandari et al., 2009).

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTATC آنالیز شدند. برای مقایسه‌ی میانگین‌ها، از آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد استفاده گردید. شکل‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی آبیاری بر صفات عملکرد بیولوژیک، درصد روغن دانه و عملکرد روغن اثر معنی‌داری نداشت اما سایر صفات را به طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار داد (جدول ۴).

اثر اصلی کود گاوی تنها در مورد عملکرد بیولوژیک معنی‌دار نشد. همچنین درصد پروتئین تنها صفاتی بود که از اثر اصلی پتاسیم تاثیر نپذیرفت (جدول ۴). برهمکنش آبیاری × کود گاوی بر صفات وزن هزار دانه و شاخص برداشت (در سطح احتمال پنج درصد) و بهره‌وری آب (در سطح احتمال یک درصد) معنی‌دار شد ولی بر سایر صفات، اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۴). سایر برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه، شامل آبیاری × پتاسیم، کود گاوی × پتاسیم و آبیاری × کود گاوی × پتاسیم، اثر معنی‌داری بر صفات اندازه‌گیری شده کلزا نداشتند (جدول ۴).

قطع آبیاری در مرحله گلدهی باعث کاهش تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و به تبع آن عملکرد دانه شد به طوری که این صفات به ترتیب ۲۷/۳، ۱۹/۲ و ۱۹/۶ درصد کاهش پیدا کردند (شکل ۱).

اثر قطع آبیاری بر درصد پروتئین دلنه کلزا مثبت بود به طوری که در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی، درصد پروتئین دانه کلزا از ۲۴/۲ به ۲۷/۶ درصد افزایش یافت (شکل ۱).

حدود کرت‌ها شد و سپس مقادیر کود آلی (کود گاوی) و کود پتاسیم (از منبع سولفات پتاسیم) بر اساس تیمارهای آزمایشی به زمین اضافه گردید و به صورت دستی با خاک مخلوط شد. سپس، با استفاده از فاروئر، جوی و پشته‌ها تهیه شدند.

کشت در ۳۰ آبان انجام گرفت. هر کرت شامل شامل ۶ خط کاشت به طول ۴ متر بود. بذور کلزا (رقم هایولا ۴۰۱) با فاصله ردیف ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها ۴ سانتی‌متر با تراکم ۸۰ بوته در متر مربع (Kalantar Ahmadi et al., 2014) به صورت ردیفی کشت شدند. همچنین فاصله بین کرت‌ها یک و نیم متر و فاصله بین بلوک‌ها دو متر در نظر گرفته شد. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و به صورت نشتی (نشست آب از جوی به سمت پشته) انجام شد. برای جلوگیری از خروج آب پس از آبیاری، انتهای کرت‌ها بسته شد. کاشت بذرها (بر اساس تاریخ مرتبط با تیمار) با تراکم بالا انجام گرفت تا از سبزشدن گیاهچه‌ها اطمینان حاصل شود. بعد از استقرار گیاهچه‌ها در مزرعه (مرحله‌ی چهار برگی)، کرت‌ها تا تراکم مطلوب (۸۰ بوته در هکتار) تنک شدند. در طول دوره‌ی رشد، علف‌های هرز به صورت وجین دستی کنترل شدند.

در هر مرحله آبیاری، حجم آب آبیاری با استفاده از کنترل اندازه‌گیری و برای محاسبه‌ی بهره‌وری آب، عملکرد (دانه و روغن) بر میزان آب مصرف شده (بر حسب متر مکعب در هکتار) تقسیم گردید (Eskandari and Alizadeh-Amraie, 2019):

$$WP = [Y / Ig] \quad (1)$$

در این رابطه WP، بهره‌وری آب، Y عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار و Ig مصرف آب (مترمکعب در هکتار) می‌باشد. ورود به مرحله گلدهی برای یک کرت، زمانی در نظر گرفته شد که حداقل ۶۰ درصد بوته‌های هر کرت وارد مرحله گلدهی شدند. در این مرحله، یک نوبت آبیاری قطع گردید. در مراحل بعدی رشد گیاه شامل دوره پر شدن دانه و رسیدگی، آبیاری به شکل معمول انجام گرفت.

در مرحله‌ی رسیدگی، بوته‌های هر کرت بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای برداشت شدند و عملکرد دانه و صفات مرتبط با آن شامل تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، درصد روغن دانه و

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده کلزا در واکنش به آبیاری، کود گاوی و پتاسیم

Table 4- Analysis of variance of measured traits of rapeseed in response to irrigation, manure and potassium											
Mean square مربعات میانگین											
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	خورجین در بوته Silique per plant	دانه در خورجین Grain per silique	وزن هزار دانه 1000- grain weight	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	درصد روغن Oil percentage	عملکرد روغن Oil yield	درصد پروتئین Protein percentage	بهره‌وری دانه WP
تکرار Replication	2	1023 ^{ns}	26.2 ^{ns}	0.571*	196675 ^{ns}	1571734 ^{ns}	8.10 ^{ns}	2.79 ^{ns}	49972 ^{ns}	5.15 ^{ns}	0.02 ^{ns}
آبیاری Irrigation (I)	1	27880*	253**	5.80**	2869494*	8394568 ^{ns}	172*	74.2 ^{ns}	728945 ^{ns}	152*	0.421*
خطا Error	2	183	1.72	0.022	184204	690520	9.19	7.19	39708	3.19	0.015
کود گاوی Manure (M)	2	8192**	668**	4.70**	1306820**	4675909 ^{ns}	48.7**	89.3**	411816**	21.5*	0.109**
I × M	2	76.2 ^{ns}	6.5 ^{ns}	0.582*	246456 ^{ns}	2239746 ^{ns}	6.45*	0.551 ^{ns}	26716 ^{ns}	1.02 ^{ns}	0.049**
خطا Error	8	110	11.1	0.101	101113	688223	0.855	2.74	21150	2.96	0.003
پتاسیم Potassium (K)	2	2441**	192**	1.36**	707962**	2469130*	27.9*	14.1**	178502**	9.02 ^{ns}	0.053 ^{ns}
I × K	2	37.2 ^{ns}	1.5 ^{ns}	0.042 ^{ns}	24776 ^{ns}	3373 ^{ns}	7.58 ^{ns}	0.100 ^{ns}	1793 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.008 ^{ns}
M × K	4	19.7 ^{ns}	0.167 ^{ns}	0.012 ^{ns}	53295 ^{ns}	21798 ^{ns}	5.33 ^{ns}	0.219 ^{ns}	12107 ^{ns}	0.167 ^{ns}	0.003 ^{ns}
I × M × K	4	27.7 ^{ns}	2.0 ^{ns}	0.012 ^{ns}	2405 ^{ns}	82193 ^{ns}	1.83 ^{ns}	0.273 ^{ns}	137 ^{ns}	0.192 ^{ns}	0.001 ^{ns}
خطا Error	24	332	22.2	0.291	112835	584444	6.43	2.35	24944	2.76	0.009
ضریب تغییرات C.V (%)		12.8	19.9	14.7	15.9	11.3	8.14	3.80	18.2	6.42	17.7

ns, * و ** به ترتیب عدم معنی دار، معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد را نشان می‌دهد

ns, * and ** indicate non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر کود گاوی بر برخی صفات مورد مطالعه در کلزا

Table 5- Mean comparison of the effect of manure on some traits of rapeseed

تیمار کود گاوی Manure treatment (t ha ⁻¹)	خورجین در بوته Silique per plant	دانه در خورجین Grain per silique	عملکرد دانه Grain yield (Kg ha ⁻¹)	روغن دانه grain oil (%)	عملکرد روغن Oil yield (Kg ha ⁻¹)	پروتئین دانه Grain protein (%)
0.0	146c	19.7c	2209b	39.4c	885b	25.6a
15	163b	26.7b	2231ab	41.4b	963ab	24.2ab
30	186a	31.0a	2520a	43.5a	1099a	22.9b

حروف متفاوت در هر ستون بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون توکی می‌باشد

Different letters in each columns indicates significant difference according to Tukey's test

یافت به طوری که با مصرف ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کود گاوی، درصد پروتئین دانه به ترتیب ۵/۵ و ۱۰/۵ درصد کاهش پیدا کرد (جدول ۵).

عملکرد دانه، درصد و عملکرد روغن و همچنین بهره‌وری آب کلزا با مصرف پتاسیم بهبود یافتند (جدول ۶). نتایج نشان داد که با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه و

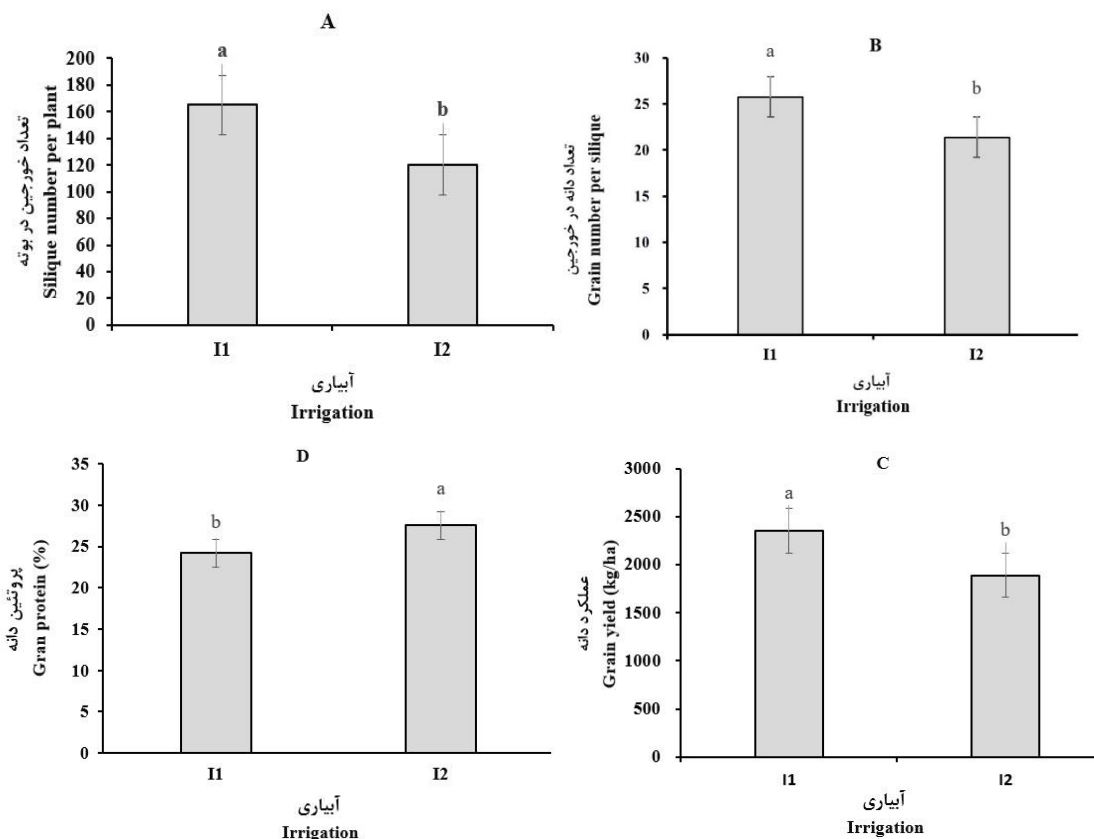
اثر کود گاوی بر عملکرد و برخی اجزای عملکرد دانه کلزا مثبت بود (جدول ۵). به طوری که با مصرف ۳۰ تن در هکتار کود گاوی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و عملکرد دانه به ترتیب ۲۷/۴، ۵۷/۴ و ۱۴/۱ درصد افزایش یافتند (جدول ۳). از نظر کیفیت دانه، مصرف کود گاوی باعث بهبود درصد و عملکرد روغن (به ترتیب ۱۰/۴ و ۲۴/۲ درصد) شد ولی درصد پروتئین دانه کلزا با مصرف کود گاوی کاهش

گاوی به دست آمد. در این تیمار کود آلی، اگر چه تنش خشکی باعث کاهش وزن هزار دانه شد ولی کاهش معنی دار نبود (شکل ۲). کمترین وزن هزار دانه در شرایط قطع آبیاری و عدم کاربرد کود گاوی به دست آمد که به معنی کاهش ۳۴ درصدی وزن دانه بود. به طور کلی مصرف ۳۰ تن در هکتار کود گاوی باعث افزایش ۳۲ درصدی وزن دانه شد (شکل ۲).

با قطع آبیاری و عدم مصرف کود گاوی، شاخص برداشت روند کاهشی پیدا کرد به طوری که بیشترین میزان شاخص برداشت (۳۳/۹ درصد) با مصرف ۳۰ تن در هکتار کود گاوی و آبیاری کامل به دست آمد، این در حالی است که اعمال تنش خشکی و عدم مصرف کود گاوی باعث شد که کمترین میزان شاخص برداشت (۲۷/۲ درصد) به دست آید که به معنی کاهش حدود ۲۰ درصدی شاخص برداشت بود (شکل ۳).

عملکرد دانه به ترتیب ۱۷/۷، ۳۲/۲، ۱۶/۳ و ۲۰/۵ درصد بهبود یافتند. در این مورد، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت نیز با مصرف کود پتاسیم (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب ۱۱/۵ و ۸/۰۳ درصد افزایش یافتند (جدول ۶). کیفیت دانه کلزا از نظر درصد روغن و همچنین عملکرد روغن در واکنش به مصرف پتاسیم افزایش یافت (برای درصد و عملکرد روغن به ترتیب ۴/۳ و ۲۵/۸ درصد). نتایج این مطالعه نشان داد که بهره‌وری آب کلزا با مصرف کود پتاسیم بهبود پیدا می‌کند به طوری که با عدم مصرف پتاسیم، کلزا به ازای هر متر مکعب آب مصرفی، ۴۸۵ گرم، دانه تولید کرد ولی مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم، بهره‌وری آب را ۲۲/۳ درصد بهبود بخشید و باعث شد کلزا با مصرف هر متر مکعب آب، ۵۹۸ گرم دانه تولید کند (جدول ۶).

بیشترین وزن هزار دانه کلزا با مصرف ۳۰ تن در هکتار کود



شکل ۱- مقایسه میانگین تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، عملکرد دانه و درصد پروتئین دانه کلزا در واکنش به قطع آبیاری در مرحله گلدهی

حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار بر اساس آزمون توکی می‌باشد.

Figure 1- Mean comparison of silique number per plant, grain number per silique, grain yield and the percentage of grain protein of rapeseed in response to irrigation interruption during flowering

Different letters in each shape indicates significant difference according to Tukey's test

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر کود پتاسیم بر برخی صفات مورد مطالعه در کلزا

Table 6- Mean comparison of the effect of potassium on some traits of rapeseed

تیمار پتاسیم Potassium treatment (kg ha ⁻¹)	خورجین در بوته Siliques per plant	دانه در خورجین Grain per silique	وزن هزار دانه 1000-grain weigh(g)	عملکرد دانه Grain yield (Kg ha ⁻¹)	عملکرد بیولوژیک biological yield (kg ha ⁻¹)	شاخص برداشت harvest index (%)	روغن دانه grain oil (%)	عملکرد روغن Oil yield (Kg ha ⁻¹)	پروتئین دانه Grain protein (%)
0.0	130b	20.2b	3.38b	1932b	6415a	29.9b	39.5b	770b	480b
75	144ab	24.0ab	3.67ab	2099ab	6722ab	31.3ab	40.2ab	860ab	538ab
150	153a	26.6a	3.93a	2327a	7153a	32.3a	41.2a	969a	598a

حروف متفاوت در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون توکی می‌باشد

Different letters in each columns indicates significant difference according to Tukey's test

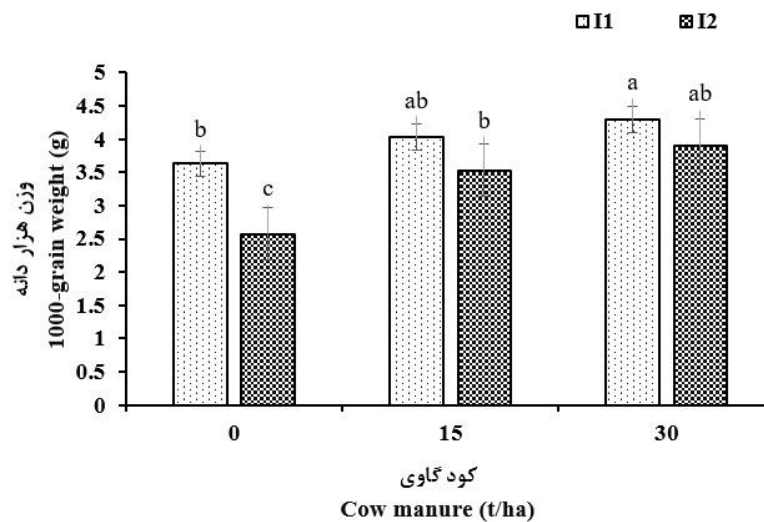
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر برهمکنش آبیاری و کود گاوی بر وزن هزار دانه (گرم) کلزا
حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون توکی می‌باشد

Figure 2- Mean comparison for the interaction of irrigation × manure on 1000-grain weight (g) of rapeseed

Different letters in each columns indicates significant difference according to Tukey's test

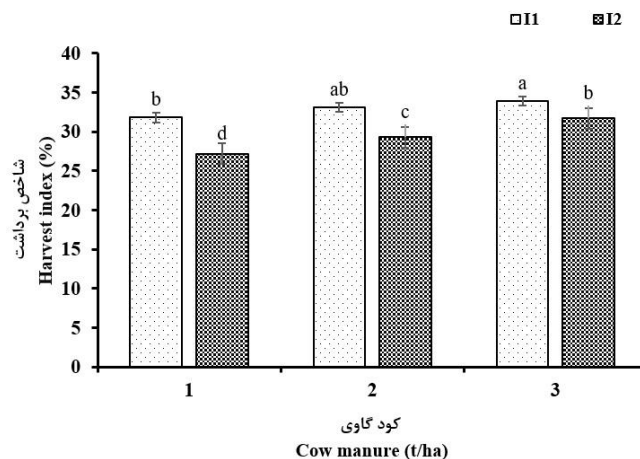
همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد دانه کلزا تحت تاثیر هر جزء عملکرد دانه یعنی تعداد دانه در بوته (تعداد دانه در خورجین و تعداد خورجین در بوته) و وزن دانه است چرا که قطع آبیاری در مرحله گلدهی، هر دو جزء عملکرد دانه را کاهش داد (شکل ۱ و ۲). با این حال، یافته‌های این آزمایش نشان داد که با مصرف کود گاوی می‌توان اثرات منفی تنش کمبود آب بر وزن دانه کلزا را کاهش داد چرا که در مصرف مقادیر ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کود گاوی، تفاوت معنی‌داری بین دو تیمار آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی از نظر وزن دانه وجود نداشت (شکل ۲). از طرف دیگر، این پژوهش نشان داد که تعداد دانه در بوته در مقایسه با وزن دانه به کمبود آب حساسیت بیشتری دارد چرا که با قطع آبیاری در مرحله

عمل تنش خشکی باعث شد که بهره‌وری آب در کلزا افزایش پیدا کند، به طوری که بهره‌وری آب (گرم دانه تولید شده به ازای مصرف هر متر مکعب آب) در شرایط تنش خشکی حدود ۳۹ درصد بیشتر از شرایط آبیاری کامل بود (شکل ۳). در هر حال، بیشترین بهره‌وری آب با اعمال تنش خشکی و مصرف ۳۰ تن در هکتار کود گاوی به دست آمد. در شرایط آبیاری کامل، کلزا کمترین میزان بهره‌وری آب را داشت و استفاده از کود گاوی نیز نتوانست به طوری معنی‌داری میزان بهره‌وری آب در کلزا را بهبود ببخشد (شکل ۴).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کلزا، به تنش کمبود آب حساسیت دارد به طوری که قطع آبیاری در مرحله گلدهی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه آن می‌شود (شکل ۱).

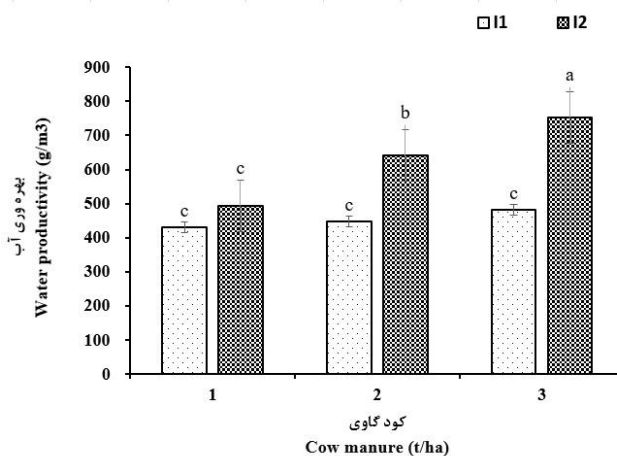
درصد نیاز آبی در اختیار گیاه) تا ۵۸ درصد کاهش یافت و این کاهش به دلیل تاثیر کمبود آب هم بر تعداد و هم بر وزن دانه بود (Asadi et al., 2021).

گلدهی تعداد دانه در بوته ۳۹/۶ درصد کاهش یافت ولی وزن دانه با کاهش ۲۹/۲ درصدی مواجه شد. در این مورد، نتایج مشابهی در گیاه دانه روغنی کنجد گزارش شد که در آن عملکرد دانه با اعمال تنش خشکی (از طریق قرار دادن ۵۰



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر برهمکنش آبیاری و کود گاوی بر شاخص برداشت (درصد) کلزا
حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون توکی می باشد

Figure 3- Mean comparison for the interaction of irrigation × manure on harvest index (%) of rapeseed
Different letters in each columns indicates significant difference according to Tukey's test



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر برهمکنش آبیاری و کود گاوی بر بهره وری آب (گرم بر متر مکعب) کلزا
حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون توکی می باشد

Figure 4- Mean comparison for the interaction of irrigation × manure on water productivity (g m⁻³) of rapeseed
Different letters in each columns indicates significant difference according to Tukey's test

تاثیر قطع آبیاری نمود پیداکرد (جدول ۳ و شکل ۳) به طوری که با اعمال تنش خشکی بر کلزا، شاخص برداشت ۳/۵۳ درصد کاهش یافت. شاخص برداشت، صفتی است که تحت تاثیر عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک قرار دارد. به نظر می رسد در این تحقیق، شاخص برداشت کلزا بیشتر تحت تاثیر عملکرد دانه

در ارقام نپتون و اوکاپی کلزا نیز نتیجه گرفته شد که تنش خشکی در مرحله گلدهی با کاهش تعداد گل‌هایی که به خورجین تبدیل می شود عملکرد دانه را با افت مواجه می کند (Moradbeigi et al., 2018) که با یافته‌های تحقیق حاضر همخوانی دارد. این موضوع در کاهش شاخص برداشت تحت

زایشی را افزایش می‌دهد در نتیجه مواد فتوسنتزی در اختیار تعداد بیشتری دانه قرار می‌گیرد که به افزایش عملکرد دانه منجر می‌شود (Feli et al., 2018). به نظر می‌رسد چنین شرایطی در مطالعه حاضر نیز وجود داشته است چرا که مصرف کود دامی پتاسیم عملکرد دانه کلزا در شرایط تنش خشکی را بهبود بخشید.

وقتی به ازای هر واحد آب مصرفی، تولید بیشتری به دست آید، بهره‌وری آب نیز بیشتر خواهد بود. در واقع، بهره‌وری آب نشان می‌دهد که گیاه در تولید محصول و مصرف آب چگونه عمل کرده است (Hatfield and Dold, 2019). برخی محققین نشان دادند که کاهش مصرف آب برای تولید محصول، با افزایش بهره‌وری آب همراه است. برای مثال، در ذرت دلنه‌ای گزارش شد که کاهش مصرف آب به میزان ۳۳ درصد، باعث افزایش بهره‌وری آب به میزان ۶۲ درصد می‌شود (Abbasi et al., 2022) که با نتایج تحقیق حاضر هماهنگی دارد؛ چرا که در تحقیق حاضر اگر چه در شرایط قطع آبیاری عملکرد دانه از ۲۳۵۰ به ۱۸۸۹ کیلوگرم در هکتار کاهش پیدا کرد ولی مصرف آب نیز از ۵۱۸۷ به ۳۰۰۳ متر مکعب در هکتار رسید که به افزایش بهره‌وری آب منجر گردید. همچنین در این پژوهش، مصرف کود گاوی باعث افزایش بهره‌وری آب گردید به طوری که در صورت عدم مصرف کود گاوی، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای آبیاری از نظر بهره‌وری آب وجود نداشت (شکل ۴) در حالی که مصرف ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کود گاوی باعث بهبود معنی‌دار بهره‌وری آب شد (شکل ۴). پتاسیم، یک عنصر غذایی است که نقش مهمی در کنترل باز و بسته شدن روزنه‌ها بر عهده دارد و از این طریق، عملکرد دانه و بهره‌وری آب را متاثر می‌سازد (Kuchak Dezfuli et al., 2019). به عبارتی، می‌توان نتیجه گرفت که کود گاوی از طریق تاثیر بر عملکرد دانه و عنصر پتاسیم از طریق تاثیر بر عملکرد دانه و باز و بسته شدن روزنه‌ها (و در نتیجه کاهش تلفات آب) بر بهبود بهره‌وری آب کلزا تاثیر داشتند. در نهایت می‌توان عنوان کرد که مدیریت آب از طریق تغییر در کمیت آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه سبب به حداقل رسیدن تلفات آب و افزایش بهره‌وری آب می‌شود (Balazadeh et al., 2022) به طوری که در شرایط تنش کم‌آبی، کلزا با بستن روزنه‌ها (به طور عمده از طریق تاثیر عنصر پتاسیم) باعث کاهش تعرق و تلفات آب شده که به

قرار داشت. چرا که کلزا یک گیاه رشد نامحدود است و تولید شاخه‌های فرعی توسط آن در تمام طول دوره رشد می‌تواند ادامه داشته باشد (Jabbari et al., 2020). به همین دلیل، عملکرد بیولوژیک کلزا از تنش خشکی متاثر نشد (جدول ۳) و کاهش شاخص برداشت را می‌توان به کاهش تولید دانه مرتبط دانست. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات دیگر مبنی بر اینکه اگر تاثیر تنش خشکی بر اندام‌های رویشی بیشتر از عملکرد دانه باشد، در این صورت با وقوع تنش خشکی، شاخص برداشت افزایش پیدا می‌کند؛ اما اگر تنش خشکی بر عملکرد دانه تاثیر بیشتری داشته باشد، این حالت به کاهش شاخص برداشت منجر می‌شود (Eskandari and Kazemi, 2019) مطابقت دارد.

کمبود آب، تنشی است که عملکرد گیاهان زراعی را به دو طریق دچار کاهش می‌کند، اول تغییر در روابط آبی و کاهش پتانسیل آبی سلول‌های گیاه و دوم کاهش دسترسی گیاه به سایر منابع محیطی به ویژه عناصر غذایی (Eskandari and Kazemi, 2019). به عبارت دیگر، وقتی گیاه با کمبود آب مواجه می‌شود، دسترسی آن به مواد غذایی نیز محدود می‌شود که اثر آن بر تولید دانه مشخص است. استفاده از کود گاوی که عناصر غذایی را در یک محدوده‌ی زمانی طولانی مدت در اختیار گیاه قرار می‌دهد باعث می‌شود اثر کمبود آب بر گیاه تا حدودی جبران شود (Varavipour, 2007). پتاسیم نیز عنصری است که از طریق تنظیم فشار اسمزی و باز و بسته شدن روزنه‌ها، نقش مهمی در تعادل آبی گیاه ایفا می‌کند. این عنصر غذایی علاوه بر اینکه باعث بهبود رشد و کیفیت محصول گیاهان زراعی می‌شود، در افزایش تحمل گیاهان زراعی به تنش‌های محیطی - از جمله تنش خشکی - نقش مهمی دارد (Haidari and Asgharipour, 2012). این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد چرا که مصرف پتاسیم باعث بهبود عملکرد دانه و روغن کلزا گردید (جدول ۶). گزارش شده است که مصرف همزمان کود دامی و پتاسیم باعث توانمندی بیشتر گیاه برای جذب آب و عناصر غذایی باعث افزایش عملکرد و اجزای عملکرد دانه می‌شود چرا که در این شرایط طول دوره پر شدن دانه بیشتر شده و گیاه فرصت بیشتری برای پر کردن دانه در اختیار دارد (Yazdanpoor et al., 2023). همچنین اشاره شده است که پتاسیم تداوم و بقای برگ روی پایه مادری در طول دوره

دانه (بر اساس درصد روغن) کلزا را کاهش داد. مصرف پتاسیم و کود گاوی منجر به بهبود صفات مورد بررسی شد. مصرف کود گاوی (به میزان ۳۰ تن در هکتار) در شرایط تنش خشکی، باعث دستیابی به بالاترین بهره‌وری آب گردید. لذا کاربرد ۳۰ تن در هکتار کود گاوی و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیمی برای دست یابی به بالاترین عملکرد و کیفیت دانه کلزا در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی قابل توصیه است.

افزایش کارایی مصرف آب منجر می‌شود. در سورگوم علوفه‌ای نیز بهبود بهره‌وری آب در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (Darvishi Aghajani et al., 2021) که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری کلی

تنش خشکی، اجزای عملکرد دانه، عملکرد دانه و کیفیت

References

- Abbasi, N., Rafiee, A. and Hajinia, S., 2023. Investigation of growth, yield and water use efficiency of different grain corn cultivars under furrow and drip irrigation methods (type). *Crop Physiology Journal*, 14(56), pp.101-116. [In Persian].
- Asadi, H., Baradaran, R., Seghatoleslami, M.J. and Mousavi, S.G., 2021. Evaluation of drought tolerance in some sesame genotypes based on stress tolerance indices. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 4(18), pp.413-433. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/jcesc.2020.88165>
- Ashraf-Jahani, M.S., 2023. *Agricultural statistics of crops*. Ministry of Agriculture Jahad. [In Persian].
- Balazadeh, M., Zamanian, M., Golzardi, F. and Mohammadi Torkashvand, A., 2023. Effect of different irrigation regimes on the production of forage, protein, energy, and water use efficiency in the Berseem clover cultivars. *Crop Physiology Journal*, 14(56), pp.5-23. [In Persian].
- Darvishi Aghajani, S., Noor Mohammadi, G., Alavi Fazel, M., Ardakani, M.R. and Sarajughi, M., 2021. Investigation of the Role of Biochar and Change of Cultivation Pattern in Alternate Irrigation Conditions on Morphological Traits, Dry Forage Yield and Water Use Efficiency of Forage Sorghum. *Crop Physiology Journal*, 13(51), pp.135-157. [In Persian].
- Dossa, K., Li, D., Wang, L., Zheng, X., Liu, A., Yu, J., Wei, X., Zhou, R., Fonckea, D., Diouf, D., Liao, B., Cissé, N. and Zhang, X., 2017. Transcriptomic, biochemical and physio-anatomical investigations shed more light on responses to drought stress in two contrasting sesame genotypes. *Scientific Reports*, 7, 8755. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09397-6>
- Elferjani, R. and Soolanayakanahally, R., 2018. Canola responses to drought, heat, and combined stress: shared and specific effects on carbon assimilation, seed yield, and oil composition. *Frontier in Plant Science*, 9, pp.12-24. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01224>
- Eskandari, H. and Alizadeh-Amraie, A., 2019. Effect of planting pattern and alternate furrow irrigation on productivity of water and land under wheat and Persian clover intercropping. *Journal of Water Research in Agriculture*, 2(32), pp.179-186. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/jwra.2018.116952>
- Eskandari, H. and Kazemi, K., 2019. Evaluation of irrigation levels and soil fertility management on seed and oil yield of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1), pp.111-122. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2018.1254.1256>

- Eskandari, H. and Kazemi, K., 2024. Evaluation of rapeseed production and water use efficiency in irrigation regimes and vermicompost levels in different planting dates. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(1), pp.103-120. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/JCESC.2023.83981.1263>
- Eskandari, H., Zehtab-Salmasi, S., Ghasemi-Golezani, K. and Gharineh, M.H., 2009. Effects of water limitation on grain and oil yields of sesame cultivars. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(2), pp.339-342.
- Feli, A., Maleki Farahani, S. and Besharati, H., 2018. The impact of chemical urea fertilizer and different organic and biofertilizers on both quantitative and qualitative yield and some soil properties in cultivation of saffron. *Crop Improvement*, 20, pp.345-356. [In Persian].
- Haidari, M. and Asgharipour, M.R., 2012. Effect of different levels of potassium sulfate and drought stress on yield and yield attributes of grain sorghum (*Sorghum bicolor*). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 10(2), pp.374-381. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/GSC.V10I2.16244>
- Hatfield, J.L. and Dold, C., 2019. Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Frontiers in Plant Science*, 10, pp.1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Irani, A., Sadeghi pour, A. and Rashidi Asl A., 2018. Evaluation of the effect of potassium fertilizer on yield and yield components on soybean under drought stress. *Journal of Applied Researches in Technical and Engineering*, 12(2), pp.275-286. [In Persian].
- Jabbari, H., Khosh Kholgh Sima, N.A., Akbari, G.A. and Shirani rad, A.H., 2020. Evaluation of the dry matter remobilization to seeds in winter rapeseed cultivars under drought stress conditions. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(1), pp.143-156. [In Persian]. <https://doi.org/10.47176/jcpp.10.1.33261>
- Joshi, N.L., Mali, P.C. and Sexena, A., 1998. Effect of nitrogen and sulphur application on yield and fatty acid composition of mustard (*Brassica juncea* L.). Oil. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 180, pp.59-63. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1998.tb00370.x>
- Kaboosi, K., Nodehi, A. and Shamiati, M., 2019. The effects of salinity stress and organic fertilizer on yield, oil and water use efficiency of different cultivars of canola. *Water Resources Engineering*, 11(39), pp.87-100. [In Persian].
- Kalantar Ahmadi, S.A., Ebadi, A., Siadat, S.A. and Tavakoli Hasanaklou, H., 2014. Effect of heat stress due to sowing date on grain yield of rapeseed cultivars in north Khuzestan conditions in Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 16(1), pp.62-76. [In Persian].
- Khani, R., Sadeghi Bakhtvari, A.R., Pasban Eslam, B. and Sarabi, V., 2018. Effects of drought stress on canola (*Brassica napus* L.) genotypes yield and yield Components. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(4), pp.914-924. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/GSC.V15I4.58356>
- Kuchak Dezfuli, M., Shokuhfar, A., Lack, S., Alavifazel, M. and Mojaddam, M., 2019. The effect of potassium and zinc spraying time on grain yield, morpho-physiological characteristics and the amount of elements in corn leaf under deficit irrigation conditions. *Crop Physiology Journal*, 11(44), pp.91-111. [In Persian].
- Mirtayebi, M., Bostani, A., Diyanat, M. and Azadi, A., 2022. Effect of drought stress, bio fertilizer and potassium nano fertilizer on leaf area index, 1000-seed weight, harvest index and quality of quinoa (*Chenopodium quinoa*

- Willd) seed. *Journal of Crop Production and Processing*, 12(1), pp.133-150. [In Persian].
<https://doi.org/10.47176/jcpp.12.1.36821>
- Moradbeigi, L., Gholami, A., Shirani Rad, A.H., Abbasdokht, H. and Asghari, H.R., 2018. Effect of drought stress and delay cultivation on grain yield, oil yield and fatty acids composition in canola. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 2, pp.135–151. [In Persian].
- Moshatati, A., Khodaie Jaghan, A., Siadat, S.A., Mousavi, S.H. and Rezaie, M., 2020. The effect of cattle manure and zeolite on bread wheat yield under drought stress condition. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(4), pp.1179-1188. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2019.2124.1527>
- Noori, S.M. and Taliman, N.A., 2022. Effect of drought stress and chemical fertilizers on wheat productivity and grain quality. *Plant Production and Genetics*, 3(1), pp.43-56. [In Persian].
<https://doi.org/10.34785/J020.2022.800>
- Norouzi, A., 2019. *Effect of zeolite and manure on chickpea yield under deficit irrigation* (MSc thesis). Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology. [In Persian].
- Poormousavi, S.M., Galavi, M., Daneshian, J., Ghanbari, A., Basirani, N. and Jonoobi, P., 2009. Effect of animal manure application on quantitative and qualitative yield of soybean in drought stress condition. *Iranian Journal of Field Crop Research*, 40(1), pp.160–173. [In Persian].
- Rahnama, A.A. and Jafar Nezhadi, A.R., 2009. Determination of optimum nitrogen levels in different planting dates of canola in Khuzestan. *Plant Production*, 1(1), pp.53-63. [In Persian].
- Safavi, F., Galavi, M., Ramroodi, M. and Asghari poorchaman, M.R., 2017. The effect of superabsorbent polymer, animal manure and potassium on some physiological and morphological characteristics of paper skin pumpkin under drought stress conditions. *Shabak*, 9, pp.1-8. [In Persian].
- Varavipour, M., 2011. *Generals of Soil Science*. Payame Noor University. [In Persian].
- Yarnia, M. and Pirouzkhah, S., 2014. Effect of potassium levels on drought tolerance in rapeseed. *Crop Improvement Sciences*, 2(3), pp.31-34. [In Persian].
- Yazdanpoor, A., Soluki, M., Dahmardeh, M. and Khammari, I., 2023. Investigating the combined effect of organic and chemical fertilizers on quantitative and qualitative yield of quinoa (*Chenopodium quinoa*) under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 15(4), pp.1052–1072. [In Persian].
<https://doi.org/10.22077/escs.2021.4231.1991>
- Zali, H., Hasanloo, T., Sofalian, O. and Asghari, A., 2020. Evaluation of drought stress effect on seed oil yield and fatty acid composition in canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 3(13), pp.735-747. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2205.1552>

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 91-104

Evaluation of the foliar application of iron sulfate on the quantitative and qualitative yield of grain maize cultivars

Milad Soltani Nejad ^a, Mehdi Dahmardeh ^{*b}, Eissa Khammari ^b

^a M.Sc Student of Agroecology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

^b Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

*Corresponding Author: dr.dahmardeh@uoz.ac.ir

Received: 24 July 2022

Accepted: 12 September 2022

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.353238.1258

How to cite this article:

Soltani Nejad, M., Dahmardeh, M. and Khammari, E., 2025. Evaluation of the foliar application of iron sulfate on the quantitative and qualitative yield of grain maize cultivars. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 91-104. <https://doi.org/10.22034/csrar.2023.353238.1258>

Abstract

Introduction: Nowadays, with the growing global population, the sustainable production of agricultural products to feed humans is one of the ministerial problems that cause researchers to find solutions to increase crop products by increasing the cultivated area and yield per unit area. Under high soil pH absorbing nutrients through the roots is undesirable. Thus, it is essential to use foliar application and foliar absorption of nutrients in providing nutrients needed by plants. Iron is one of the low-use essential elements for the growth of plants, and generally, the amount of this element in the soil is high. But some chemical and physical properties of soils, such as the lack of organic matter, and alkaline pH, prevent the absorption of iron by the plant. This research aims to investigate the effect of iron foliar application on grain maize cultivars' quantitative and qualitative yield.

Material and Methods: This experiment was conducted in the agricultural year of 2015 in the educational-research farm of the Agricultural Research Institute of Zabol University in a factorial design in the form of a basic design of random complete blocks with 3 replications. Maize cultivars in four levels including (Single Cross 704, Limagrain LG 36.07, Iranian Maxima and Hungarian Maxima) as the first factor and the foliar application of the micronutrient iron sulfate in concentrations (control, 3 and 6 gr.lit⁻¹) as the second factor was performed the six-leaf stage and before flowering. Each experimental plot had four planting rows with a distance of 40 cm, the distance between the planting rows was 15 cm, and the length of the planting line was 4 meters. Analysis of variance data was done with SAS software version 9.1 and comparison of means was done using Duncan's test at the 5% level.

Results and Discussion: The results of the means comparison showed that the highest seed yield (4251.6 kg ha⁻¹) was obtained from the Limagrain cultivar under foliar application of 6 g lit⁻¹ iron sulfate showed an increase of 49.13% compared to the lowest value. Considering the role of the iron element in the enzymes involved in the photosynthetic process of the plant, it can be said that the foliar application of iron sulfate at a concentration of 6 g lit⁻¹ has improved the photosynthetic activity of the plant and by increasing the access of the reproductive organs of the plant to the photosynthetic materials, the weight of one thousand seeds and the length of the cob (the number of seeds formed in the row) and finally the grain yield increased. Also, the results showed that the seed nitrogen and



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

protein percentage was the highest in the Limagrין cultivar (1.4% and 8.75%, respectively). Also, the seed nitrogen and protein percentage increased under foliar application by 6 g lit⁻¹ iron sulfate (1.33% and 8.31%, respectively). The seed nitrogen percentage increased by 9.02%, and the seed protein percentage showed an increase of 8.9% compared to the control treatment. Based on the results of this research, it was found that foliar application of iron sulfate significantly improved the protein of maize seeds compared to the control. Considering that the percentage of protein is related to nitrogen, thus iron sulfate foliar application showed a positive effect on both traits. It concluded that foliar application of iron sulfate has participated in protein production in maize plants.

Conclusion: Considering that many of the soils of arid and semi-arid regions have calcareous characteristics and alkaline reactions, foliar application of the micronutrient element iron during the vegetative growth stage can cause the absorption of other nutrients, growth of meristem tissues, increase in greenness and photosynthesis of leaves and finally cause increase performance. The results of the present experiment showed that using the foliar application and foliar absorption is necessary for providing iron micronutrient elements. As a result, foliar application of iron sulfate on maize plants can compensate for the lack of this essential element in the soil of dry areas. Based on the obtained results, it was determined that the use of the Limagreen cultivar under foliar application of 6 g lit⁻¹ iron sulfate can produce a good yield in the Sistan region.

Keywords: Chlorophyll, Iron, Limagrין cultivar, Micronutrients, Seed protein

ارزیابی محلول‌پاشی سولفات آهن بر عملکرد کمی و کیفی ارقام ذرت دانه‌ای

میلاذ سلطانی نژاد^۱، مهدی دهمرده^{۲*}، عیسی خمیری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

* مسئول مکاتبه: dr.dahmardeh@uoz.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.353238.1258

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

چکیده

عناصر ریزمغذی در گیاهان زراعی با تأثیر بر فرایندهای رشد و نمو، شاخص‌های کمی و کیفی آن‌ها را تغییر می‌دهند. با تکمیل مصرف عناصر غذایی کم‌مصرف از طریق محلول‌پاشی، می‌توان وضعیت رشد گیاه را در شرایط بحرانی بهبود بخشید. این پژوهش به منظور ارزیابی محلول‌پاشی سولفات آهن بر عملکرد کمی و کیفی ارقام ذرت دانه‌ای، طی سال زراعی ۹۴-۹۵ در شهرستان زهک به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل چهار رقم ذرت دانه‌ای (سینگل کراس ۷۰۴، لیماگرین LG 36.07، ماکسیمای ایرانی و ماکسیمای مجارستانی) به عنوان عامل اول و محلول‌پاشی سولفات آهن در سه سطح (عدم محلول‌پاشی (شاهد)، سه و شش گرم در لیتر) به عنوان عامل دوم بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین عملکرد دانه (۴۲۵/۱۶ کیلوگرم در هکتار) از رقم لیماگرین در شرایط محلول‌پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن، افزایش ۴۹/۱۳ درصدی را در مقایسه با کمترین مقدار نشان داد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که درصد نیتروژن و پروتئین دانه در رقم لیماگرین (به ترتیب ۱/۴ درصد و ۸/۷۵ درصد) دارای بیشترین مقدار بود. هم‌چنین درصد نیتروژن و پروتئین دانه در شرایط محلول‌پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن (به ترتیب ۱/۳۳ درصد و ۸/۳۱ درصد) افزایش یافت. درصد نیتروژن افزایش ۹/۰۲ درصدی و مقدار پروتئین، افزایش ۸/۹ درصدی را نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) نشان دادند. به طور کلی جهت رسیدن به حداکثر عملکرد دانه استفاده از رقم لیماگرین در شرایط محلول‌پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آهن، پروتئین دانه، رقم لیماگرین، عناصر ریزمغذی، کلروفیل

مقدمه

(2010). کمبود آهن یکی از اختلالات تغذیه‌ای عمومی در بین گیاهان عالی که در خاک‌های آهکی و قلیایی رشد می‌کنند است، زیرا دامنه مطلوب pH خاک در جذب آهن حدود ۵ تا ۵/۵ است (Bojovic et al., 2012). خاک‌های ایران به دلیل pH زیاد، جذب عناصر ریزمغذی مانند آهن را از طریق ریشه با مشکل مواجه می‌کنند؛ بنابراین استفاده از روش محلول‌پاشی و جذب برگی عناصر غذایی در تأمین مواد غذایی مورد نیاز گیاه بسیار حایز اهمیت است، به گونه‌ای که دامنه نوسانات pH از اسیدی تا قلیایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر آن ندارد (Said-Alahl and Abeer, 2010).

در نتیجه اصلاح کمبود آهن در خاک‌های آهکی از طریق محلول‌پاشی سولفات می‌تواند کارآمدتر از کاربرد خاکی کودهای حاوی آهن باشد (Fageria et al., 2009). هم‌چنین استفاده از این روش باعث می‌شود که آلودگی‌های زیست‌محیطی و آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی به حداقل رسیده و می‌توان در

در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، میلیون‌ها انسان، نیاز پروتئین و انرژی خود را از ذرت تأمین می‌کنند. دانه ذرت ۱۵ تا ۵۶ درصد از کل انرژی روزانه مورد نیاز انسان را در کشورهای در حال توسعه تأمین می‌کند (Razzaq et al., 2012). ذرت رتبه سوم را از نظر سطح زیر کشت پس از گندم و برنج به خود اختصاص داده است و دارای عملکرد در واحد سطح بیشتری نسبت به سایر محصولات زراعی است. ذرت نیاز کودی بالایی دارد و با توجه به تحقیقات انجام شده نسبت به کاربرد کودهای کم‌مصرف واکنش خوبی نشان می‌دهد. آهن یکی از عناصر ضروری کم مصرف برای رشد گیاهان بوده و عموماً مقدار این عنصر در خاک زیاد است، اما برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک‌ها از جمله کمبود مواد آلی، pH قلیایی، مصرف زیاد کودهای فسفردار، مانع از جذب آهن توسط گیاه می‌شود (Ghasemian et al., 2010; Narimani et al.,

محلول پاشی آهن، منگنز و روی بر عملکرد، خاکستر و درصد پروتئین سورگوم علوفه‌ای در شرایط اقلیمی اصفهان بیان داشتند که آهن، روی و منگنز تأثیر مثبتی بر عملکرد و کیفیت این گیاه داشتند. بالاترین ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، عملکرد علوفه تازه، عملکرد برگ و ساقه خشک، عملکرد خشک کل و وزن خشک برگ/وزن خشک ساقه در کاربرد روی، آهن و منگنز به دست آمد و بیشترین تعداد پنجه مربوط به ترکیب روی و منگنز بود. حداکثر درصد خاکستر و درصد پروتئین مناسب نیز در استفاده از روی، آهن و منگنز به دست آمد. بنابراین، بر اساس نتایج به نظر می‌رسد که محلول پاشی عناصر ریزمغذی برای دست‌یابی به عملکرد علوفه بالا و کسب کیفیت بالا مناسب است (Soleymani and Shahrajabian, 2016).

ذرت گیاهی پرمصرف بوده و نیاز غذایی آن در مقایسه با سایر غلات بیشتر است. هم‌چنین تعادل عناصر غذایی برای رشد و نمو گیاه ذرت ضروری است و در این شرایط بهره‌وری و تولید آن بسیار مناسب است. از طرفی خاک‌های زراعی کشور فقیر از مواد آلی و عناصر غذایی بوده و در تمام مناطق خشک و نیمه‌خشک که خاک‌ها آهکی هستند،

فقر عناصر غذایی بسیار زیاد است. در این شرایط عدم تعادل عناصر غذایی در خاک بر رشد و نمو گیاهان زراعی تأثیر منفی می‌گذارد. به منظور رشد مطلوب گیاه و افزایش عملکرد و کیفیت محصول باید عناصر ریزمغذی مانند آهن به صورت محلول پاشی در مزارع ذرت استفاده شود. بنابراین مطالعه حاضر با هدف ارزیابی محلول پاشی سولفات آهن بر عملکرد کمی و کیفی ارقام ذرت دانه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۵-۹۴ در مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده کشاورزی بقیه‌الله اعظم دانشگاه زابل واقع در شهرستان زهک با عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی با ارتفاع ۴۸۰ متر از سطح دریا اجرا گردید (www.sbportal.ir). نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری به صورت تصادفی از چند ناحیه انتخاب شد و جهت تجزیه خاک به آزمایشگاه ارسال گردید که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

راستای اهداف کشاورزی پایدار گام برداشت (Shabahang, 1997).

در مطالعه‌ای به منظور بررسی اثرات آهن، روی و منگنز و روش مصرف آنها بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت شیرین، گزارش گردید که محلول پاشی عناصر کم‌مصرف می‌تواند نقش معنی‌داری در بهبود عملکرد، اجزای عملکرد و درصد پروتئین ذرت داشته باشد. به گونه‌ای که بیشترین عملکرد دانه از تیمار محلول پاشی با کود میکرو و کمترین عملکرد دانه به تیمار شاهد تعلق داشت. در بیشتر این صفات محلول پاشی آهن و روی نسبت به محلول پاشی منگنز برتری نشان داد. هم‌چنین تحت تأثیر روش مصرف عناصر کم‌مصرف، محلول پاشی باعث افزایش تعداد دانه در بلال، عملکرد دانه و درصد قندهای محلول دانه نسبت به مصرف خاکی شد. به علاوه هر سه نوع کود به کار رفته باعث افزایش معنی‌دار درصد قندهای محلول دانه نسبت به شاهد شدند. بر اساس نتایج آن‌ها، استفاده از عناصر کم‌مصرف به صورت محلول پاشی نسبت به مصرف خاکی نتایج بهتری را نشان داد (Mataei et al., 2014).

در یک پژوهش دیگر اثر دور آبیاری و محلول پاشی آهن و روی بر برخی صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک لوبیا قرمز مورد بررسی قرار گرفت و گزارش گردید که محلول پاشی آهن و روی به‌طور معنی‌داری محتوای آب نسبی برگ، میزان کلروفیل، تعداد شاخه جانبی و عملکرد دانه را افزایش و نشت الکترولیت‌ها و میزان پرولین در برگ را کاهش داد. نتایج این مطالعه نشان داد که محلول پاشی آهن و روی غلظت این عناصر در دانه را به طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داد. هم‌چنین بیشترین میزان آهن دانه در تیمار محلول پاشی و کمترین میزان آهن در دانه در تیمار شاهد بود (Saeedi Abooshaghi and Yadavi, 2016).

سایر پژوهشگران در بررسی تأثیر آهن، روی و کود آلی بر عملکرد نخود در اقلیم مدیترانه‌ای (Janmohammadi et al., 2018) و در بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و عملکرد گیاهان گندم در کاهش تنش خشکی توسط عنصر روی (Ma et al., 2017) به نقش مثبت محلول پاشی عناصر کم‌مصرف در افزایش عملکرد گیاهان اشاره نموده‌اند. محققین دیگر در بررسی اثرات

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and chemical properties of soil

بافت خاک Soil texture	شن	رس	لای	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	ماده آلی	اسیدیته	هدایت الکتریکی
	Sand	Clay	Silt	Potassium	Phosphorus	Nitrogen	Organic material	pH	EC (dS.m ⁻¹)
	(%)			(ppm)		(%)			
لومی Loam	37	27	36	124	10.2	0.01	0.14	7.6	1.6

اندازه‌گیری شد. جهت بررسی و محاسبه عملکرد دانه، بعد از جداسازی دانه از بوته، عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار بوسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین و اندازه‌گیری شد. تعداد برگ در ۵ بوته به طور جداگانه شمارش و میانگین آن‌ها برای هر تیمار محاسبه گردید. جهت محاسبه وزن هزاردانه تعداد ۴ نمونه ۱۰۰ تایی بطور تصادفی انتخاب و میانگین وزنی به دست آمده در عدد ۱۰ ضرب و بر حسب گرم برای هر تیمار آزمایشی گزارش گردید. به منظور اندازه‌گیری کلروفیل a و کلروفیل b، مقدار ۰/۲ گرم بافت تازه گیاهی در هاون چینی ساییده شد و پس از افزودن ۲۰ میلی‌متر استون ۸۰ درصد به آن، به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه، سانتریفیوژ گردید و جذب محلول بالایی در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a، ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b توسط اسپکتروفتومتر تعیین شد. سپس با استفاده از معادله ۱ کلروفیل a و کلروفیل b بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر نمونه بدست آمد (Arnon, 1965).

$$\text{Chlorophyll a} = (11.75 \times A663 - 2.350 \times A645) / 100W \quad (1)$$

$$\text{Chlorophyll b} = (18.61 \times A645 - 3.960 \times A663) / 100W$$

جهت تعیین میزان نیتروژن، نمونه‌های فراهم شده در آون دیجیتال با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند و خاکستر خشک آن‌ها تهیه شد. از طریق اندازه‌گیری درصد نیتروژن دانه‌ها به روش کج‌دال (Kjeldahl, 1833) و ضرب کردن میزان نیتروژن به دست آمده در عدد ۶/۲۵، درصد پروتئین دانه‌ها محاسبه شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۴)، و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار رقم ذرت دانه‌ای (سینگل کراس ۷۰۴، لیماگرین LG 36.07، ماکسیمای ایرانی و ماکسیمای مجارستانی) به عنوان عامل اول و محلول پاشی سولفات آهن در سه سطح (عدم محلول پاشی (شاهد)، سه و شش گرم در لیتر) به عنوان عامل دوم بودند. محلول پاشی در دو مرحله شش برگی و قبل از گل‌دهی انجام شد. ارقام ذرت مورد استفاده در این پژوهش شامل رقم سینگل کراس ۷۰۴ دیررس و دارای دوره رشد ۱۳۵ روز، رقم لیماگرین LG 36.07 هیبرید سینگل کراس میان رس و دندان اسبی، رقم ماکسیمای ایرانی میان رس و دندان اسبی و رقم ماکسیمای مجارستانی MV524 هیبرید میان رس بودند.

هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف کاشت به طول ۴ متر با فاصله ۴۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر بود. عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت در ۲۵ بهمن ۹۴ به صورت دستی روی ردیف‌ها انجام شد. به منظور اطمینان از استقرار کامل بوته‌ها، مقدار بذر مورد استفاده دو سه برابر مقدار مورد نیاز در نظر گرفته شد و پس از استقرار کامل گیاهچه در مرحله دو تا چهار برگی عملیات تنک انجام شد. آبیاری بر اساس نیاز گیاه و به صورت جوی پشته‌ای انجام شد. وجین علف‌های هرز با استفاده از دست و با نیروی کارگری صورت گرفت.

به دلیل اینکه برداشت دانه ذرت مد نظر بود، عملیات برداشت پس از رسیدگی فیزیولوژیک (زرد شدن یک سوم پایینی بوته) با حذف نیم متر از ابتدا و انتهای ردیف‌ها از دو ردیف میانی هر کرت صورت گرفت. اندازه‌گیری ارتفاع بوته از محل یقه در سطح خاک تا نوک بوته با استفاده از متر پارچه‌ای بر حسب سانتی‌متر انجام شد. قطر ساقه بر حسب میلی‌متر و طول بلال بر حسب سانتی‌متر در هر بوته با استفاده از کولیس

نتایج و بحث

محلول پاشی سولفات آهن بر ارتفاع بوته در سطح یک درصد معنی دار بود، اما بین ارقام تفاوت معنی داری مشاهده نشد و اثر برهمکنش ارقام با سولفات آهن معنی دار نبود (جدول ۲).

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطوح

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی ارقام ذرت تحت محلول پاشی سولفات آهن

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	قطر ساقه Stem diameter	تعداد برگ در بوته Number of leaf per plant	طول بلال Cob length	عملکرد دانه Seed yield
تکرار Replication	2	493.75	7.411	0.194	0.287	56433.21
ارقام ذرت Maize cultivar (M)	3	407.307 ^{ns}	5.806 ^{ns}	0.444 ^{ns}	2.667 ^{ns}	1021671.22 ^{**}
سولفات آهن Iron sulfate (I)	2	4545.58 ^{**}	54.30 ^{**}	0.444 ^{ns}	117.46 ^{**}	11905187.22 ^{**}
ارقام ذرت × سولفات آهن M*I	6	232.95 ^{ns}	16.78 [*]	0.444 ^{ns}	1.661 ^{ns}	522341.24 ^{**}
خطا Error	22	343.38	5.71	1.103	2.323	111692.94
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	-	13.3	11.8	9.64	8.00	11.1

ns: غیر معنی دار؛ * و **: به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns: not significant; * and **: significant at five and one percent probability levels, respectively

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی ارقام ذرت تحت محلول پاشی سولفات آهن

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	وزن هزار دانه Thousand seed weight	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	نیترोजن دانه Seed nitrogen	پروتئین دانه Seed protein
تکرار Replication	2	224.19	12.3	1.411	0.0103	0.373
ارقام ذرت Maize cultivar (M)	3	23322.25 ^{**}	41.19 ^{**}	10.03 ^{**}	0.153 ^{**}	5.951 ^{**}
سولفات آهن Iron sulfate (I)	2	13506.36 ^{**}	49.25 ^{**}	3.701 ^{**}	0.049 [*]	1.907 [*]
ارقام ذرت × سولفات آهن M*I	6	1597.17 ^{ns}	2.289 ^{ns}	0.389 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.310 ^{ns}
خطا Error	22	1274.70	3.944	0.472	0.0102	0.4004
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	-	12.1	16.8	21.1	8.03	8.05

ns: غیر معنی دار؛ * و **: به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns: not significant; * and **: significant at five and one percent probability levels, respectively

مربوط به نقش عنصر آهن در فتوسنتز است که باعث افزایش ساخت کلروفیل در برگ‌های جوان و افزایش تنظیم کننده‌های رشد می‌شوند، در نتیجه فتوسنتز افزایش می‌یابد و مواد فتوسنتزی بیشتری به نقاط مختلف گیاه از جمله ساقه‌ها وارد می‌شود و در نهایت ارتفاع افزایش می‌یابد. نتایج این آزمایش با نتایج دیگر محققین در بررسی اثرات آهن، روی و منگنز و روش

با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها بیشترین ارتفاع بوته (۱۵۵/۰۸ سانتی‌متر) از تیمار محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن و کمترین ارتفاع بوته (۱۱۷/۱ سانتی‌متر) در شرایط عدم محلول پاشی (شاهد) حاصل شد، به طوری که در مقایسه با تیمار شاهد ۲۴/۵ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳). می‌توان گفت افزایش ارتفاع به واسطه محلول پاشی سولفات آهن

مصرف آن‌ها بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت شیرین مطابقت داشت (Mataei *et al.*, 2014). نتایج تحقیق دیگری نشان داد که محلول پاشی سولفات آهن باعث معنی دار شدن ارتفاع ذرت در سطح پنج درصد شد (Nabavi Moghadam *et al.*, 2014).

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های کمی و کیفی ذرت تحت تأثیر ارقام و محلول پاشی سولفات آهن

تیمارها Treatments	ارتفاع بوته Plant height (cm)	قطر ساقه Stem diameter (mm)	تعداد برگ در بوته Number of leaf per plant	طول بلال Cob length (cm)	عملکرد دانه Seed yield ha ⁻¹ (kg)
ارقام ذرت Maize cultivars					
ماکسیما مجارستانی MV 524	144.8 ^a	19.9 ^a	11 ^a	18.74 ^a	3314.3 ^a
سینگل کراس ۷۰۴ K.S.C 704	143.4 ^a	21.9 ^a	11 ^a	19.75 ^a	2581.9 ^b
ماکسیما ایرانی Iranian Maxima	135.7 ^a	20.1 ^a	11 ^a	19.18 ^a	3319.6 ^a
لیماگرین LG 36.07	130.5 ^a	19.3 ^a	10.5 ^a	18.52 ^a	2817.8 ^b
سولفات آهن Iron sulfate					
عدم محلول پاشی Control	117.1 ^b	18.8 ^b	10.6 ^a	15.5 ^c	1926.2 ^c
۳ گرم در لیتر 3 g lit ⁻¹	143.7 ^a	19.5 ^b	11 ^a	19.9 ^b	2815.08 ^b
۶ گرم در لیتر 6 g lit ⁻¹	155.08 ^a	22.54 ^a	11 ^a	21.6 ^a	4672.1 ^a

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means within a column followed by the same letters are not significantly different based on Duncan test at 5% Probability level.

ادامه جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های کمی و کیفی ارقام ذرت تحت تأثیر محلول پاشی عنصر آهن

تیمارها Treatments	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	کلروفیل a Chlorophyll a (Mg g ⁻¹)	کلروفیل b Chlorophyll b (Mg g ⁻¹)	نیترژن دانه Seed nitrogen (%)	پروتئین دانه Seed protein (%)
ارقام ذرت Maize cultivars					
ماکسیما مجارستانی MV 524	351 ^a	10.35 ^{bc}	4.72 ^a	1.09 ^c	6.82 ^c
سینگل کراس ۷۰۴ K.S.C 704	249.4 ^b	12.62 ^a	3.04 ^b	1.3 ^{ab}	8.15 ^{ab}
ماکسیما ایرانی Iranian Maxima	323.7 ^a	9.93 ^c	3.003 ^b	1.23 ^b	7.71 ^b
لیماگرین LG 36.07	253.3 ^b	12.22 ^b	2.81 ^c	1.4 ^a	8.75 ^a
سولفات آهن Iron sulfate					
عدم محلول پاشی Control	256 ^b	9.61 ^b	2.63 ^b	1.21 ^b	7.57 ^b
۳ گرم در لیتر 3 g lit ⁻¹	318.08 ^a	12.13 ^a	3.36 ^b	1.23 ^b	7.68 ^b
۶ گرم در لیتر 6 g lit ⁻¹	319.08 ^a	13.61 ^a	3.72 ^a	1.33 ^a	8.31 ^a

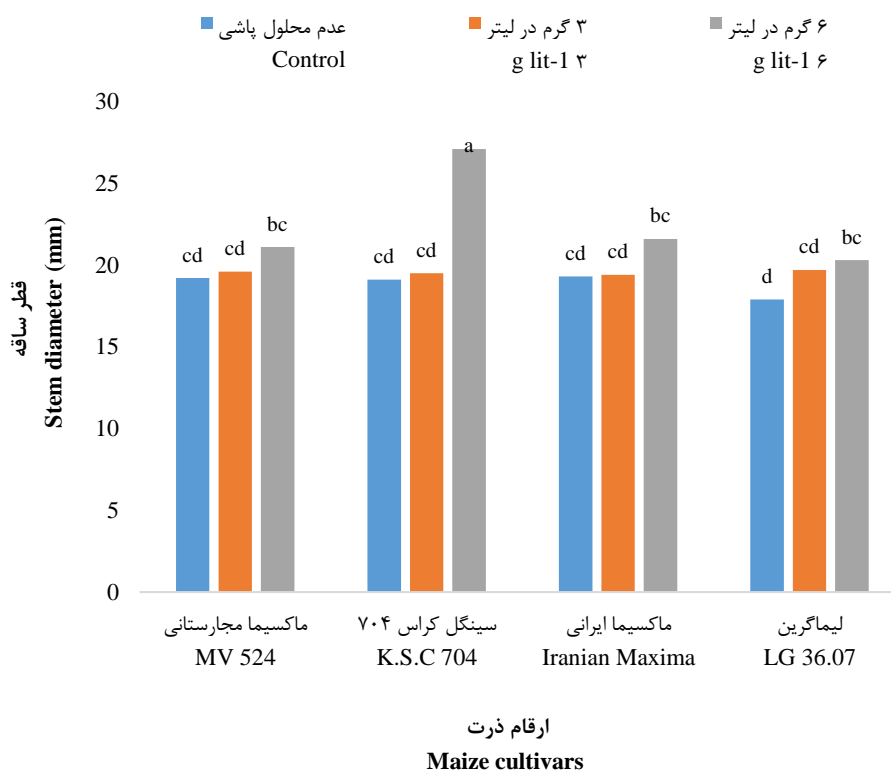
در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means within a column followed by the same letters are not significantly different based on Duncan test at 5% Probability level.

قطر ساقه

اثر محلول پاشی سولفات آهن در سطح یک درصد و اثر برهمکنش ارقام و محلول پاشی سولفات آهن در سطح پنج درصد بر قطر ساقه معنی دار بود، اما بین ارقام تفاوت معنی داری مشاهده نشد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌های اثر برهمکنش نشان داد که بیشترین قطر ساقه (۲۷/۱ میلی‌متر) از رقم سینگل کراس ۷۰۴ در شرایط محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن به دست آمد، به طوری که در مقایسه با کمترین قطر ساقه (۱۷/۹ میلی‌متر) مربوط به رقم لیماگرین در شرایط عدم محلول پاشی، افزایش ۳۳/۹۴ درصدی را نشان داد

(شکل ۱). به نظر می‌رسد بهبود شرایط تغذیه‌ای و نقش مثبت عنصر آهن در شرایط محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن می‌تواند در افزایش تولید کلروفیل و مواد فتوسنتزی و بهبود شاخص‌های رشد از قبیل قطر ساقه مؤثر باشد. در بررسی اثرات محلول پاشی آهن، منگنز و روی بر عملکرد، خاکستر و درصد پروتئین سورگوم علوفه‌ای در شرایط اقلیمی اصفهان بیان گردید که بالاترین عملکرد برگ و ساقه خشک در شرایط کاربرد روی، آهن و منگنز به دست آمد و بیشترین تعداد پنجه مربوط به ترکیب روی و منگنز بود (Soleymani and Shahrajabian, 2016).



شکل ۱- اثر متقابل ارقام ذرت و سطوح محلول پاشی سولفات آهن بر قطر ساقه

Figure 1- Interaction effects of maize cultivars and foliar application of iron sulfate on stem diameter

فتوسنتزی ذخیره شده در ساقه را در طی فرایند انتقال مجدد از ساقه به سوی اندام زایشی انتقال دهد و در نتیجه در مرحله گل‌دهی تعداد بیشتری دانه تشکیل شود. نتایج تحقیق دیگری به منظور ارزیابی اثر محلول پاشی عناصر ریز مغذی بر شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد و عملکرد کل ماده خشک ذرت

بیشترین قطر ساقه از رقم سینگل کراس ۷۰۴ به دست آمد. به نظر می‌رسد رقم سینگل کراس ۷۰۴ در مرحله رشد رویشی توانسته از طریق جذب عناصر غذایی، رشد بافت‌های مریستمی، افزایش سبزی‌نگی و فتوسنتز برگ، تعداد آوندهای بیشتری را برای انتقال مواد فتوسنتزی تولید کند و مواد

عناصر ریزمغذی بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای ۷۰۴ مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که محلول پاشی عناصر کم‌مصرف به دلیل رفع کمبود و اثر تغذیه‌ای خود سبب افزایش تعادل در رشد، تنظیم فرآیندهای نمو در گیاه شد. زیرا با افزایش جذب عناصر، مواد فتوسنتزی بیشتری تولید شده و همین امر سبب افزایش تعداد دانه در بلال شد (Karimi et al., 2012). هم‌چنین محققین دیگر در گزارش نتایج بررسی اثر محلول پاشی نانوکلات روی و کاربرد خاک بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیک ذرت، اظهار داشتند محلول پاشی عناصر کم‌مصرف موجب افزایش تعداد دانه در ردیف بلال شد (Mosanna and Khalilvand Behrozyar, 2015).

عملکرد دانه

عملکرد دانه تحت تأثیر ارقام ذرت، محلول پاشی سولفات آهن و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت و در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌های برهمکنش ارقام ذرت و سطوح محلول پاشی سولفات آهن گویای این است که بیشترین عملکرد دانه (۴۲۵۱/۶ کیلوگرم در هکتار) از رقم لیماگرین در شرایط محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن به دست آمد، به طوری که در مقایسه با کمترین عملکرد دانه (۲۰۲۶/۷ کیلوگرم در هکتار) مربوط به رقم ماکسیما مجارستانی در شرایط محلول پاشی سه گرم در لیتر سولفات آهن، افزایش ۴۹/۱۳ درصدی را نشان داد (شکل ۲). با توجه به نقش عنصر آهن در آنزیم‌های دخیل در فرآیند فتوسنتزی گیاه، می‌توان گفت محلول پاشی سولفات آهن در غلظت شش گرم در لیتر سبب بهبود فعالیت فتوسنتزی گیاه شده و با افزایش دسترسی اندام‌های زایشی گیاه به مواد فتوسنتزی، وزن هزار دانه و طول بلال (تعداد دانه تشکیل شده در ردیف) و در نهایت عملکرد دانه افزایش یافت. در مطالعه‌ای به منظور بررسی اثرات آهن، روی و منگنز و روش مصرف آن‌ها بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت شیرین، بیان گردید که محلول پاشی عناصر کم‌مصرف می‌تواند نقش معنی‌داری در بهبود عملکرد و اجزای عملکرد ذرت داشته باشد. به گونه‌ای که بیشترین عملکرد دانه از تیمار محلول پاشی با کود میکرو و کمترین عملکرد دانه به تیمار شاهد تعلق داشت. در بیشتر این صفات محلول پاشی آهن و روی نسبت به محلول پاشی منگنز برتری نشان داد. هم‌چنین

علوفه‌ای نشان داد که عملکرد ساقه تحت تأثیر محلول پاشی آهن در سطح یک درصد معنی‌دار شد (Soleymani et al., 2011).

تعداد برگ در بوته

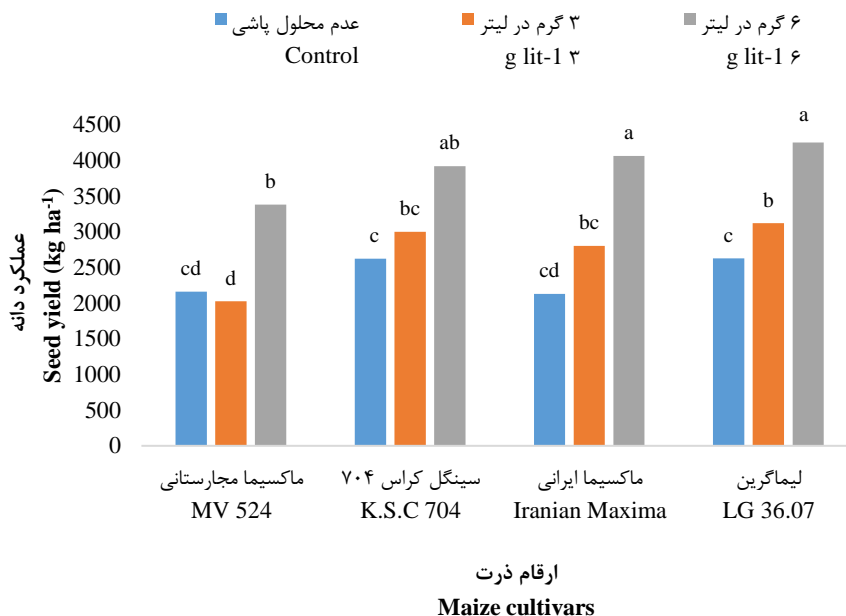
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تعداد برگ در بوته تحت تأثیر ارقام، محلول پاشی سولفات آهن و برهمکنش آن‌ها قرار نگرفت (جدول ۲). با این وجود نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین تعداد برگ در بوته از رقم سینگل کراس ۷۰۴ (۱۱ عدد) در شرایط محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن (۱۱ عدد) و کمترین تعداد برگ در بوته از رقم لیماگرین (۱۰/۵ عدد) در شرایط عدم محلول پاشی (۱۰/۶ عدد) به دست آمد (جدول ۳). تعداد برگ در ارقام مختلف مربوط به صفات ژنتیکی و فیزیولوژیک آنهاست که از این نظر تفاوت معنی‌داری نداشته‌اند. احتمال دارد نبودن تفاوت معنی‌دار بین تعداد برگ در ارقام به دلیل تشابه ژنتیکی ارقام با یکدیگر بوده است. چنانچه ارقام ذرت دوره رشدی خود را در سطوح بالاتر محلول پاشی سولفات آهن کامل نمایند و وارد فاز زایشی گردند، سطح سبز برگ بیشتری را در اختیار داشته، لذا با تولید مواد فتوسنتزی منجر به افزایش عملکرد می‌گردند. در پژوهش دیگری به منظور بررسی تأثیر محلول پاشی نانو کود آهن و سولفات آهن بر عملکرد گیاهان ذرت گزارش گردید که تعداد برگ در بوته ذرت یک صفت تحت تأثیر ژنتیک گیاه بوده و نسبتاً ثابت است (Shakoori et al., 2013).

طول بلال

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطوح محلول پاشی سولفات آهن بر طول بلال در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما بین ارقام تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و اثر برهمکنش ارقام با سولفات آهن معنی‌دار نبود (جدول ۲). با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها بیشترین طول بلال (۲۱/۶ میلی‌متر) از تیمار محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن و کمترین طول بلال (۱۵/۵ سانتی‌متر) در شرایط عدم محلول پاشی (شاهد) حاصل شد، به طوری که در مقایسه با تیمار شاهد ۲۸/۲۴ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳). در یک پژوهش دیگر تأثیر کود زیستی فسفات بارور ۲ و محلول پاشی

محلول پاشی نسبت به مصرف خاکی نتایج بهتری را نشان داد (Mataei et al., 2014).

تحت تأثیر روش مصرف عناصر کم مصرف، محلول پاشی باعث افزایش تعداد دانه در بلال و عملکرد دانه نسبت به مصرف خاکی شد. بر اساس نتایج آن‌ها، استفاده از عناصر کم مصرف به صورت



شکل ۲- اثر متقابل ارقام ذرت و سطوح محلول پاشی سولفات آهن بر عملکرد دانه

Figure 2- Interaction effects of maize cultivars and foliar application of iron sulfate on seed yield

با بهبود فعالیت فتوسنتزی گیاه عملکرد دانه افزایش یابد. در یک مطالعه دیگر نیز وجود اختلاف بین ارقام مختلف گندم از لحاظ میزان عملکرد دانه گزارش شده است (Pourjamshid, 2021).

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه تحت تأثیر ارقام ذرت و محلول پاشی سولفات آهن در سطح یک درصد معنی دار شد، اما اثر برهمکنش آن‌ها معنی دار نبود (جدول ۲). بیشترین وزن هزار دانه مربوط به رقم ماکسیمای مجارستانی (۳۵۱ گرم) بود، به طوری که این صفت در شرایط محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن (۳۱۹/۰۸ گرم) افزایش یافت. در مقابل کمترین وزن هزار دانه به رقم سینگل کراس ۷۰۴ (۲۴۹/۴ گرم) تعلق داشت، به طوری که نسبت به تیمار شاهد در شرایط عدم محلول پاشی (۲۵۶ گرم) افزایش ۱۹/۷۶ درصدی را نشان داد (جدول ۳). به نظر می‌رسد محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن با تأثیر در افزایش جذب و افزایش فراهمی عنصر آهن سبب

سایر پژوهشگران در بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و عملکرد گیاهان گندم در کاهش تنش خشکی توسط عنصر روی به نقش مثبت محلول پاشی عناصر کم مصرف در افزایش عملکرد گیاهان اشاره نموده‌اند (Ma et al., 2017). محققین دیگر در بررسی اثرات محلول پاشی آهن، منگنز و روی بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای در شرایط اقلیمی اصفهان بیان داشتند که آهن، روی و منگنز تأثیر مثبتی بر عملکرد و کیفیت این گیاه داشتند (Soleymani and Shahrajabian, 2016). در یک آزمایش دیگر به منظور بررسی اثر محلول پاشی نانوکلات روی و کاربرد خاک بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیک ذرت، نتایج نشان داد که محلول پاشی نانو کلات روی ۹۴ درصد عملکرد بیشتر دانه در بوته داشت (Mosanna and Khalilvand, 2015).

احتمالاً عملکرد دانه بیشتر اندام‌های هوایی در رقم لیماگرین می‌تواند به استفاده بهتر آن از عوامل محیطی و کارایی تولید مواد فتوسنتزی مربوط باشد که توانسته است کربوهیدرات‌ها و مواد ذخیره‌ای بیشتر را در خود ذخیره نماید و

بدست آمد. با افزایش سطح محلول پاشی تا شش گرم در لیتر سولفات آهن مقدار کلروفیل a (۱۳/۶۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل b (۳/۷۲ میلی گرم بر گرم وزن تر) نیز افزایش یافت. در مقابل کمترین مقدار کلروفیل a و b به ترتیب مربوط به رقم ماکسیما ایرانی (۹/۹۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) و رقم لیماگرین (۲/۸۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) بود. در شرایط عدم محلول پاشی (شاهد) مقدار کلروفیل a (۹/۶۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل b (۲/۶۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) به ترتیب ۲۹/۳۹ و ۲۹/۳ درصد نسبت به تیمار محلول پاشی تا شش گرم در لیتر سولفات آهن کاهش داشت (جدول ۳). با توجه به نقش کلیدی عنصر آهن در ساختار کلروفیل و فرایند فتوسنتز، افزایش فراهمی عنصر آهن موجب افزایش میزان کلروفیل در گیاه می‌شود. مهم‌ترین نقش عنصر آهن در بیوسنتز کلروفیل کنترل تشکیل گاما-آمینولولینیک اسید به عنوان پیش‌ساز مشترک بیوسنتز کلروفیل و گروه هم می‌باشد. علاوه بر این یون پروتوپورفیرین آهن - منیزیم برای تشکیل پروتوکلروفیلیداز در مسیر سنتز کلروفیل ضروری است (Godarzi et al., 2014). در تحقیق دیگری اثر دور آبیاری و محلول پاشی آهن و روی بر برخی صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک لوبیا قرمز مورد بررسی قرار گرفت و گزارش گردید که محلول پاشی آهن و روی به طور معنی داری میزان کلروفیل در برگ را افزایش داد (Saeedi Abooshaghi and Yadavi, 2016).

می‌توان گفت علت بیشتر بودن میزان کلروفیل در ارقام سینگل کراس ۷۰۴ و ماکسیما مجارستانی مربوط به صفات ژنتیکی و فیزیولوژیک این ارقام است که احتمالاً مرتبط با افزایش رشد رویشی و تولید برگ و سطح فتوسنتز کننده بیشتر آن است. زمانی که گیاه رشد رویشی خوبی داشته باشد امکان بهره‌برداری مناسب‌تر از نهاده‌های محیطی مثل آب، نور و غیره را پیدا می‌کند. بنابراین سطح فتوسنتز کننده در این گیاهان افزایش می‌یابد و متعاقب آن دی اکسیدکربن بیشتری تثبیت شده و مواد غذایی بیشتری ساخته می‌شود و نهایتاً بیوماس تولیدی گیاه بیشتر خواهد بود.

درصد نیتروژن و پروتئین دانه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد درصد نیتروژن و پروتئین تحت تأثیر ارقام ذرت در سطح یک درصد و تحت تأثیر

افزایش وزن هزار دانه شده است. افزایش در میزان کلروفیل برگ و سطح سبزی گیاهی و ذخیره مواد فتوسنتزی باعث می‌گردد که پس از مرحله گرده‌افشانی مواد فتوسنتزی ذخیره شده در ساقه، طی فرایند انتقال مجدد از ساقه به دانه‌های در حال پرشدن انتقال یابند. در پژوهش دیگری به منظور بررسی تأثیر کاربرد کودهای گوگرد و روی بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت در سطوح مختلف آبیاری، با محلول پاشی عناصر کم‌مصرف وزن هزار دانه به دلیل افزایش جذب عناصر غذایی، افزایش فتوسنتز و در نتیجه، افزایش ذخایر غذایی در منابع ثانویه، افزایش یافت (Sohrabi and Ahmadi, 2012). سایر پژوهشگران در مطالعه اثرات محلول پاشی نیتروژن و روی بر عملکرد ذرت تحت تنش خشکی، به نقش مثبت محلول پاشی عناصر کم‌مصرف در افزایش وزن هزار دانه اشاره نموده‌اند (Mosavifeyzabadi et al., 2013). همچنین نتایج مطالعه بر مدیریت مصرف کود رومی کمپوست و نانو کود آهن در بهبود عملکرد ذرت دلنه‌ای نشان داد وزن هزار دانه ذرت تحت تأثیر نانو کود آهن افزایش معنی داری داشت (Mohammad khani and Rozbahani, 2015).

با توجه به اینکه وزن هزار دانه به عنوان یکی از اجزای مؤثر در عملکرد دانه می‌باشد، این صفت می‌تواند در افزایش عملکرد رقم ماکسیمای مجارستانی مؤثر بوده باشد. می‌توان اینگونه استنباط کرد که رقم ماکسیمای مجارستانی توانسته است با افزایش سطح سبزی گیاهی و همچنین افزایش طول دوره پر شدن دانه میزان بیشتری مواد فتوسنتزی را به دانه‌ها منتقل نموده و وزن هزار دانه را افزایش دهد. نتایج تحقیق دیگری در بررسی تأثیر محلول پاشی عناصر ریز مغذی بر رشد و عملکرد کمی و کیفی دانه ذرت، مؤید آن است که محلول پاشی عناصر غذایی کم‌مصرف، وزن دانه را افزایش داد (Safyan et al., 2012).

کلروفیل‌های a و b

نتایج تجزیه واریانس نشان داد کلروفیل‌های a و b تحت تأثیر ارقام ذرت و محلول پاشی سولفات آهن در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۲). بیشترین مقدار کلروفیل a و b به ترتیب از ارقام سینگل کراس ۷۰۴ (۱۲/۶۲ میلی گرم بر گرم وزن تر) و ماکسیما مجارستانی (۴/۷۲ میلی گرم بر گرم وزن تر)

آهن بر عملکرد گیاه ذرت نشان داد که صفاتی از قبیل عملکرد و درصد پروتئین تحت تأثیر کود آهن قرار گرفتند و بیشترین عملکرد در تیمار آهن با محلول پاشی سولفات آهن پنج در هزار به دست آمد (Shakoori et al., 2013).

نتیجه گیری کلی

نظر به این که بسیاری از خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک دارای خصوصیات آهکی و واکنش قلیایی هستند، محلول پاشی عنصر ریزمغذی آهن در مرحله رشد رویشی می‌تواند سبب جذب سایر عناصر غذایی، رشد بافت‌های مرستمی، افزایش سبزیگی و فتوسنتز برگ و در نهایت باعث افزایش عملکرد شود. نتایج آزمایش حاضر نشان داد استفاده از روش محلول پاشی و جذب برگی در تأمین عنصر ریزمغذی آهن بسیار حایز اهمیت است. در نتیجه محلول پاشی سولفات آهن بر گیاه ذرت می‌تواند کمبود این عنصر ضروری در خاک مناطق خشک را جبران نماید. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که استفاده از رقم لیماگرین در شرایط محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن می‌تواند عملکرد مناسبی را در منطقه سیستان تولید نماید.

محلول پاشی سولفات آهن در سطح پنج درصد معنی دار شد. نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳) نشان داد که بیشترین درصد نیتروژن دانه (۱/۴ درصد) و پروتئین دانه (۸/۷۵ درصد) مربوط به رقم لیماگرین بود. هم‌چنین با محلول پاشی شش گرم در لیتر سولفات آهن، درصد نیتروژن دانه به میزان ۱/۳۳ درصد و پروتئین دانه به میزان ۸/۳۱ درصد افزایش یافت. در مقابل کمترین درصد نیتروژن و پروتئین دانه (به ترتیب ۱/۰۹ درصد و ۶/۸۲ درصد) مربوط به رقم ماکسیما مجارستانی بود. در شرایط عدم محلول پاشی درصد نیتروژن دانه (۱/۲۱ درصد) و پروتئین دانه (۷/۵۷ درصد) بود، به طوری که درصد نیتروژن، افزایش ۹/۰۲ درصدی و مقدار پروتئین، افزایش ۸/۹ درصدی را نسبت به تیمار عدم محلول پاشی (شاهد) نشان داد. بر اساس نتایج این پژوهش مشخص شد محلول پاشی سولفات آهن، پروتئین دانه‌های ذرت را به طور معنی داری نسبت به شاهد بهبود بخشید که با نتایج سایر محققین مطابقت دارد (Khoshvaghti and Taj bakhsh, 2022). با توجه به این که درصد پروتئین با درصد نیتروژن مرتبط است، بنابراین محلول پاشی سولفات آهن اثر مثبتی را بر هر دو صفت نشان داد. نتایج بررسی اثر کاربرد محلول پاشی کود نانو آهن و سولفات

References

- Arnon, A.N., 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, pp.112-121.
- Bojovic, D.D., Dukic, M., Maksimovic, V., Skočajić, D. and Suručić, L., 2012. The effects of iron deficiency on lead accumulation in *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle Seedlings. *Journal of Environmental Quality*, 41, pp.1-8. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0450>
- Fageria, N.K., Barbosa, F.M.P., Moreira, A. and Guimaraes, C.M., 2009. Foliar fertilization of crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 32, pp.1044-1064. <https://doi.org/10.1080/01904160902872826>
- Ghasemian, V., Ghalavand, A., Soroosh Zadeh, A. and Pirzad, A., 2010. The effect of iron, zinc and manganese on quality and quantity of soybean seed. *Journal of Phytology*, 2, pp.73-79.
- Godarzi, H., Kasraei, P. and Zand, B., 2014. The effect of different concentrations of iron and zinc micronutrients on yield and yield components of KSC 260. *Agricultural Research Journal*, 6(1), pp.49-61. [In Persian].
- Janmohammadi, M., Abdoli, H., Sabaghnia, N., Esmailpour, M. and Aghaei, A., 2018. The effect of iron, zinc and organic fertilizer on yield of chickpea (*Cicer Artietinum* L.) in mediterranean climate. *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 66, pp.49-62. <https://doi.org/10.11118/actaun201866010049>

- Karimi, Z., Nasrollahzadeh Asl, A., Jalili, F. and Valiolou, R., 2012. Effect of fertilizer phosphate fertilizer-2 and spraying of micronutrient elements on yield and yield components of corn grain 704. *Journal of Agricultural Sciences*, 4, pp.33-43.
- Khoshvaghti, H. and Taj bakhsh, M., 2022. The effect of foliar application of nano and amino acid fertilizers on some biochemical properties of grain and yield of corn. *Journal of crop Improvement*, 1(24), pp.237-252. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jci.2022.332347.2628>
- Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y. and Guo, T., 2017. Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 8, pp.860-868. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00860>
- Mataei, S., Amirnia, R., Tajbakhsh, M. and Abdolahi, B., 2014. Effects of iron, zinc and manganese and method of their application on phenology, yield and grain quality of sweet corn. *Journal of Crop Production and Processing*, 4(11), pp.231-240. [In Persian].
- Mohammad Khani, A. and Rozbahani, A., 2015. Managing the consumption of vermicompost fertilizer and iron nano-fertilizer in improving the yield of corn. *Iranian Journal of Plant Echo-physiology*, 23(7), pp.123-131. [In Persian].
- Mosanna, R. and Khalilvand Behrozyar, E., 2015. Morpho- physiological response of maize (*Zea mays* L.) to zinc nano-chelate foliar and soil application at different growth stages. *Journal on New Biological Reports*, 4, pp.46-50.
- Mosavifeyzabadi, H., Vazin, F. and Hassanzadehdouei, M., 2013. Effects of nitrogen and zinc spray on yield of corn (*Zea mays* L.) in drought stress. *Cercetari Agronomice in Moldova*, 3, pp.329-339. <https://doi.org/10.2478/v10298-012-0090-x>
- Nabavi Moghadam, R., Saberi, M.H. and Sayyari, M.H., 2014. Effect of soil application of iron and manganese sulfate on quantitative and qualitative characteristics of forage maize hybrid single cross 704. *Journal of Crops Improvement*, 15(2), pp.75-86. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jci.2013.36100>
- Narimani, H., Rahimi, M.M., Ahmadikhah, A. and Vaezi, B., 2010. Study on the effects of foliar spray of micronutrient on yield and yield components of durum wheat. *Archives of Applied Science Research*, 2, pp.168-176.
- Pourjamshid, S., 2021. Study the effect of iron, zinc and manganese foliar application on morphological and agronomic traits of bread wheat (*Chamran cultivar*) under different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(1), pp.109-118. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2448.1643>
- Razzaq, M.R., Muhammad Anjum, F. and Issa Khan, M., 2012. Effect of extruder variables on chemical characteristics of maize (*Zea mays* L.) extrudates. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 22(2), pp.108-116.
- Saeedi Abooshaghi, R.A. and Yadavi, A.R., 2016. The effect of iron and zinc irrigation and irrigation levels on quantitative and qualitative characteristics of red bean. *Journal of Iranian Cereals Research*. 6, 54-65. [In Persian].

- Safyan, N., Naderidarbaghshahi, M.R. and Bahari, B., 2012. The effect of microelements spraying on growth, qualitative and quantitative grain corn in Iran. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3, pp.2780-2784. [In Persian].
- Said-Al Ahl, H.A.H., & Abeer A. M. (2010). Effect of zinc and / or iron foliar application on growth and essential oil of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under salt stress. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3(1), 97-111.
- Shabahang, J., 1997. *Investigating the effect of foliar application of urea on the yield and silage ability of two varieties of corn* (Master's thesis). Isfahan University of Technology. [In Persian].
- Shakoori, A., Khiorgami, A. and Esteki organi, Kh., 2013. The effect of foliar application of iron nano fertilizer and iron sulfate on the yield of corn plants. National Conference of Medicinal Plants and Sustainable Agriculture, Hamadan, pp.1-9. [In Persian].
- Sohrabi, Y. and Ahmadi, A., 2012. Effect of sulfur and zinc fertilizers application on yield, and yield component of corn (*Zea mays* L.) under different irrigation levels. *Plant Production Technology*, 12, pp.71-88.
- Soleymani, A. and Shahrajabian, M.H., 2016. The effects of Fe, Mn and Zn foliar application on yield, ash and protein percentage of forage sorghum in climatic condition of Esfahan. *International Journal of Biology*, 4, pp.92-97. <https://doi.org/10.5539/ijb.v4n3p92>
- Soleymani, M., Firoozi, L. and Naranjani, N., 2011. Effect of foliar application of micro nutrients on physiological growth indices and total dry matter yield of forage corn. *Iranian Journal of Field Crop Research*, 3(23), pp.340-347. [In Persian].

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 105-123

Evaluation of promising high-yield bread wheat lines with desirable agronomic traits using the selection index of ideal genotype (SIIG) in southern Fars province

Ali Reza Askari Kelestani ^a, Mohsen Esmailzadeh Moghadam ^b, Sirous Tahmasebi ^c, Manouchehr Dastfal ^a

^a Crop and Horticultural Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Darab, Iran

^b Seed and Plant Improvement Department, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

^c Crop and Horticultural Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

*Corresponding Author: ar.askary@areeo.ac.ir

Received: 23 September 2024 Accepted: 27 December 2024 DOI: 10.22034/CSRAR.2025.479920.1438

How to cite this article:

Askari Kelestani, A.R., Esmailzadeh Moghadam, M., Tahmasebi, S. and Dastfal, M., 2025. Evaluation of promising high-yield bread wheat lines with desirable agronomic traits using the selection index of ideal genotype (SIIG) in southern Fars province. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), pp.105-123. <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2025.479920.1438>

Abstract

Introduction: Identifying and selecting suitable lines and varieties for wheat cultivation in each geographical area is of great importance. New wheat lines are commonly evaluated through advanced experiments in similarly climatic regions, using the results to identify appropriate varieties for cultivation in each area within most breeding programs worldwide. The aim of this research is to conduct an initial assessment of wheat lines and identify superior lines for further testing, with the goal of introducing new varieties in the southern region of Fars province.

Materials and Methods: This research was conducted to evaluate and select superior bread wheat lines with desirable agronomic traits at the Agricultural Research Station of Darab during the agricultural years 2019-2020 and 2020-2021. The lines used in this research were selected from various experiments conducted in Zabol, Darab, and Karaj, as well as from international trials. Additionally, double haploid lines derived from a joint program between the Seed and Plant Improvement Institute and Florimond Desprez in France were included. In the first year, 315 pure bread wheat lines were examined, and 65 superior lines were selected using the Selection index of ideal genotype (SIIG). In the second year, these lines, along with three control cultivars, were planted and evaluated in an alpha lattice design.

Results and Discussion: The analysis of variance for quantitative traits in the control varieties indicated no significant differences between the blocks. Performance analysis of the traits shows that the two traits of grain yield (equivalent to 16.45) and grain filling rate (equivalent to 14.78) had the highest coefficients of variation, thus exhibiting the greatest diversity among the quantitative traits.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Additionally, the minimum and maximum grain yield of the evaluated lines were 1.83 and 8.33 tons per hectare, respectively. The results of the coefficient of variation parameters, along with the minimum and maximum values, confirm the presence of high diversity in grain yield. Consequently, using the selection index SIIG, lines were selected with an average yield of 7.49 tons per hectare, which was higher than the average yield of the control genotypes (6.97 tons per hectare) and the total lines (6.50 tons per hectare). In the second year, significant differences were observed between the lines for most examined traits. The results of this study also indicate that the average performance of 65 selected lines in the second year was 5.04 tons per hectare, which represents a decrease of approximately 2 tons per hectare compared to the performance of the same lines in the first year. The rainfall recorded in the first year was 486.2 mm, while in the second year, it was 73.7 mm. An analysis of the average temperatures during the two critical months of grain filling, namely April and May, shows that the weather in the first year during these months was cooler than in the second year. This contributed to the reduction of the thousand-grain weight from 42.19 gr in the first year to 33.50 gr in the second year. Regarding selection differential, the highest and lowest values corresponded to the traits thousand grain weight (4.80%) and height (-0.89%), respectively. Additionally, the total selection differential, both positive and negative, was obtained as 5.60% and -2.69%, respectively. The SIIG categorized the lines into six groups. Genotypes number 28, 36, 60, 25, 45, 53, 35, 12, 33, 11, 37, 16, 34, 19, 59, 48, 49, 8, and 30 were identified as the best genotypes with yields exceeding that of the control cultivars. Examination of the pedigree of the top selected lines showed that several of the top selected lines included parents PASTOR, BORL14, KACHU, and WBLL1. These parents likely played a crucial role in the success of these lines compared to other tested lines. The selected parents in this research possess beneficial genes (such as drought resistance genes from the top selected lines originating from SAWYT, temperature tolerance from HTWYT, rust resistance from 13STEMRRSN, etc.) that have enhanced yield and quality of wheat under specific climatic conditions.

Conclusion: The results demonstrated the effectiveness of the SIIG in classifying the genotypes, and based on the findings, the selected lines were introduced for adaptability testing in national uniform trials in the hot climate of the country.

Keywords: Alpha lattice design, Grain yield, Thousand grain weight, SIIG index

ارزیابی لاین‌های امیدبخش گندم نان با عملکرد بالا و خصوصیات زراعی مطلوب با استفاده از شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل در جنوب استان فارس

علی رضا عسکری کلستانی^{۱*}، محسن اسماعیل زاده مقدم^۲، سیروس طهماسبی^۳، منوچهر دست فال^۱

۱- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، داراب، ایران

۲- موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران

۳- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز (AREEO)، ایران

* مسئول مکاتبه: ar.askary@areeo.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.479920.1438

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲

چکیده

شناسایی و انتخاب لاین‌ها و ارقام مناسب برای کشت گندم نان در هر ناحیه جغرافیایی اهمیت زیادی دارد. بدین منظور، این پژوهش به منظور ارزیابی و انتخاب لاین‌های برتر گندم نان واجد صفات مطلوب زراعی در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس در سال‌های زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ انجام گردید. در سال اول، ۳۱۵ لاین خالص و چهار شاهد بررسی و ۶۵ لاین برتر با استفاده از شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل (SIIG) انتخاب و در سال دوم، این لاین‌ها تحت طرح آلفا لاتیس در دو تکرار آزمایش شدند. در سال اول، نتایج نشان داد که میانگین عملکرد دانه در لاین‌های انتخاب شده ۷/۶۹ تن در هکتار بود که از میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های شاهد (۶/۹۷ تن در هکتار) و مجموع ژنوتیپ‌ها (۶/۵۰ تن در هکتار) بیشتر بود. در سال دوم، تفاوت‌های معنی‌داری بین لاین‌ها در اکثر صفات مورد بررسی مشاهده شد. از نظر دیفرانسیل‌پذیری، بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب مربوط به صفات وزن هزار دانه (۴/۸۰ درصد) و ارتفاع (۰/۸۹- درصد) بود. علاوه بر این، دیفرانسیل کل مطلوب مثبت و منفی به ترتیب ۵/۶۰ درصد و ۲/۶۹- درصد به دست آمد. شاخص SIIG لاین‌ها را به شش گروه تقسیم کرد. ژنوتیپ‌های شماره ۲۸، ۳۶، ۶۰، ۲۵، ۴۵، ۵۳، ۳۵، ۱۲، ۳۳، ۱۱، ۳۷، ۱۶، ۳۴، ۱۹، ۵۹، ۴۸، ۴۹، ۸ و ۳۰ با عملکرد بالاتر از ارقام شاهد به عنوان بهترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. با توجه به نتایج، لاین‌های منتخب برای بررسی سازگاری در آزمایشات یکنواخت سراسری اقلیم گرم کشور معرفی گردیدند.

واژه‌های کلیدی: شاخص SIIG، طرح آلفا لاتیس، عملکرد دانه، وزن هزار دانه

مقدمه

رشد زایشی گندم، نسبت به گرما حساس است (Rosielle and Hamblin, 1981). بنابراین، توسعه ارقام مقاوم به گرما به یکی از اهداف اصلی برنامه‌های اصلاحی گندم تبدیل شده است (Kamrani et al., 2018). در این مناطق، هرگونه تأخیر در تاریخ کاشت می‌تواند منجر به افزایش دما در دوران رشد و پر شدن دانه‌ها شود که نتیجه آن کاهش معنی‌دار عملکرد دانه می‌باشد (Aglan et al., 2020).

در مؤسسه تحقیقات بین‌المللی گندم و ذرت (CIMMYT¹)، برنامه‌های اصلاحی گندم به زودرسی لاین‌ها توجه ویژه‌ای دارند. زودرسی به عنوان یک روش سازگاری مناسب در مناطقی که با دمای بالا در انتهای فصل مواجه‌اند،

گندم به دلیل توانایی بالای خود در سازگاری با شرایط مختلف اقلیمی، یکی از اصلی‌ترین محصولات کشاورزی در سطح جهان است (Banerjee c, 2020). در سال ۲۰۲۳ میانگین تولید گندم جهان تقریباً ۷۸۹ میلیون تن و در ایران حدود ۵/۱۳ میلیون تن گزارش شده است که استان‌های فارس، خراسان، گلستان و خوزستان بیشترین میزان تولید این محصول را دارا هستند (FAO, 2023).

افزایش دما به عنوان یک چالش جدی برای بشر مطرح شده و تنش گرمایی یکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد محصولات زراعی، از جمله گندم، در سطح جهانی به شمار می‌آید. مرحله

¹ The International Maize and Wheat Improvement Center

صفات، انتخاب ژنوتیپ برتر دشوار می‌شود؛ اما استفاده از روش انتخاب SIIG امکان ادغام تمام شاخص‌ها و صفات را فراهم می‌کند که این امر انتخاب ژنوتیپ‌های برتر را ساده‌تر می‌سازد (Zali et al., 2023). روش SIIG در بسیاری از تحقیق‌ها به منظور بررسی و انتخاب لاین‌های برتر در گندم نان (Yaghotipoor et al., 2017)، گندم دوروم (Tadili et al., 2020)، جو (Barati et al., 2022)، کلزا (Zali et al., 2019) و آفتابگردان (Gholizadeh et al., 2021) گزارش شده است. در پژوهشی نشان داده شد که شاخص SIIG دارای پتانسیل ایده‌آلی برای شناسایی ژنوتیپ‌های پرمحصول با صفات مطلوب است (Zali et al., 2023). استفاده از SIIG می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در غربالگری ژنوتیپ‌های برتر در مراحل اولیه هر برنامه اصلاحی برای محصولات مختلف عمل کند. بنابراین پژوهش حاضر جهت بررسی اولیه لاین‌های گندم نان و شناسایی لاین‌های برتر جهت انجام آزمایش‌های تکمیلی، به منظور معرفی ارقام جدید در منطقه جنوب استان فارس انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس (ایستگاه داراب) در سال‌های زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ انجام گردید. آزمایش اولیه شامل ارزیابی ۳۱۵ لاین خالص گندم نان و چهار رقم شاهد (سارنگ، برات، مهرگان و چمران ۲ با ۴ تکرار) در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ اجرا شد. در نتیجه این ارزیابی، ۶۵ لاین برتر با استفاده از شاخص SIIG انتخاب و در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به همراه سه رقم شاهد موجود در منطقه (سارنگ، مهرگان و چمران ۲) در قالب طرح آلفا لاتیس ۱۳×۵ با دو تکرار کشت و ارزیابی شدند (جدول ۱). لاین‌های مورد استفاده در این تحقیق از آزمایشات مختلف (زابل، داراب و کرج)، آزمایشات بین‌المللی شامل 51IBWSN (International Bread Wheat Screening Nursery)، 36SAWSN (Semi-arid Wheat Screening Nursery)، 13STEMRRSN (Steam Rust Resistance Screening) و 9HPYT (Nursery Harvest Plus Yield Trial)، 18HTWYT (High Temperature Wheat Yield) و 8SATYN (Trial 8 Stress Adaptive Trait Yield) بودند.

اهمیت ویژه‌ای دارد (Mondal et al., 2016). به‌نژادگران گندم علاقه‌مند به شناسایی ژنوتیپ‌هایی هستند که عملکرد دانه مناسبی داشته باشند. تحقیقات متعددی در زمینه ارزیابی صفات و تعیین ارتباط آن‌ها با عملکرد دانه انجام شده است. در بسیاری از این مطالعات، تمرکز بر ارتباط بین صفات و عملکرد بوده و به انتخاب بهترین ژنوتیپ‌ها پرداخته نشده است (Devesh et al., 2019; Adilova et al., 2009). بنابراین، نیاز به روش‌هایی برای انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب بر اساس صفات موجود احساس می‌شود که یکی از این روش‌ها، شاخص انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل^۱ (SIIG) است. این روش نه تنها به انتخاب ژنوتیپ ایده‌آل کمک می‌کند، بلکه فاصله بین ژنوتیپ‌ها را نیز مشخص می‌کند (Zali et al., 2019). هدف از این شاخص‌ها انتخاب غیر مستقیم برای عملکرد دانه نیست بلکه هدف شناسایی ژنوتیپ‌های ایده‌آل از نظر عملکرد دانه بالا و سایر صفات مورد بررسی در حد امکان است. استفاده از شاخص‌های انتخاب می‌تواند یکی از روش‌های مؤثر انتخاب غیر مستقیم باشد. محققان شاخص‌های متنوعی را برای افزایش کارایی انتخاب معرفی کرده‌اند (Brim et al., 1959; Koocheki, 1994; Lin, 1978; Lin, 1978; Koocheki, 1994). شاخص‌های انتخاب مانند اسمیت-هیزل (۱۹۳۶) و پسک-بیکر (۱۹۶۹) به‌منظور گزینش همزمان چندین صفت اصلی با توجه به ارزش اقتصادی و فنوتیپی و همبستگی میان صفات استفاده می‌شود، در حالی که در روش SIIG نیازی به محاسبه وراثت‌پذیری و ارزش فنوتیپی و اقتصادی نیست. روش SIIG امکان شناسایی ژنوتیپ‌هایی با خصوصیات خاص را فراهم می‌آورد. این شاخص برای اولین بار در ادغام شاخص‌های مختلف تحمل به خشکی و روش‌های تجزیه پایداری به‌منظور افزایش کارایی انتخاب ژنوتیپ‌های ایده‌آل به کار رفت (Zali et al., 2019). از روش SIIG می‌توان برای رتبه‌بندی و مقایسه بهتر ژنوتیپ‌های مختلف، انتخاب ژنوتیپ، تعیین فواصل ژنوتیپ‌ها بر مبنای تمام صفات و گروه‌بندی آن‌ها استفاده کرد. یکی از ویژگی‌های این روش این است که می‌توان از تمام صفات، چه مورفولوژیک و چه فیزیولوژیک، برای محاسبه آن استفاده کرد و هیچ محدودیتی در این زمینه وجود ندارد. با توجه به اینکه با افزایش تعداد

¹ Selection index of ideal genotype

2004). جهت بررسی و انتخاب ژنوتیپ‌ها بر اساس تنوع فنوتیپی و ادغام صفات مورفو-فینولوژیک، روش SIIG به کار گرفته شد. مراحل محاسبه این شاخص به تفصیل زیر است (Zali et al., 2019):

۱- تشکیل ماتریس داده‌ها: برای ایجاد ماتریس داده‌ها با توجه به تعداد ژنوتیپ‌ها و صفات مورد مطالعه، از رابطه ۱ استفاده شد که به آن ماتریس D گفته می‌شود.

$$D = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این ماتریس، هر مقدار X_{ij} نمایانگر مقدار صفت j ام برای ژنوتیپ i ام با $(i = 1, 2, \dots, n)$ و $(j = 1, 2, \dots, m)$ است. لذا، ردیف‌ها به ژنوتیپ‌ها و ستون‌ها به صفات نسبت داده شده‌اند.

۲- نرمال‌سازی داده‌ها: برای تبدیل ماتریس اولیه (ماتریس D) به یک ماتریس نرمال (ماتریس R)، از رابطه ۲ استفاده شد.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (2)$$

برای این منظور، مقادیر هر صفت در تمامی ژنوتیپ‌ها به توان دو رسانده و سپس جذر مجموع این مقادیر برای تعیین مخرج کسر محاسبه گردید. در نهایت، هر داده به این مخرج کسر تقسیم شد. بنابراین، ماتریس R به شکل رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

۳- شناسایی بهترین و ضعیف‌ترین ژنوتیپ: در این مرحله، با توجه به نوع صفت و نظر محقق، بهترین (ایده‌آل) و ضعیف‌ترین (غیرایده‌آل) ژنوتیپ برای هر صفت به صورت جداگانه شناسایی می‌شود.

۴- محاسبه فاصله از ژنوتیپ‌های ایده‌آل و ضعیف: در این مرحله، برای هر ژنوتیپ، فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل di^+ و همچنین فاصله از ژنوتیپ ضعیف di^- با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود.

(Nursery) و همچنین لاین‌های دبلد هاپلوئید حاصل از برنامه مشترک بین موسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر و شرکت فلوریمانند دپره فرانسه^۱ انتخاب شدند.

اطلاعات هواشناسی این ایستگاه در دو سال زراعی مذکور در جدول ۲ درج شده است. بافت خاک مزرعه آزمایشی رسی لومی و تناوب دو ساله غلات-آپیش در مزرعه لحاظ گردیده بود. روند تهیه زمین شامل شخم پس از برداشت محصول قبلی، یک نوبت شخم بهاره، دیسک‌زنی، دو بار لولر عمود بر هم، کودپاشی و ایجاد فارو بود. بذور آزمایشی قبل از کشت به منظور جلوگیری از سیاهک پنهان با قارچ‌کش کاربوکسین تیرام به نسبت دو در هزار ضدعفونی شدند. ژنوتیپ‌ها در بازه‌ای مشخص در اواسط آذرماه به صورت شش خط به طول شش متر و فاصله ۲۰ سانتی‌متری از هم کشت و به روش نشتی آبیاری شدند. میزان بذر مصرفی با توجه به ۴۰۰ دلنه در متر مربع و با لحاظ وزن هزار دانه هر لاین محاسبه گردید. کشت آزمایش‌ها با استفاده از بذرکار خطی وینتراشتایگر ساخت اتریش در نیمه اول آذر صورت گرفت. بر اساس توصیه کودی، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره (در سه نوبت پنجه‌زنی، ساقه‌دهی و خوشه‌دهی) و کودهای دی آمونیوم فسفات و سولفات پتاسیم به ترتیب با ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار (قبل از کشت) مصرف شد. مبارزه با علف‌های هرز به کمک علف‌کش‌های انتخابی (آکسیال و برومیسید) در مرحله پنجه‌زنی تا ساقه‌رفتن (نیمه اول بهمن) صورت گرفت.

در طول دوره رشد، همزمان با مراقبت‌های زراعی، ثبت یادداشت‌ها شامل روز تا ظهور سنبله (DHE^2) بر اساس روز، روز تا رسیدگی (DME^3) بر اساس روز و ارتفاع بوته (PLH^4) بر اساس سانتی‌متر انجام شد. پس از پایان فصل رشد و حذف اثر حاشیه، محصول هر کرت با استفاده از کمباین آزمایشی (Wintersteiger, Ried, Austria) برداشت گردید. عملکرد دلنه (YLD^5) برای هر ژنوتیپ به تن در هکتار، وزن هزار دلنه (TGW^6) به گرم، سرعت پر شدن دلنه (SFR^7) بر اساس میلی‌گرم بر روز و طول دوره پر شدن دلنه (SFP^8) بر اساس روز محاسبه گردید. طول دوره پر شدن دلنه با تفاضل روز رسیدگی و روز تا سنبله‌دهی به دست آمد و سرعت پر شدن دلنه با تقسیم حداکثر وزن دلنه بر طول دوره پر شدن محاسبه شد (Egli, 2004).

⁵ Grain yield

⁶ Thousand kernel weight

⁷ Seed Filling Rate

⁸ Seed Filling Period

¹ Florimand Despres group, France

² Days to heading

³ Days to maturity

⁴ Plant height

جدول ۱- شجره لاین‌های خالص گندم نان در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹

Table 1- Pedigree of bread wheat pure line at 2020-2021 cropping season

ژنوتیپ Genotype	شجره pedigree
Chamran2	
2	TURACO/CHIL//SKAUZ/3/PASTOR/4/Pishtaz/5/Sirvan
3	TURACO/CHIL//SKAUZ/3/PASTOR/4/Unknown/5/Sirvan
4	TURACO/CHIL//SKAUZ/3/PASTOR/4/Unknown/5/Sirvan
5	TURACO/CHIL//SKAUZ/3/PASTOR/4/Unknown/5/Sirvan
6	Chamran 2//SW89.3064/STAR
7	Pishtaz//Falat/Barakat/3/IRENA/BABAX//PASTOR
8	Pishtaz//Falat/Barakat/3/IRENA/BABAX//PASTOR
9	Pishtaz//Falat/Barakat/3/IRENA/BABAX//PASTOR
10	Pishtaz//Falat/Barakat/3/IRENA/BABAX//PASTOR
11	Pishtaz//Falat/Barakat/3/IRENA/BABAX//PASTOR
12	Pishtaz//Falat/Barakat/3/IRENA/BABAX//PASTOR
13	PFAU/MILAN/5/CHEN/AEGILOPS SQUARROSA (TAUS)//BCN/3/VEE#7/BOW/4/PASTOR/6/Baaz
14	PFAU/MILAN/5/CHEN/AEGILOPS SQUARROSA (TAUS)//BCN/3/VEE#7/BOW/4/PASTOR/6/Baaz
15	F60314.78/MRL//CNO79/3/KA/Nac/4/Star/5/NSP88/Siren//Shiroodi
16	CBRD-3/STORK X DICOCCOIDES//Baz/3/ATTILA50Y//ATTILA/BCN
17	KAUZ*2/OPATA//KAUZ/3/DEEK/4/ATTILA50Y//ATTILA/BCN
18	F60314.78/MRL//CNO79/3/KA/Nac/4/Star/5/WEEBILL 1
19	ATTILA50Y//ATTILA/BCN/4/OASIS//SKAUZ//4*BCN/3/2*PASTOR/5/PRL/2*PASTOR
20	ATTILA*2/AMAD//ENKOY/3/PFAU/MILAN
21	BORL14//BECARD/QUAIU #1
22	MUTUS/ROLF07//MUCUY
23	WBL1*2/BRAMBLING/4/BABAX/LR42//BABAX*2/3/SHAMA
24	SOKOLL/WBL1/4/D67.2/PARANA 66.270//AE.SQUARROSA (320)/3/CUNNINGHAM
25	HUW234+LR34/PRINIA*2//SNLG/3/KINGBIRD #1/4/BAJ #1
26	SERI.1B*2/3/KAUZ*2/BOW//KAUZ/4/FRANCOLIN #1/5/MUNAL/6/KACHU #1/KIRITATI//KACHU
27	SERI.1B*2/3/KAUZ*2/BOW//KAUZ/4/FRANCOLIN #1/5/MUNAL/6/KACHU #1/KIRITATI//KACHU
28	BORL14*2//KFA/2*KACHU
Mehregan	
30	KANCHAN*2//UCHI//2*BORL14
31	ATTILA*2/PBW65*2//MURGA/3/KACHU/KIRITATI
32	BORL14*2/FITIS KACHU
33	#1//WBL1*2/KUKUNA/3/BRBT1*2/KIRITATI/6/ROLF07*2/5/REH/HARE//2*BCN/3/CROC_1/AE.SQUARROSA (213)//PGO/4/HUITES/7/BORL14
34	KACHU//KIRITATI/2*TRCH/3/KFA/2*KACHU
35	KACHU//KIRITATI/2*TRCH/3/KFA/2*KACHU
36	PUB94.15.1.12/WBL1
37	BORL14*2//BECARD/QUAIU #1
38	ONIX/KBIRD//BORL14/3/ONIX/KBIRD
39	KRL 19/QUAIU #1//BECARD/QUAIU #1
40	BABAX/LR42//BABAX*2/3/KUKUNA/4/CROSBILL #1/5/BECARD/6/BORL14
41	SUP152/BLOUK #1/3/PRL/2*PASTOR*2//VORB/4/SUP152/BLOUK #1
42	SUP152/HUIRIVIS #1//2*BORL14
43	KFA/2*KACHU*2//SUP152
44	WBL1*2/KURUKU//HEILO/3/WBL1*2/KURUKU/4/SUP152/BAJ #1/5/SUP152/BAJ #1
45	WBL1*2/BRAMBLING//WBL1*2/BRAMBLING/3/2*BORL14
46	MERCATO/BECARD//BOKOTA
47	FD07072/FRANCOLIN #1/4/ATTILA*2/PBW65//MUU #1/3/FRANCOLIN #1
48	SUP152/BAJ #1/3/KACHU//WBL1*2/BRAMBLING
49	WBL14/KUKUNA//WBL1/3/WBL1*2/BRAMBLING/4/BECARD/FRNCLN
50	VILLA JUAREZ F2009/CHYAK//MUTUS/AKURI
51	SUP152*2/TECUE #1/3/ATTILA*2/PBW65*2//MURGA
52	OASIS//SKAUZ//4*BCN*2/3/PASTOR/4/HEILO/5/PAURAQ/6/BECARD/QUAIU #1
53	FRAME//MILAN/KAUZ/3/PASTOR/4/SOKOLL/5/KACHU//WBL1*2/BRAMBLING
54	PREMIO//PI 610750/PIFED/4/VORB/FISCAL//KACHU/3/WBL1*2/BRAMBLING
55	MUNAL #1/FRANCOLIN #1*2//KUTZ
56	KACHU//WBL1*2/BRAMBLING*2/3/KACHU/KIRITATI
57	FRET2*2/BRAMBLING//BECARD/3/WBL1*2/BRAMBLING*2/4/BECARD/QUAIU #1
58	Chamran/Baz
59	PRL/2*PASTOR//Morvarid
60	DEZ/SW891882//Shiroodi
61	DEZ/SW891882//Morvarid
62	KIRITATI/WBL1//2*BLOUK #1*2/3/BECARD/QUAIU #1
63	BORL14*2//BECARD/QUAIU #1
64	BORL14*2//BECARD/QUAIU #1
Sarang	

جدول ۲- داده‌های هواشناسی ماهیانه در فصول زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰

Table 2- Monthly meteorological data in the cropping seasons of 2019-2020 and 2020-2021

ماه Month	فصل زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹				فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹			
	2019-2020 Cropping season				2020-2021 Cropping season			
	بارش Rainfall (mm)	دما Temp. (°C)			بارش Rainfall (mm)	دما Temp. (°C)		
		کمینه Min	بیشینه Max	میانگین Mean		کمینه Min	بیشینه Max	میانگین Mean
مهر Oct	0.2	18.4	35.4	26.9	0	16	33.4	24.7
آبان Nov	26.1	10.8	26.2	18.5	7	16.2	27.3	18.7
آذر Dec	117.3	6.3	19.8	13.1	40.6	7.6	20.4	14.2
دی Jan	122.8	3.9	17.6	10.8	2	2.2	19.4	10.8
بهمن Feb	24.6	3.8	18.3	11.1	4.1	4.5	22.8	13.7
اسفند Mar	9.4	7.9	23.1	15.5	17.2	9.9	24.6	17.2
فروردین Apr	158.7	10.8	23.6	17.2	0.9	13.6	31.5	22.6
اردیبهشت May	24.5	15.8	31.9	23.9	1.9	18.4	34.8	22.6
خرداد June	2.6	21.3	40.5	30.9	0	23.3	42	32.7
میانگین دما Temp. Mean	-	11.0	26.3	18.7	-	12.4	28.5	19.7
مجموع بارش Rainfall Total	486.2	-	-	-	73.7	-	-	-

یک تغییر می‌کند و هرچه یک ژنوتیپ به ایده‌آل نزدیک‌تر باشد، مقدار SIIG آن نیز به یک نزدیک‌تر خواهد بود. بر اساس این روش، بهترین ژنوتیپ به عنوان نزدیک‌ترین به ژنوتیپ ایده‌آل و دورترین از ژنوتیپ ضعیف شناخته می‌شود.

$$SIIG_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad 0 \leq SIIG_i \leq 1$$

بای‌پلات قوت و ضعف شاخص MGIDI: مراحل

محاسبه این شاخص به صورت زیر می‌باشد:

۱- تحلیل عاملی

تجزیه عاملی برای محاسبه کاهش ابعاد داده‌ها و ساختار

روابط انجام شد. این تحلیل بر اساس رابطه ۷ انجام گردید:

$$F = Z(A^T R^{-1})^T \quad (7)$$

F: ماتریس $g \times f$ و f به ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها و

عامل‌های باقیمانده) با مقادیر عامل‌ها، Z: ماتریس $g \times p$

برای تعیین فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل، مقادیر نرمال شده تمامی صفات از مقادیر ایده‌آل مربوط به هر صفت کاسته می‌شوند، سپس به توان دو رسانده و مجموع آن‌ها جذر گرفته می‌شود. این فرایند برای محاسبه فاصله از ژنوتیپ ضعیف نیز انجام می‌گیرد.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^+)^2} \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^-)^2} \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

r_{ij} مقدار نرمال شده ژنوتیپ i ام ($i = 1, 2, \dots, n$) در رابطه

با شاخص (صفت) j ام ($j = 1, 2, \dots, m$) است.

۵- محاسبه شاخص SIIG: در مرحله نهایی، برای محاسبه

SIIG مربوط به هر ژنوتیپ، از رابطه ۶ استفاده گردید. در این

رابطه، d_i^+ نمایانگر فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل و d_i^- فاصله از

ژنوتیپ ضعیف است. مقدار بدست آمده برای SIIG بین صفر و

ژنوتیپ شاهد در جدول شماره ۳ آورده شده است. میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های شاهد برات ۶/۹۹ تن در هکتار، چمران دو ۶/۲۰ تن در هکتار، مهرگان ۷/۰۶ تن در هکتار و ژنوتیپ سارنگ ۷/۶۴ تن در هکتار بود. میانگین عملکرد دلنه در لاین‌های مورد مطالعه برابر با ۶/۵۰ تن در هکتار بود که در مجموع حدود ۵۰۰ کیلوگرم کمتر از میانگین ژنوتیپ‌های شاهد است. تحلیل عملکرد صفات نشان می‌دهد که دو صفت عملکرد دانه (معادل ۱۶/۴۵) و دوره پر شدن دانه (معادل ۱۴/۷۸) بالاترین ضریب تغییرات را دارا بودند، در نتیجه بیشترین تنوع را در میان صفات کمی به خود اختصاص دادند. همچنین، حداقل و حداکثر عملکرد دانه لاین‌های بررسی شده به ترتیب برابر با ۱/۸۳ و ۸/۳۳ تن در هکتار بوده است. نتایج پارامترهای ضریب تغییرات، به همراه مقادیر حداقل و حداکثر، تأییدکننده وجود تنوع بالا در عملکرد دانه بود.

شاخص انتخاب SIIG (نتایج آن گزارش نشده است)، لاین‌هایی انتخاب کرد که میانگین عملکرد آن‌ها به ۷/۴۹ تن در هکتار رسید. این مقدار، بالاتر از میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های شاهد و مجموع لاین‌ها بود. علاوه بر این، برای سایر صفات مشاهده گردید که حداقل مقادیر این صفات از میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های شاهد کمتر، حداکثر مقادیر آن‌ها بالاتر از میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های شاهد بودند.

بررسی کلیه صفات (به جز وزن هزار دانه) نشان داد که لاین‌های منتخب دارای عملکرد دلنه، دوره پر شدن دانه و سرعت پر شدن دانه بالاتری و صفات روز تا سنبله‌دهی، روز تا رسیدگی و ارتفاع کمتری نسبت به میانگین ژنوتیپ‌های شاهد بودند (جدول ۳).

در گندم، روز تا رسیدگی در مناطق گرم، اهمیت ویژه‌ای دارد و کاهش طول دوره رسیدگی می‌تواند مانع همزمان شدن دوره رسیدگی محصول با شرایط گرمایی آخر فصل شود. وجود تنوع در این صفات به صورت نمودار گرمایی نمایش داده شده است (شکل ۱). نمودارهای گرمایی و جدول شماره ۳ نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی مناسب در لاین‌ها برای انتخاب بر اساس صفات مورد مطالعه هستند.

شاخص‌های محاسبه‌شده (میانگین استاندارد شده، A: ماتریس $p \times f$ از بارگذاری متعارف^۱ و R ماتریس همبستگی $p \times p$ بین صفات است.

۲- طراحی ایدئوتیپ‌ها

تغییر مقیاس صفات: X_{ij} یک جدول دو طرفه با i ردیف یا ژنوتیپ و j ستون یا صفت می‌باشد که به صورت رابطه ۸ محاسبه شد:

$$rX_{ij} = \frac{\eta_{nj} - \varphi_{nj}}{\eta_{oj} - \varphi_{oj}} \times (\theta_{ij} - \eta_{oj}) + \eta_{nj} \quad (8)$$

η_{oj} و φ_{oj} به ترتیب مقادیر اصلی حداقل و حداکثر برای صفت j هستند. η_{nj} و φ_{nj} به ترتیب مقادیر جدید حداقل و حداکثر برای صفت j پس از تغییر مقیاس^۲ هستند و θ_{ij} مقدار اصلی برای صفت j از ژنوتیپ i است.

۳- محاسبه شاخص MGIDI: شاخص MGIDI با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد:

$$MGIDI = \sum_{i=1}^f [(Y_{ij} - \gamma_j)^2]^{0.5} \quad (9)$$

γ_j امتیاز i امین ژنوتیپ در فاکتور j ام، t و f به ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها و عامل‌ها و γ_j نمره ژام ژنوتیپ ایده‌آل برای انجام تجزیه واریانس و محاسبه پارامترهای تمایل به مرکز از نرم‌افزار SAS9.1، ترسیم گراف‌های تنوع ژنتیکی از نرم افزار ABCD-R استفاده شد.

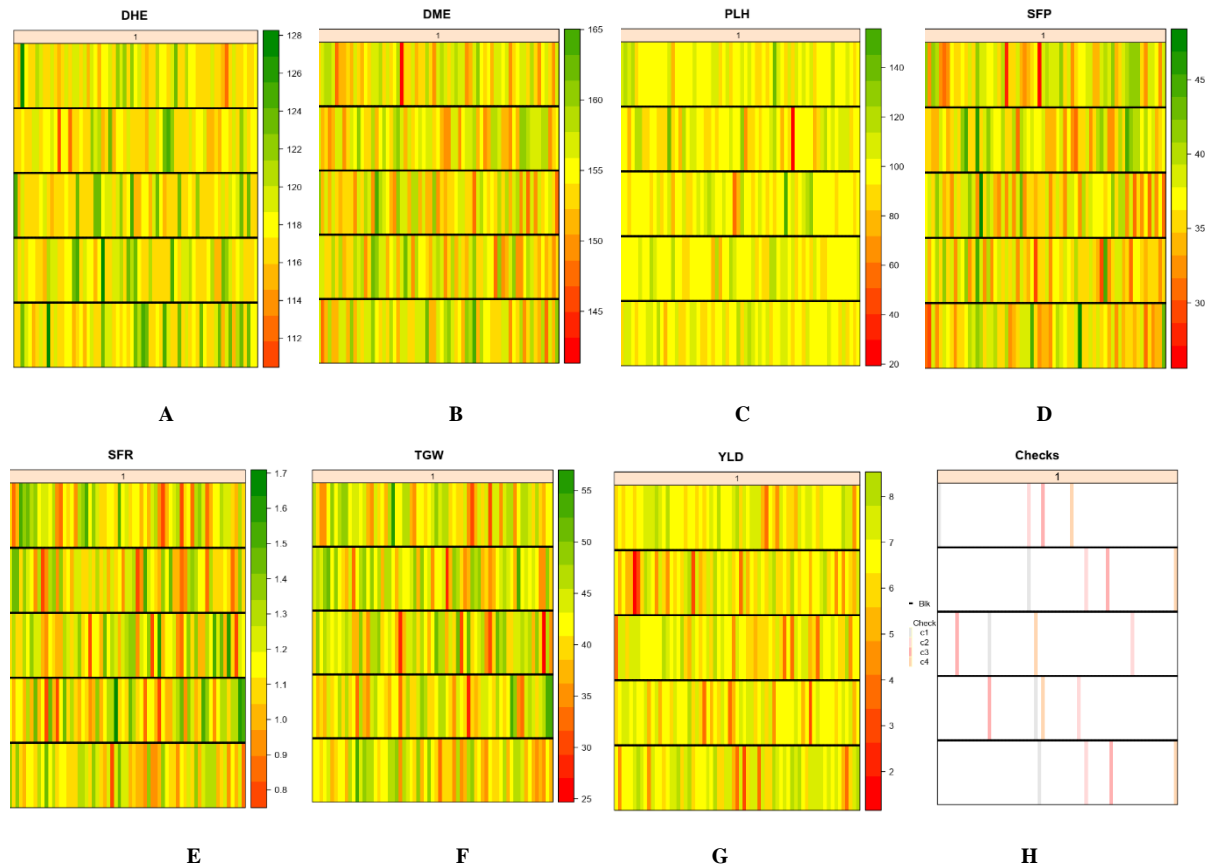
همچنین محاسبه شاخص SIIG و نمودار قوت و ضعف بر اساس شاخص انتخاب MGIDI با استفاده از نرم‌افزار R بسته تجزیه آمایش‌های چند محیطی (Olivotto & metan (Lúcio, 2020) انجام شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج حاصل از سال اول آزمایش، که با استفاده از ۳۱۵ لاین جدید و چهار شاهد منطقه انجام شد، با ترسیم نمودار عملکرد و مقایسه عملکرد هر لاین با نزدیک‌ترین شاهد مربوطه، و همچنین در نظر گرفتن سایر صفات ثبت‌شده، ۶۵ لاین برتر شناسایی و انتخاب شدند. مقادیر میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار و ضریب تغییرات در ۳۱۵ لاین امیدبخش گندم نان و لاین‌های انتخابی به همراه میانگین عملکرد چهار

² Rescaling

¹ Canonical loadings



شکل ۱- نمودارهای گرمایی تنوع ژنتیکی صفات زراعی لاین‌های گندم نان

Figure 1- Heat graphs of genetic diversity of agricultural traits of bread wheat lines

(A) DHE: روز تا سنبله‌دهی، (B) DME: روز تا رسیدگی، (C) PLH: ارتفاع بوته، (D) TGW: وزن هزار دانه، (E) SFP: طول دوره پر شدن، (F) SFR: سرعت پر شدن دانه، (G) YLD: عملکرد دانه و موقعیت قرار گرفتن شاهد‌ها در طرح

DHE: Days to heading, DME: Days to maturity, PLH: Plant height, TGW: Thousand grain weight, SFP: Seed filling period, SFR: Seed filling rate and YLD: Grain yield

جدول ۳- آمار توصیفی صفات مورفوفنولوژیکی در لاین‌های خالص گندم نان

Table 3- Descriptive statistics of different morpho-phenological traits in bread wheat pure lines

صفات	مجموع لاین‌ها					شاهدها				لاین‌های انتخابی				
	Total lines					Checks				Selected lines				
Traits	Mean	STD	CVariation	Min	Max	برات	چمران ۲	مهرگان	سارنگ	Mean	STD	CVariation	Min	Max
DHE	118.17	2.61	2.21	111.00	127.00	118.00	120.25	116.50	118.25	117.61	2.11	1.80	111.00	123.00
DME	154.71	3.31	2.14	143.00	164.00	156.75	157.25	153.25	157.50	155.24	2.94	1.89	150.00	164.00
PLH	98.78	11.26	11.40	29.00	148.00	103.75	100.75	93.75	96.00	97.08	12.28	12.65	29.00	120.00
TGW	42.28	4.84	11.45	26.80	55.20	40.70	36.90	37.60	41.20	42.19	3.70	8.77	31.20	54.40
YLD	6.50	1.08	16.54	1.83	8.33	6.99	6.20	7.06	7.64	7.69	0.27	3.50	7.32	8.33
SFP	36.54	3.15	8.63	27.00	47.00	38.75	37.00	36.75	39.25	37.63	2.99	7.94	32.00	47.00
SFR	1.17	0.17	14.78	0.75	1.64	1.05	1.00	1.02	1.06	1.13	0.12	10.22	0.84	1.37
میانگین کل عملکرد دانه				6.50		6.97				7.69				
Total average grain yield														

DHE: روز تا سنبله‌دهی، DME: روز تا رسیدگی، PLH: ارتفاع بوته، TGW: وزن هزار دانه، SFP: طول دوره پر شدن، SFR: سرعت پر شدن دانه، YLD: عملکرد دانه

DHE: Days to heading, DME: Days to maturity, PLH: Plant height, TGW: Thousand grain weight, SFP: Seed filling period, SFR: Seed filling rate and YLD: Grain yield

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس ۶۵ ژنوتیپ گندم نان در فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹

		میانگین مربعات MS						
منابع تغییرات	درجه آزادی	روز تا رسیدگی روز تا سنبله دهی	ارتفاع	وزن هزار دانه	عملکرد دانه	سرعت پر شدن دوره پر شدن دانه		
S.O.V	df	DHE (day)	DME (day)	PLH (cm)	TGW (gr)	YLD (ton/ha)	SFP (day)	SFR (mg/day)
تکرار	1	0.07 ^{ns}	10.70*	4.39 ^{ns}	34.36 ^{ns}	1.84*	12.54*	0.07*
Replication								
بلوک (تصحیح شده)	4	2.45 ^{ns}	18.35**	33.01 ^{ns}	191.30**	0.36 ^{ns}	20.74**	0.07*
Block (adjusted)								
لاین (تصحیح شده)	64	5.09**	5.40**	52.23 ^{ns}	29.14**	3.88**	5.22*	0.02**
Line (adjusted)								
اشتباه	60	1.16	2.61	50.04	14.43	0.36	2.9	0.01
Error								

^{ns}, * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی داری، معنی داری در سطح پنج درصد و معنی داری در سطح یک درصد

^{ns}, * and ** indicate non-significance, significance at the 5% level, and significance at the 1% level, respectively.

در حالی که مقادیر کمتر از یک نشان دهنده فاصله بیشتر از ژنوتیپ ایده آل است. بنابراین، بهترین ژنوتیپها در این روش، آنهایی هستند که نزدیکترین مقدار SIIG به ژنوتیپ ایده آل را دارند و همچنین از ژنوتیپهای ضعیفتر فاصله بیشتری دارند. طبق نتایج، گروههای یک (ژنوتیپهای دارای SIIG برابر یا بیشتر از ۰/۸)، گروه دو (SIIG بین ۰/۷ تا ۰/۸)، گروه سوم (SIIG بین ۰/۶ تا ۰/۷) و گروه چهارم (SIIG بین ۰/۵ تا ۰/۶) به ترتیب به عنوان ژنوتیپهای برتر شناخته شدند (جدول ۵ و ۶). ژنوتیپهای شماره ۲۸، ۳۶، ۶۰، ۲۵، ۴۵، ۵۳، ۱۲، ۳۳، ۱۱، ۳۷، ۱۶، ۳۴، ۱۹، ۵۹، ۴۸، ۴۹، ۸ و ۳۰ با بیشترین مقادیر SIIG (از ۰/۸۶ تا ۰/۵۰) به عنوان بهترین ژنوتیپها شناسایی شدند. میانگین عملکرد دانه و مقادیر SIIG این ژنوتیپها بیشتر از ژنوتیپهای شاهد (چمران ۲، مهرگان و سارنگ) بودند. همچنین، ژنوتیپهای ۱۰، ۵۸، ۷، ۳، ۵۰، ۲۰، ۶۱، ۵۵، ۴۲، ۵۷، ۵۲، ۶۲، ۴۶ و ۵۴ با حداقل مقادیر SIIG (از ۰/۱۱ تا ۰/۲۹) به عنوان ضعیفترین ژنوتیپها شناسایی شدند. نکته قابل توجه این است که سه ژنوتیپ شاهد، به ترتیب چمران ۲ در رتبه ۳۳، مهرگان در رتبه ۲۰ و سارنگ در رتبه ۲۴، با مقادیر SIIG برابر با ۰/۴۴، ۰/۴۹ و ۰/۴۷ مشخص شدند (جدول ۶ و شکل ۲-ب). در گروه اول و دوم، هر کدام یک لاین شناسایی شد که دارای متوسط عملکرد دانه ۷/۰۹ تن در هکتار، وزن هزار دانه ۴۶ گرم و ارتفاع ۹۹ سانتی متر بود. متوسط عملکرد دانه و وزن هزار دانه این گروه از میانگین عملکرد همه ژنوتیپهای شاهد بیشتر بود. با این حال، تفاوت چندانی در

نتایج این پژوهش در سال دوم نشان دهنده تفاوتهای معنی دار بین لاینها در مورد صفات روز تا سنبله دهی، روز تا رسیدگی، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، سرعت پر شدن دانه و دوره پر شدن دانه بود (جدول ۴). این تفاوتهای معنی دار، بیانگر تنوع ژنتیکی لاینهای مورد مطالعه از نظر این صفات است. با این حال، در مورد صفت ارتفاع، نتایج نشان داد که تفاوت لاینها معنی دار نیست؛ به عبارتی دیگر، تنوع موجود در این صفت میان لاینها به اندازه ای نبوده که تأثیر قابل ملاحظه ای داشته باشد.

در محاسبه شاخص SIIG در این پژوهش فرض گردید که ژنوتیپهایی با بالاترین عملکرد دانه، وزن هزار دانه، سرعت پر شدن دانه، دوره پر شدن دانه، پاکوتاهی و زودرسی به عنوان ژنوتیپ ایده آل و ژنوتیپهایی که عملکرد، دوره پر شدن دانه و سرعت پر شدن دانه پایین تری دارند و همچنین دارای ارتفاع بلند و دیررس هستند، به عنوان ژنوتیپ غیر ایده آل در نظر گرفته شدند. با بهره گیری از این شاخص، صفات ذکر شده ترکیب شده و به صورت یک شاخص واحد تحت عنوان SIIG ارائه گردید. شاخص SIIG لاینهای مورد بررسی را به شش گروه تقسیم کرد (جدول ۵ و شکل ۲-ب). گروه اول شامل لاینهایی با SIIG بیشتر از ۰/۸ و کمتر از ۰/۹ مشخص شد. لاینهایی که SIIG آنها بین ۰/۷ و ۰/۸ قرار داشت، در گروه دوم قرار گرفتند و به همین ترتیب، لاینهای دیگر نیز دسته بندی شدند. هر چقدر مقدار شاخص SIIG نزدیک به یک باشد، نشان دهنده نزدیکی آن ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده آل است؛

ژنوتیپ‌های شاهد، بالاتر بودند. دوره پر شدن دانه در این گروه بیشتر از میانگین ژنوتیپ‌های شاهد بود، اما مدت زمان پر شدن دانه به‌طور کلی کمتر از آن‌ها مشاهده شد. همچنین، در گروه پنجم و ششم، به ترتیب ۲۰ و ۲۶ ژنوتیپ قرار گرفتند، که در گروه پنجم سه ژنوتیپ شاهد نیز جای داشتند. همچنین، در گروه ششم، ۲۶ لاین قرار گرفت. در هر یک از این گروه‌ها، متوسط عملکرد دانه، وزن هزار دانه، رسیدگی، دوره پر شدن دانه و سرعت پر شدن دانه از میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های شاهد کمتر بود. اما ارتفاع و دوره رسیدگی این دو گروه بیشتر از متوسط عملکرد ژنوتیپ‌های شاهد ثبت شد (جدول ۵ و ۶).
با نگاهی کلی به جدول ۵، مشاهده می‌شود که با کاهش مقادیر شاخص SIIG، عملکرد دانه، وزن هزار دانه، دوره پر شدن دانه و روز تا رسیدگی نیز کاهش می‌یابند. با این حال، تغییر قابل ملاحظه‌ای در صفت ارتفاع مشاهده نشد. این یافته‌ها نشان‌دهنده این است که شاخص SIIG به‌خوبی توانسته است ژنوتیپ‌های پرمحصول با وزن هزار دانه مناسب و زودرس را شناسایی کند. از شاخص SIIG برای ارزیابی همزمان عملکرد دانه و اجزای آن در انتخاب برترین لاین‌های جو استفاده شده است (Zali et al., 2020). در این تحقیق لاین‌های مورد بررسی براساس شاخص SIIG در ۶ دسته گروه‌بندی شدند. همچنین نتایج نشان داد که شاخص SIIG به خوبی توانسته ژنوتیپ‌ها را براساس سه صفت عملکرد دانه، وزن هزار دانه و ارتفاع بوته دسته‌بندی نماید.

صفات روز تا رسیدگی و روز تا سنبله‌دهی میان این گروه و ژنوتیپ‌های شاهد مشاهده نشد. اما، دو صفت طول دوره پر شدن دانه در این گروه، به‌طور قابل توجهی بیشتر از ژنوتیپ‌های شاهد بود و از نظر صفت سرعت پر شدن دانه تفاوت قابل توجهی وجود نداشت. در گروه دوم متوسط عملکرد دانه، وزن هزار دانه و ارتفاع بوته آن به ترتیب ۵/۶۴ تن در هکتار، ۴۴ گرم و ۱۰۵ سانتی‌متر بود. عملکرد دانه و وزن هزار دانه این گروه از تمامی ژنوتیپ‌های شاهد بالاتر بود، اما ارتفاع آن تفاوت چندانی با ژنوتیپ‌های شاهد نداشت. به‌طور کلی، متوسط عملکرد دانه، وزن هزار دانه و ارتفاع بوته ژنوتیپ‌های شاهد به ترتیب ۵ تن در هکتار، ۳۵/۱۶ گرم و ۱۰۰ سانتی‌متر بود. همچنین، دو صفت مهم سرعت پر شدن دانه و دوره پر شدن دانه به ترتیب دارای متوسط ۳۲/۵۰ میلی‌گرم بر روز و ۱/۳۵ روز بودند که از میانگین عملکرد ژنوتیپ‌های شاهد بالاتر بود. در گروه سوم، شش لاین قرار گرفت که متوسط عملکرد دانه، طول پر شدن دانه، دوره پر شدن دانه، وزن هزار دانه و طول دوره سنبله‌دهی آن‌ها همگی از متوسط عملکرد شاهد‌ها بالاتر بودند. با این حال، در مورد دو صفت ارتفاع بوته و میزان رسیدگی، تفاوت معناداری بین ژنوتیپ‌های شاهد و این گروه مشاهده نشد. در این گروه، لاین شماره ۳۵ با وجود عملکرد بالا (۵/۱۴ تن در هکتار) و وزن هزار دانه بالای ۴۱/۵۰ گرم، به دلیل ارتفاع بالای بوته، در گروه دوم قرار گرفت. در گروه چهارم، ۱۱ لاین شناسایی شدند که از نظر متوسط عملکرد دانه و وزن هزار دانه، نسبت به متوسط عملکرد

جدول ۵- گروه‌بندی لاین‌های گندم نان براساس شاخص SIIG و میانگین صفات مختلف مورفولوژیک در هر گروه

Table 5- Grouping of bread wheat lines based on the SIIG index and the average of different morphophenological traits in each group

SIIG	گروه‌ها Groups	تعداد ژنوتیپ Number of genotypes	روز تا سنبله- دهی DHE (day)	روز تا رسیدگی DME (day)	ارتفاع PLH (cm)	وزن هزار دانه TGW (gr)	عملکرد دانه YLD (ton/ha)	دوره پر شدن دانه SFP (day)	سرعت پر شدن دانه SFR (mg/day)
0.8<SIIG<0.9	1	1	111.00	150.00	100.00	46.00	7.09	39.00	1.17
0.7<SIIG<0.8	2	1	114.00	146.50	105.00	44.00	5.64	32.50	1.35
0.6<SIIG<0.7	3	6	112.00	145.83	102.17	39.83	5.64	33.83	1.18
0.5<SIIG<0.6	4	11	111.77	146.64	100.27	36.24	5.58	34.86	1.04
0.4<SIIG<0.5	5	20	112.28	146.05	99.53	34.08	5.08	33.77	1.01
0.3<SIIG<0.4	6	26	113.09	146.71	101.37	29.52	4.53	33.62	0.88
چمران ۲ Chamran 2	4	1	116	146	100	33.5	4.64	33.00	1.12
مهرگان Mehregan	4	1	112	146	98	35	5.34	34.50	1.02
سارنگ Sarang	4	1	111	144	103	35	5.03	32.50	1.07

جدول ۶- مقادیر صفات مختلف مورفونولوژیک و شاخص SIIG در ۶۵ ژنوتیپ گندم نان مورد بررسی

Table 6- Values of different morphological traits and SIIG index in 65 bread wheat genotypes studied

لاین	رتبه گروه	شاخص	فاصله از ژنوتیپ	فاصله از ژنوتیپ	روز تا	روز تا	ارتفاع	وزن هزار	عملکرد	دوره پر	سرعت پر	
Line	Gro up	Ra nk	SIIG	ضعیف	ایده آل	سنبله دهی	رسیدگی	PLH (cm)	دانه	دانه	شدن دانه	شدن دانه
			SIIG	d-	d+	DHE (day)	DME (day)		TGW (gr)	YLD (ton/ha)	SFP (day)	SFR (mg/day)
چمران ۲												
Chamra n 2	5	33	0.44	0.09	0.07	115.50	145.50	99.50	33.50	4.64	30.00	1.12
2	5	29	0.46	0.08	0.07	114.00	149.00	101.50	34.50	5.28	35.00	0.98
3	6	62	0.20	0.13	0.03	113.00	146.50	94.50	26.00	4.28	33.50	0.77
4	5	35	0.42	0.09	0.06	114.00	147.50	93.50	32.00	5.18	33.50	0.97
5	5	37	0.40	0.09	0.06	114.00	148.00	103.00	32.50	5.22	34.00	0.95
6	6	50	0.32	0.10	0.05	113.50	145.50	107.50	31.00	4.47	32.00	0.97
7	6	63	0.19	0.13	0.03	114.50	148.00	97.00	26.00	4.34	33.50	0.77
8	4	18	0.52	0.07	0.08	114.00	148.00	103.00	34.50	5.85	34.00	1.01
9	5	36	0.41	0.09	0.06	114.50	148.00	91.00	34.00	4.34	33.50	1.02
10	6	65	0.11	0.14	0.02	115.00	146.50	103.50	25.00	3.73	31.50	0.78
11	4	10	0.56	0.07	0.08	111.00	145.00	96.50	36.50	5.59	34.00	1.07
12	3	8	0.60	0.06	0.09	113.00	146.50	93.00	35.50	6.28	33.50	1.06
13	6	41	0.39	0.09	0.06	110.50	147.00	109.50	32.50	5.24	36.50	0.90
14	6	45	0.37	0.10	0.06	110.50	145.00	105.50	33.00	4.57	34.50	0.97
15	6	44	0.38	0.10	0.06	112.50	148.00	99.50	29.00	5.79	35.50	0.81
16	4	12	0.55	0.07	0.08	110.50	144.00	98.50	36.00	5.59	33.50	1.07
17	5	39	0.40	0.09	0.06	110.50	143.50	93.50	31.50	5.10	33.00	0.96
18	6	47	0.36	0.10	0.06	113.50	146.00	106.50	29.00	5.55	32.50	0.89
19	4	14	0.53	0.07	0.08	110.50	144.50	106.50	36.00	5.54	34.00	1.08
20	6	60	0.24	0.13	0.04	113.50	149.50	103.00	25.50	4.93	36.00	0.71
21	5	22	0.48	0.08	0.07	112.50	145.50	102.00	35.00	5.15	33.00	1.05
22	5	25	0.47	0.08	0.07	110.50	144.50	101.00	36.50	4.68	34.00	1.06
23	6	51	0.31	0.11	0.05	114.00	148.00	99.00	31.00	4.46	34.00	0.90
24	5	27	0.46	0.08	0.07	114.00	146.00	99.50	34.00	5.02	32.00	1.07
25	3	4	0.64	0.06	0.10	111.00	147.50	106.00	41.50	5.69	36.50	1.12
26	5	38	0.40	0.09	0.06	109.00	145.00	97.00	33.50	4.93	36.00	0.92
27	6	43	0.39	0.09	0.06	111.33	145.00	99.00	32.00	4.98	33.67	0.95
28	1	1	0.86	0.02	0.14	111.00	150.00	100.00	46.00	7.09	39.00	1.17
مهرگان												
Mehrehan	5	20	0.49	0.08	0.07	111.50	146.00	97.50	35.00	5.34	34.50	1.02
30	4	19	0.50	0.08	0.08	112.00	147.50	100.50	36.50	5.21	35.50	1.02
31	6	42	0.39	0.09	0.06	114.50	148.50	98.00	33.00	4.73	34.00	0.97
32	5	28	0.46	0.08	0.07	111.67	145.00	107.67	34.67	5.19	33.33	1.04
33	4	9	0.58	0.06	0.09	112.00	147.00	93.00	36.50	5.84	35.00	1.05
34	4	13	0.54	0.07	0.08	111.00	145.50	101.00	35.50	5.68	34.50	1.04
35	3	7	0.61	0.06	0.10	112.00	145.50	113.00	41.50	5.14	33.50	1.24
36	2	2	0.73	0.05	0.12	114.00	146.50	105.00	44.00	5.64	32.50	1.35
37	4	11	0.56	0.07	0.09	111.50	147.00	104.00	38.00	5.38	35.50	1.09
38	5	31	0.45	0.08	0.07	112.00	145.50	104.50	34.00	5.18	33.50	1.02
39	6	49	0.32	0.10	0.05	110.00	144.50	103.00	32.00	4.40	34.50	0.93
40	6	40	0.40	0.09	0.06	114.00	145.00	104.50	33.00	4.55	31.00	1.06
41	5	30	0.46	0.08	0.07	110.00	146.50	106.50	35.50	5.15	36.50	0.97
42	6	57	0.25	0.11	0.04	114.50	148.50	104.50	29.00	4.51	34.00	0.85
43	6	46	0.36	0.10	0.06	112.00	147.50	100.50	32.50	4.78	35.50	0.91
44	6	48	0.35	0.10	0.05	115.00	145.50	98.00	31.50	4.27	30.50	1.02
45	3	5	0.63	0.06	0.10	110.00	143.50	108.00	40.00	5.52	33.50	1.19
46	6	53	0.28	0.12	0.05	114.00	148.00	87.00	27.50	4.59	34.00	0.80

جدول ۶- ادامه

Table 6- Continued

47	5	32	0.44	0.09	0.07	111.50	147.50	90.00	34.00	5.04	36.00	0.95
48	4	16	0.53	0.07	0.08	112.00	147.50	106.00	36.50	5.55	35.50	1.04
49	4	17	0.53	0.07	0.08	112.00	148.00	97.00	36.67	5.43	36.00	1.02
50	6	61	0.23	0.12	0.04	112.50	146.00	96.50	27.50	4.46	33.50	0.81
51	5	34	0.43	0.09	0.07	112.50	147.50	101.00	32.00	5.63	35.00	0.92
52	6	55	0.25	0.12	0.04	111.00	146.00	101.50	30.50	3.84	35.00	0.87
53	3	6	0.63	0.06	0.10	112.00	148.00	102.50	39.00	6.03	36.00	1.07
54	6	52	0.29	0.11	0.04	111.00	143.00	106.00	30.50	4.23	32.00	0.95
55	6	58	0.24	0.12	0.04	115.50	146.00	110.50	29.00	4.23	30.50	0.93
56	5	26	0.47	0.08	0.07	112.50	148.00	102.00	34.50	5.49	35.50	0.96
57	6	56	0.25	0.11	0.04	111.00	145.00	100.00	29.50	4.19	34.00	0.87
58	6	64	0.13	0.14	0.02	115.50	148.50	103.50	23.50	4.32	33.00	0.71
59	4	15	0.53	0.07	0.08	113.00	149.00	97.00	36.00	5.69	36.00	1.00
60	3	3	0.68	0.06	0.12	114.00	144.00	90.50	41.50	5.20	30.00	1.39
61	6	59	0.24	0.12	0.04	115.00	150.00	104.50	30.00	3.96	35.00	0.86
62	6	54	0.27	0.11	0.04	113.00	147.50	93.00	28.50	4.48	34.50	0.83
63	5	23	0.48	0.08	0.07	111.50	144.50	103.50	36.00	4.77	33.00	1.09
64	5	21	0.49	0.08	0.07	113.00	144.50	93.50	34.00	5.19	31.50	1.07
سارنگ	5	24	0.47	0.08	0.07	111.00	143.50	103.00	35.00	5.03	32.50	1.07
Sarang												

میان عملکرد دانه و این سه صفت، ناشی از کمبود تنوع ژنتیکی در لاین‌های بررسی شده باشد (Dastfal et al., 2022).
 دیفرانسیل‌گزینه‌های صفت مختلف که در محاسبه شاخص SIIG بررسی شده‌اند، در جدول ۸ به نمایش گذاشته شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که دیفرانسیل‌گزینه‌های صفتی که مقادیر بالاتر آن‌ها مورد نظر است، مثبت بوده است (به‌جز صفت سرعت پر شدن دانه). به‌علاوه، دیفرانسیل‌گزینه‌های صفتی که حداقل مقادیر آن‌ها ایده‌آل به‌شمار می‌رود، به‌صورت منفی محاسبه شد. این نتایج نشان‌دهنده کارایی شاخص SIIG در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر است. از نظر مقادیر دیفرانسیل‌گزینه‌ها، بیشترین مقدار مختص صفت وزن هزار دانه با ۴/۸۰ درصد بوده و کمترین مقدار نیز مربوط به صفت ارتفاع با ۰/۸۹- درصد است. این تفاوت‌ها می‌توانند بیانگر تأثیر عوامل مختلف بر روی صفات مختلف و شیوه انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب باشند. علاوه بر این، دیفرانسیل کل مطلوب به دو بخش مثبت و منفی تقسیم شده است که به ترتیب ۵/۶۰ درصد و ۲/۶۹- درصد به‌دست آمده است. این نتایج کارایی شاخص SIIG را در انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب نشان می‌دهد و بیانگر پتانسیل بالای این روش در فرآیند بهبود صفات و انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب می‌باشد و

نتایج نشان داد که هنگام انتخاب ارقام و لاین‌ها بر اساس SIIG، باید به همبستگی این شاخص با عملکرد دانه، که صفتی مهم و تأثیرگذار است، توجه شود و از SIIG فقط زمانی استفاده شود که همبستگی آن با عملکرد دانه بالا و معنادار باشد. تجزیه و تحلیل همبستگی پیروسون نشان داد که SIIG با صفات عملکرد دانه، وزن هزار دانه، دوره پر شدن دانه و روز تا سنبله‌دهی همبستگی معناداری دارد (جدول ۷). این نتایج تأکید می‌کند که این چهار صفت سهم قابل توجهی در SIIG دارند و به ویژه سهم صفت عملکرد نسبت به دیگر صفات بیشتر است. هر صفتی که تنوع فنوتیپی بیشتری داشته باشد، تأثیر بیشتری بر SIIG خواهد گذاشت (Tahmasebi et al., 2018; Zali et al., 2023). بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ژنوتیپ‌های انتخابی با این شاخص، عملکرد دانه و وزن هزار دانه بالا دارا می‌باشند. همچنین روز تا رسیدگی، ارتفاع و دوره پر شدن دانه تأثیر کمتری در این شاخص داشتند که نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی پایین این صفات نسبت به سایر صفات می‌باشد (جدول ۷). سال‌ها تمرکز بر انتخاب ارقام زودرس در برنامه‌های اصلاحی مناطق گرم و خشک جنوب کشور، تنوع ژنتیکی برخی صفات مانند مدت زمان رسیدگی و ارتفاع بوته را به شدت کاهش داده است. از این‌رو، به نظر می‌رسد که نبود همبستگی

تا ظهور سنبله و وزن هزار دانه مثبت بود که مؤثر بودن این آماره در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر را نشان داد. بیشترین و کمترین مقدار درصد دیفرانسیل گزینش صفات عملکرد دانه ۵/۱۱ درصد و وزن هزار دانه ۶۲/۳- درصد بودند (Shirzad *et al.*, 2022).

می‌تواند به محققان و متخصصان در زمینه بهبود ژنتیکی و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر کمک کند. نتایج تجزیه به عامل‌ها در پژوهشی نشان داد که پنج عامل پنهانی را شناسایی کرد که ۸۰/۲۰ درصد از تنوع کل داده‌ها را توجیه نمودند. دیفرانسیل انتخاب آماره MGIDI برای تمام صفات بجز تراکم سنبله، روز

جدول ۷- ضرایب همبستگی بین صفات مختلف مورفوفنولوژیک و شاخص SIIG در فصل زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰

Table 7- Correlation coefficients between different morphophenological traits and SIIG index in cropping season 2020-2021

صفات Trait	شاخص SIIG	روز تا سنبله‌دهی DHE (day)	روز تا رسیدگی DME (day)	ارتفاع PLH (cm)	وزن هزار دانه TGW (gr)	عملکرد دانه YLD (ton/ha)	دوره پر شدن دانه SFP (day)	سرعت پر شدن دانه SFR (mg/day)
شاخص SIIG	1.00							
روز تا سنبله- دهی	-0.27*	1						
روز تا رسیدگی			1					
ارتفاع				1				
وزن هزار دانه					1			
عملکرد						1		
دوره پر شدن دانه							1	
سرعت پر شدن دانه								1

ns, * and ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

ns, * and ** indicate non-significance, significance at the 5% level, and significance at the 1% level, respectively.

(Nardino, 2021).

بر اساس شکل ۲-الف، لاین‌های شماره ۳۵، ۴۵ و ۶۰ در عامل اول، لاین‌های ۲۵، ۳۷، ۸، ۴۸، ۴۹، ۳۳، ۵۹ و ۱۲ در عامل دوم و لاین‌های ۱۱، ۳۰، ۲۸، ۵۳، ۱۲ و ۵۹ در عامل سوم به لبه خارجی نمودار و ژنوتیپ ایده‌آل نزدیکتر بودند. ژنوتیپ‌های برجسته در عامل اول از لحاظ صفات عملکرد دانه، وزن هزار دانه و سرعت پر شدن دانه، در عامل دوم بر اساس دوره پرشدگی دانه و در عامل سوم بر اساس روز تا سنبله‌دهی، روز تا رسیدگی و ارتفاع بوته به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیکتر بودند. همچنین، ژنوتیپ‌های ۴۹، ۲۸ و ۲۵ به ترتیب در عامل‌های

با استفاده از شاخص MGIDI، تحلیل نقاط قوت و ضعف لاین‌های منتخب، انجام شد. این تجزیه و تحلیل به صورت واضح سهم هر عامل را در هر ژنوتیپ نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که کدام ژنوتیپ از نظر کدام صفت به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیکتر یا دورتر است. هر چه سهم یک عامل در توجیه نقاط قوت و ضعف یک ژنوتیپ کمتر باشد و به لبه خارجی نمودار نزدیکتر شود (خارج از خط نقطه‌چین)، نشان می‌دهد که صفات مربوط به آن عامل به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیکتر هستند. بنابراین، هر ژنوتیپ در عواملی که سهم کمتری دارند، بیشتر از نظر آن صفات به ژنوتیپ ایده‌آل نزدیکتر است (Olivoto and

واکنش آن‌ها نسبت به شرایط مختلف آب و هوایی بسیار سریع و حساس است. در این میان، بارندگی و درجه حرارت به عنوان دو عامل کلیدی در عملکرد و اجزای عملکرد گندم نقش ایفا می‌کنند. این دو عامل می‌توانند با تأثیر گذاشتن بر میزان رطوبت و دمای خاک در تولید عملکرد و اجزای آن تأثیر بسزایی داشته باشند (Croissant *et al.*, 1998).

این یافته‌ها با برخی تحقیقات پیشین همخوانی دارد (Keshavarznia *et al.*, 2023; Shan and Osborne, 2024; Gui *et al.*, 2021).

بررسی شجره لاین‌های برتر انتخاب‌شده در جدول ۱ نشان داد که در چندین لاین برتر انتخابی والدین PASTOR، BORL14، KACHU و WBLL1 وجود دارند. این والدین احتمالاً نقش اساسی در موفقیت این لاین‌ها در مقایسه با سایر لاین‌های آزمایش‌شده ایفا کرده‌اند.

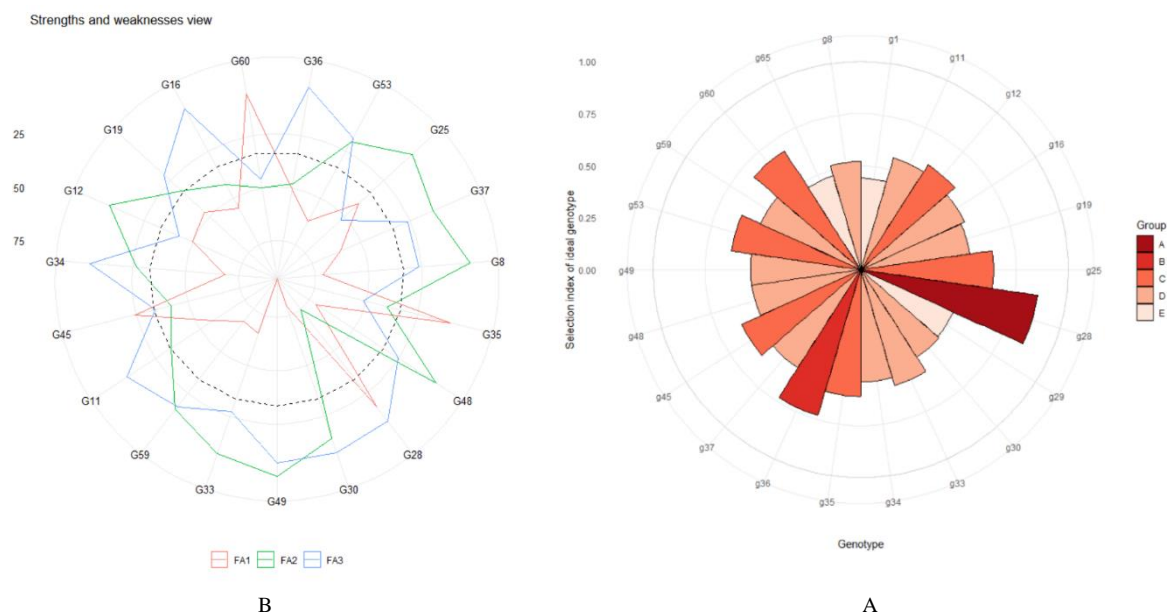
اول، دوم و سوم به مرکز نمودار نزدیک‌تر بودند، که نشانگر این است که این سه ژنوتیپ بیشترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل دارند (شکل ۲-ب).

نتایج این مطالعه همچنین حاکی از آن است که میانگین عملکرد ۶۵ لاین انتخابی در سال دوم ۵/۰۴ تن در هکتار بوده که نسبت به عملکرد همین لاین‌ها در سال اول، کاهش حدود ۲ تن در هکتار را نشان می‌دهد (جدول ۳ و ۸). میزان بارندگی در سال اول ۴۸۶/۲ میلی‌متر و در سال دوم ۷۳/۷ میلی‌متر گزارش شده است (جدول ۲). بررسی میانگین دما در دو ماه مهم پر شدن دانه، یعنی فروردین و اردیبهشت، نشان می‌دهد که هوای سال اول در این دو ماه نسبت به سال دوم خنک‌تر بوده است. این موضوع به کاهش وزن هزار دانه از ۴۲/۲۸ گرم (جدول ۳) در سال اول به ۳۳/۵۰ گرم در سال دوم (جدول ۸) منجر شد. در غلات، دو عامل «تعداد دانه در واحد سطح» و «وزن هزار دانه» تعیین‌کننده عملکرد اقتصادی هستند و

جدول ۸- دیفرانسیل انتخاب صفات مورفولوژیک شاخص SIIG در لاین‌های گندم نان

Table 8- Differential selection of morpho-phenological traits of SIIG index in bread wheat lines

صفات Traits	عامل Factor	کل ژنوتیپ‌ها All genotypes	ژنوتیپ‌های انتخابی Selected genotypes	دیفرانسیل گزینش Selection differential	دسفرانسیل گزینش Selection differential (%)	هدف Goal	نتیجه sense
وزن هزار دانه TGW (gr)	FA1	33.50	39.30	4.80	14.00	increase	100
عملکرد دانه YLD (ton/ha)	FA1	5.04	5.68	0.64	12.20	increase	100
سرعت پر شدن دانه SFR (mg/day)	FA1	0.99	1.15	0.16	12.70	increase	100
دوره پر شدن دانه SFP (day)	FA2	33.90	33.40	-0.43	1.50	increase	0.00
روز تا سنبله دهی DHE (day)	FA3	113.00	112.00	-0.92	-0.86	decrease	100
روز تا رسیدگی DMA (day)	FA3	146.00	145.00	-0.45	-0.32	decrease	100
ارتفاع PLH (cm)	FA3	101.00	100.00	-0.89	1.80	decrease	100
کل دیفرانسیل گزینش منفی Total negative selection differential				-2.69			
کل دیفرانسیل گزینش مثبت Total positive selection differential				5.60			



شکل ۲- الگوی رتبه‌بندی لاین‌های انتخابی بر اساس شاخص SIIG (A) و شکل قوت و ضعف لاین‌های انتخابی بر اساس شاخص MGIDI (B)
 FA1: عامل اول (عملکرد دانه، وزن هزار دانه و سرعت پر شدن دانه) (قرمز)، FA2: عامل دوم (دوره پرشدگی دانه) (سبز) و FA3: عامل سوم (روز تا سنبله‌دهی، روز تا رسیدگی و ارتفاع بوته) (آبی). نقطه‌چین نشان‌دهنده ارزش نظری است، در صورتی که همه عوامل به یک اندازه نقش داشته باشند.

Figure 2- Ranking pattern of selected lines based on the SIIG index (A) and the strength and weakness pattern of selected lines based on the MGIDI index (B)

The first factor (grain yield, thousand-grain weight and grain filling rate) (red), FA2: the second factor (grain filling period) (green) and FA3: the third factor (days to heading, days to maturity and plant height) (blue). The dotted line indicates the theoretical value if all factors play an equal role

مهرگان، چمران ۲ و سارنگ بیشتر بود. به‌منظور بهبود این نتایج و تقویت پایداری عملکرد، توصیه می‌شود که لاین‌های برتر شناسایی‌شده به‌منظور بررسی و آزمایش‌های سازگاری در چندین منطقه زراعی مختلف مورد ارزیابی قرار گیرند. این اقدام می‌تواند مشخص نماید که این ژنوتیپ‌ها در شرایط متفاوت چقدر مؤثر و موفق عمل می‌کنند و چه عواملی بر عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارد. با این نقشه راه، می‌توانیم به بهبود زراعت و افزایش بهره‌وری در کشاورزی دست یابیم.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل پروژه‌های ملی مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر با شماره‌های مصوب ۰۰۳-۰۳-۱۱۳-۹۹۱۰۷۴ و ۰۰۳-۰۳-۱۳۲-۹۸۰۶۸۴ است. بدین‌وسیله از مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر به خاطر حمایت‌های مالی و همچنین تمامی همکاران گرامی ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی داراب که در تحقق این پروژه ما را یاری کردند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم.

والدین منتخب در این پژوهش، دارای ژن‌های مفیدی (مانند ژن‌های مقاومت به خشکی (لاین‌های برتر انتخابی با منشأ SAWYT، دما (لاین‌های برتر انتخابی با منشأ HTWYT)، زنگ (لاین‌های برتر انتخابی با منشأ 13STEMRRSN) و غیره) هستند که باعث افزایش عملکرد و کیفیت گندم در شرایط آب و هوایی خاص شده‌اند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که این لاین‌ها در برنامه‌های اصلاحی گندم نان برای بهبود کیفیت تولید در مناطق گرم و خشک جنوب مد نظر قرار گیرند.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس تحلیل داده‌ها و نتایج به‌دست‌آمده از شاخص SIIG، لاین‌های ۲۸، ۳۶، ۶۰، ۲۵، ۴۵، ۵۳، ۳۵، ۱۲، ۳۳، ۱۱، ۳۷، ۱۶، ۳۴، ۱۹، ۵۹، ۴۸، ۴۹، ۸ و ۳۰ با بالاترین مقادیر SIIG به‌عنوان بهترین ژنوتیپ‌ها شناسایی گردیدند. این شناسایی به ما کمک کرد تا با دقت بیشتری، لاین‌هایی را که قابلیت برتری نسبت به سایر لاین‌ها دارند، انتخاب کنیم. همچنین، میانگین عملکرد دانه و مقادیر SIIG در ژنوتیپ‌های برتر مشهود بود و این مقادیر به‌طور واضح از ژنوتیپ‌های شاهد

References

- Adilova, S.S., Qulmamatova, D.E., Baboev, S.K., Bozorov, T.A. and Morgunov, A.I., 2020. Multivariate cluster and principle component analyses of selected yield traits in uzbek bread wheat cultivars. *American Journal of Plant Sciences*, 11(6), pp.903-912. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.116066>
- Aglan, M.A., Abd EL- Hamid, E.A. and Morsy, A.M., 2020. Effect of Sowing date on yield and its components for some breads wheat genotypes Zagazig. *Agricultural Research*, 47, pp.117-122. <https://doi.org/10.21608/zjar.2020.70058>
- Banerjee, K., Krishnan, P. and Das, B., 2020. Thermal imaging and multivariate techniques for characterizing and screening wheat genotypes under water stress condition. *Ecological Indicators*, 119, No.106829. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106829>
- Barati, A., Zali, H., Marzoqian, A., Naghipour, F., Pour-Aboughadareh, A. and Kelestani, A.A., 2022. Selection of hull-less barley lines using the selection index of ideal genotype (SIIG) in Ahvaz and Darab regions. *Crop Productin*, 15(2), pp.161-181. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.19690.2468>
- Brim, C.A., Johnson, H.W. and Cockerham, C.C., 1959. Multiple selection criteria in soybeans 1. *Agronomy Journal*, 51(1), pp.42-46. <https://doi.org/10.2134/agronj1959.00021962005100010015x>
- Croissant, R., Peterson, G. and Westfall, D., 1998. *Dryland cropping systems* (Bulletin No. 0.516). Colorado State University, Cooperative Extension.
- Dastfal, M., Aghaee-Sarbarzeh, M. and Zali, H., 2022. Genetic diversity and selection of durum wheat pure lines with desirable agronomy traits using SIIG index. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53, pp.161-174. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2021.298388.654691>
- Devesh, P., Moitra, P., Shukla, R. and Pandey, S., 2019. Genetic diversity and principal component analyses for yield, yield components and quality traits of advanced lines of wheat. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), pp.4834-4839.
- Egli, D.B., 2004. Seed-fill duration and yield of grain crops. *Advances in Agronomy*, 83, pp.243-279. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(04\)83005-0](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(04)83005-0)
- FAO., 2023. *World food situation: Crop prospects and food situation*. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en>
- Gholizadeh, A., Ghaffari, M. and Shariati, F., 2021. Use of selection index of ideal genotype (SIIG) in order to select new high yielding sunflower hybrids with desirable agronomic characteristics. *Journal of Crop Breeding*, 13(38), pp.116-123. <https://doi.org/10.52547/jcb.13.38.116>
- Gui, Y., Sheteiw, M.S., Zhu, S., Zhu, L., Batool, A., Jia, T. and Xiong, Y., 2021. Differentiate responses of tetraploid and hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) to moderate and severe drought stress: A cue of wheat domestication. *Plant Signaling and Behavior*, 16(1), 1839710. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1839710>

- Kamrani, M., Mehraban, A. and Shiri, M., 2018. Identification of drought tolerant genotypes in dryland wheat using drought tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 10(28), pp.13-26. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.10.28.13>
- Keshavarz Nia, R., Esmailzadeh Moghaddam, M. and Tabib Ghaffary, S.M., 2023. Evaluation and preliminary identification of superior lines of bread wheat in the north of khuzestan province. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(4), pp.177-186. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.360719.655011>
- Koocheki, A., 1994. Crop production in dry region: Cereals, Legumes, Industrial and forage crops (Translated in Persian). *Jihad Daneshgahi Mashhad Press*. 202p.
- Lin, C., 1978. Index selection for genetic improvement of quantitative characters. *Theoretical and Applied Genetics*, 52, pp.49-56. <https://doi.org/10.1007/bf00281316>
- Mondal, S., Singh, R., Mason, E., Huerta-Espino, J., Autrique, E. and Joshi, A., 2016. Grain yield, adaptation and progress in breeding for early-maturing and heat-tolerant wheat lines in South Asia. *Field crops research*, 192, pp.78-85. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.017>
- Olivoto, T. and Lúcio, A.D.C., 2020. Metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11, pp.783-789. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>
- Olivoto, T. and Nardino, M., 2021. MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics*, 37(10), pp.1383-1389. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>
- Rosielle, A. and Hamblin, J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. *Crop Science*, 21(6), pp.943-946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183x002100060033x>
- Shan, Y. and Osborne, C.P., 2024. Diversification of quantitative morphological traits in wheat. *Annals of Botany*, 133(3), pp.413-426. <https://doi.org/10.1093/aob/mcad202>
- Shirzad, A., Asghari, A., Zali, H., Sofalian, O. and Chamanabad, H.M., 2022. Application of the multi-trait genotype-ideotype distance index in the selection of top barley genotypes in the warm and dry region of Darab. *Journal of Crop Breeding*, 14(44), pp.65-76. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.65>
- Tadili, S., Asghari, A., Karimizadeh, R., Sofalian, O. and Chamanabad, H.M., 2020. Evaluation of drought stress tolerance in advanced lines durum wheat using the selection index of ideal genotype (SIIG). *Journal of Crop Ecophysiology*, 1(53), pp.45-62. [In Persian]. <https://doi.org/10.30495/jcep.2020.671640>
- Tahmasebi, S., Dastfal, M., Zali, H. and Rajaiee, M., 2018. Drought tolerance evaluation of bread wheat cultivars and promising lines in warm and dry climate of the south. *Cereal Research*, 8(2), pp.209-225. [In Persian]. <https://doi.org/10.22124/c.2018.10434.1398>
- Yaghotipoor, A., Farshadfar, E.A. and Saeidi, M., 2017. Evaluation of Drought Tolerance in Bread Wheat Genotypes using new mixed method. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10(2), pp.247-256. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2017.581>
- Zali, H. and Barati, A., 2020. Evaluation of selection index of ideal genotype (SIIG) in other to selection of barley promising lines with high yield and desirable agronomy traits. *Journal of Crop Breeding*, 12(34), pp.93-104. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.12.34.93>

Zali, H., Barati, A., Pour-Aboughadareh, A., Gholipour, A., Koohkan, S., Marzoghiyan, A., Bocianowski, J., Bujak, H. and Nowosad, K., 2023. Identification of superior barley genotypes using selection index of ideal genotype (SIIG). *Plants*, 12(9), No.1843. <https://doi.org/10.3390/plants12091843>

Zali, H., Hasanloo, T., Sofalian, O., Asgharii, A. and Enayati Shariatpanahi, M., 2019. Identifying drought tolerant canola genotypes using selection index of ideal genotype . *Journal of Crop Breeding*, 11(29), pp.117-126. <https://doi.org/10.29252/jcb.11.29.117>

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 125-137

Evaluation of the genetic parameters of performance and important agronomic traits of the safflower genotypes resulting from the crossing of the variety Omid Bakhsh 93 × American under drought stress

Seyedeh Esmat Hashemi Fadaki ^a, Nafiseh Mahdinezhad ^{*b}, Ghasem Mohammadinejad ^c, Fatemeh Ebrahimi ^c, Baratali Fakheri ^b

^a Ph.D Student of Genetics and Plant Breeding, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

^b Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

^c Research and Technology Institute of Plant Production, Afzalipour Research Institute, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

*Corresponding Author: nmahdinezhad@uoz.ac.ir

Received: 24 February 2023 Accepted: 25 October 2023

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.386168.1321

How to cite this article:

Hashemi Fadaki, S.E., Mahdinezhad, N., Mohammadinejad, G., Ebrahimi, F. and Fakheri, B., 2025. Evaluation of the genetic parameters of performance and important agronomic traits of the safflower genotypes resulting from the crossing of the variety Omid Bakhsh 93 × American under drought stress. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 125-137. <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2024.386168.1321>

Abstract

Introduction: The first step in the breeding of agricultural traits is to have sufficient information about genetic parameters such as the mode of inheritance and the way genes work for traits. One of the most suitable methods for calculating genetic parameters is the method of analyzing the average of generations due to the low error calculation. The interpretation of the method of analysis of the average of generations determines the gene effects, which are actually the result of all the gene loci that are diverging. This means that the additive effects as well as the reciprocal effects in connection with these effects are a function of the degree of dispersion of the genes increasing the traits between the parents in the Study, if the dominance parameters result in the direction of dominance in each gene locus. Therefore, the effects of genes in different directions may cause the estimate to be lower than the actual amount. On the other hand, the genetic variance is calculated from the sum of squares of each gene locus.

Materials and Methods: Therefore, in order to study the type of gene action for some quantitatively important traits in safflower plant, crossing between 93 and American cultivars (resistant and sensitive to drought stress, respectively) was done and then F₂, BC_{1.1} and BC_{1.2} generations were obtained. The parents along with the F₁, F₂, BC_{1.1} and BC_{1.2} generations were studied under drought stress conditions in the research farm of Plant Production Technology Research Institute of Shahid Bahonar University in 2020-2021. The research was conducted in the form of a randomized complete block design with two replications. Dry stress was applied at the 10% Heading stage and up to the full



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ripening stage. 8 traits including plant height, SPAD, number of sub-branches, number of bolls, single plant yield, days to 5% tillering and number of days to 50% flowering were evaluated.

Results and Discussion: The results of analysis of variance of this research showed that the mean square of the generations for all studied traits in the cross was significant. Therefore, the best genetic model was made for all investigated traits. The interaction effect of generation \times location was significant for the studied traits. To evaluate the best genetic model, Meter and Jenkins method and individual scale test (A, B, C and D) were used, and the results of these tests indicate the existence of additive and dominant effects, as well as non-additive parameters (incremental \times additive (i), additive \times dominance (j) and dominance \times dominance (l)) also played a role in the genetic control of all traits. In the irrigation conditions of no stress, most of the traits except the number of sub-branches and the number of bolls were not significant by chi-square and individual scale test and were under the genetic control of the three-parameter additive-dominance model. Also, in the condition of drought stress, it was significant in controlling the inheritance of all chi-square traits and their scale test (A, B, C and D). The opposite sign of h and l in the characteristics of plant height, number of sub-branches and number of bolls under drought stress indicates epistasis of double type. This type of epistasis causes disruption in the selection process by reducing diversity in the F2 generation and subsequent generations and shows the complexity of the inheritance of these traits.

Conclusion: Based on the results of this research, the importance of non-additive effects (epistasis parameters) in the control of investigated traits under conditions of moisture stress, the necessity of selection in segregating generations (after reaching purity and relative homozygosity) and the use of bulk-pedigree method or production Hybrid cultivars show in safflower plant. The different results in the experiments can be attributed to differences in genetic material, sample size, and experimental environment.

Keywords: Epistasis, Genetic variance components, Generation mean decomposition, Moisture stress

ارزیابی پارامترهای ژنتیکی عملکرد و صفات مهم زراعی ژنوتیپ‌های گلرنگ حاصل از تلاقی رقم امید بخش ۹۳ × آمریکایی تحت تنش خشکی

سیده عصمت هاشمی فدکی^۱، نفیسه مهدی نژاد*^۲، قاسم محمدی نژاد^۳، فاطمه ابراهیمی^۳، براتعلی فاخری^۲

۱- دانشجوی دکتری ژنتیک و به نژادی گیاهی، گروه اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- گروه اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، پژوهشگاه فضلی‌پور، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

* مسئول مکاتبه: nmahdinezhad@uoz.ac.ir

DOI:10.22034/CSRAR.2024.386168.1321

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۵

چکیده

به منظور مطالعه نوع عمل ژن‌ها برای صفات کمی گلرنگ، ابتدا دو ژنوتیپ رقم امید بخش ۹۳ و آمریکایی تلاقی داده شد. سپس والدین همراه با نسل‌های F1، F2، BC1.1 و BC1.2 حاصل از تلاقی فوق در شرایط تنش خشکی و در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با دو تکرار در مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله ۱۰ درصد تکمه‌دهی و تا مرحله رسیدگی کامل، تنش خشکی اعمال شد. صفات ارتفاع بوته، SPAD، تعداد شاخه فرعی، تعداد غوزه، عملکرد تک بوته، روز تا ۵۰ درصد تکمه‌دهی و روز تا ۵۰ درصد گل‌دهی اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین میانگین مربعات نسل‌ها برای تمامی صفات وجود داشت. همچنین نتایج تجزیه میانگین نسل‌ها نشان داد که در شرایط عدم تنش (نرمال) بیشتر صفات به جزء تعداد شاخه فرعی و تعداد غوزه، کای اسکوتر و آزمون مقیاس انفرادی آنها معنی‌دار نشد و تحت کنترل ژنتیکی مدل سه پارامتری افزایشی - غالبیت قرار گرفتند. همچنین در شرایط تنش خشکی نیز در کنترل وارث تمامی صفات کای اسکوتر و آزمون مقیاس (A, B, C, D) آنها معنی‌دار شد. علامت مخالف h و l در صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی و تعداد غوزه در شرایط تنش خشکی نشان‌دهنده اپیستازی از نوع مضاعف می‌باشد. این نوع از اپیستازی با کاهش تنوع در نسل F2 و نسل‌های بعد سبب اختلال در فرایند گزینش می‌گردد و نشان‌دهنده پیچیدگی کنترل ژنتیکی این صفات در این تلاقی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اپیستازی، اجزای واریانس ژنتیکی، تجزیه میانگین نسل‌ها، تنش رطوبتی

مقدمه

یکی از مهمترین و گسترده‌ترین عوامل محدودکننده عملکرد و تولید محصولات زراعی به ویژه غلات، در مناطق خشک تنش کمبود آب می‌باشد (Wasaya et al., 2018). میزان تأثیر تنش به عواملی مانند شدت، زمان و طول دوره وقوع آن بستگی دارد. لذا شناخت جامع از ساختار ژنتیکی، الگوی وارث‌پذیری صفات، نوع و میزان اثرات ژنی برای تولید ارقام پر محصول و متحمل به تنش لازم است. این مطلب با استفاده از روش‌های ژنتیک کمی مختلفی که برای کسب اطلاعات مربوط به کنترل ژنتیکی صفات متعدد معرفی شده‌اند، میسر می‌شود (Amiri et al., 2020).

از میان دانه‌های روغنی سازگار با شرایط آب و هوایی کشور، گلرنگ از جایگاه مهم و ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. گلرنگ یا کاشفه با نام علمی *Carthamus tinctorius* L. از راسته

Cynadrea، خانواده *Asteraceae* است. از جمله خصوصیات مطلوب این گیاه به دلیل دارا بودن ریشه عمیق می‌توان قدرت سازگاری بالا، تحمل به سرما و مقاومت نسبی به خشکی، همچنین مقاومت به شوری، کیفیت بالای روغن دانه و موارد مصرفی مختلف مانند استفاده‌های غذایی، صنعتی و طبی اشاره نمود (Khajeh pour, 2005; Mundel and Bergman, 2008).

گزینش روش اصلاحی مناسب برای استفاده بهتر از ظرفیت ژنتیکی صفات مختلف در یک گیاه به نوع عمل ژن‌های کنترل کننده و نحوه توارث صفت بستگی دارد (Akhtar and Chowdhry, 2006; Zare et al., 2008). اطلاعات در این زمینه کمک به شروع تصمیم درست برای اصلاح صفت در برنامه به‌نژادی و اصلاحی می‌شود. در شرایط مشاهده پارامتر اثرات غالبیت و برخی از اشکال اپیستازی، تولید واریته‌های

محیطی مختلف بیان کردند که اثرات پارامترهای اپیستازی غالبیت × غالبیت (I) در بیشتر صفات مورد بررسی معنی‌دار گردید (Nemati et al., 2018). تحقیق حاضر در راستای تعیین روش اصلاحی و به‌نژادی مناسب برای صفات مهم در گلرنگ، با استفاده از روش تجزیه میانگین نسل‌ها، پارامترهای ژنتیکی (اثرات افزایشی، غالبیت و اپیستازی) مورد اجرا قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی در این پژوهش شامل نسل‌های والدین، F1، F2، BC1 و BC2 حاصل از تلاقی رقم امید بخش ۹۳ (والد مادری) و A آمریکایی (والد پدری) بودند. پس از انجام تلاقی والدین و تولید نسل‌های فوق در مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده فناوری و تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان (با مختصات طول جغرافیایی ۲۲ درجه و ۳۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی)، ارزیابی نسل‌ها در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ انجام شد. این پژوهش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با دو تکرار در دو شرایط آبیاری کامل (نرمال) و تنش خشکی در مرحله ۱۰ درصد تکمه‌دهی اجرا شد. اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی خاک مزرعه محل آزمایش مطابق جدول ۱ می‌باشد. عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک، تسطیح و ایجاد شیار در شهریور ماه (قبل از کاشت) و کاشت به‌صورت دستی در نیمه آبان انجام شد. داده‌های هواشناسی در محل پژوهش به این شرح است: میانگین حداقل دما ۱۲/۸۱ سانتی‌گراد، میانگین حداکثر دما ۲۸/۴۱ سانتی‌گراد، میانگین رطوبت نسبی ۲۹/۶۲ درصد و مجموع بارش سالیانه ۳۱/۸۲ میلی‌متر می‌باشد.

در راستای اعمال تیمار تنش خشکی، رطوبت خاک در عمق رشد ریشه (عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر، ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) و میزان آب آبیاری برای تامین کمبود اندازه‌گیری شد. رطوبت خاک تا ظرفیت کشاورزی مزرعه تعیین شد و سپس در هر دو تیمار آبیاری انجام شد. برای تعیین زمان آبیاری دوم، در هر تیمار به‌منظور کاهش تعداد نمونه‌برداری رطوبت خاک، از روش پیش‌بینی با اندازه‌گیری تبخیر و تعرق تجمعی استفاده شد. به‌طوری که پس از هر بار آبیاری، مقدار تجمعی تبخیر و تعرق (ETc) با استفاده

هیبرید یاد آور می‌شود ولی در صورتی که اثرات ژن‌های افزایشی کنترل کننده صفت باشند، از لاین‌های خاص به‌عنوان وارسته زراعی بکار می‌برند (Shayan et al., 2017).

یکی از روش‌های تعیین پارامترهای ژنتیکی، تجزیه میانگین نسل‌ها می‌باشد (Mather and Jinks, 1982). با استفاده از تلاقی بین لاین‌های خالص والدین برای تهیه‌ی بذور نسل‌ها (F1، F2، BC1 و BC2) و اجرای روش تجزیه میانگین نسل‌ها می‌توان ارتباط ژنتیکی بین گیاهان را مشخص و پارامترهای ژنتیکی را محاسبه نمود (Mather and Jinks, 1982). در تجزیه میانگین نسل‌ها برای محاسبه اثرات ژنتیکی، از میانگین نسل‌های مختلف استفاده می‌شود. کاهش خطای یکی از مزایای این روش نسبت به سایر روش‌ها مانند دای آلل می‌باشد زیرا از این جهت که علاوه بر اثرات افزایشی و غالبیت قادر به بررسی انواع مختلف پارامترهای غیر افزایشی (اپیستازی افزایشی × افزایشی (i)، افزایشی × غالبیت (j) و غالبیت × غالبیت (l)) می‌باشد. در صورتی که روش‌های دیگر تنها اثرات ژنتیکی و غالبیت را برآورد می‌کنند (Haluver and Miranda, 1985). در مطالعه‌ای دیگر، نتایج تجزیه میانگین نسل‌ها در تلاقی دو رقم گندم دوروم Mrb5 × Bousselem نشان دهنده عدم کفایت مدل ساده سه پارامتری (افزایشی - غالبیت) و وجود اثرات اپیستازی در کنترل صفات مورد مطالعه بود. با نگرش به وجود غالبیت ناقص برای اکثر صفات مورد بررسی، غالبیت کامل برای صفاتی مانند عملکرد دانه و عملکرد زیستی، همچنین فوق غالبیت برای وزن هزار دانه و شاخص برداشت و توارث-پذیری کم برای اغلب صفات، انتخاب برای نسل‌های بعدی پیشنهاد می‌گردد (Salmi et al., 2019). محققین در بررسی پارامترهای ژنتیکی در تلاقی گندم مرودشت با MW-17 با استفاده از تجزیه میانگین نسل‌ها در شرایط نرمال و تنش خشکی انتهای فصل بیان کردند که مدل کنترل ژنتیکی اغلب صفات در هر دو شرایط تنش خشکی و شرایط نرمال (عدم تنش) از لحاظ وجود یا عدم وجود اثرات متقابل غیر آلی، نسبتاً مشابه بودند (Amiri et al., 2021). نتایج حاصل از پژوهشی بر روی گیاه تریتیکاله (Ferrari et al., 2018) و همچنین گیاه گندم (Gangopadhyay et al., 2018) نشان داد که عملکرد دانه در بوته تحت تاثیر اثرات اپیستازی قرار گرفت. در مطالعه‌ای دیگر، محققین با بررسی نحوه وراثت صفات در گیاه گندم در شرایط

FC: رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی (درصد)
 PWP: رطوبت وزنی خاک در حد پژمردگی دائم (درصد)
 D: عمق فعال توسعه ریشه (میلی‌متر)
 B: چگالی ظاهری خاک در ناحیه توسعه ریشه (۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب)
 MAD: ضریب مدیریت مزرعه برای حالت بدون تنش برابر با ۵۰ درصد و محیط تنش برابر با ۹۰ درصد بود.

از رابطه فائو- پنمن-مانتیس با اعمال ضریب گیاهی گلرنگ طی دوره رشد محاسبه شد. زمانی که مقدار تبخیر و تعرق تجمعی به عمق مجاز تخلیه رطوبت از عمق توسعه ریشه (Id2) در تیمار مورد نظر رسید، آبیاری انجام شد. عمق مجاز تخلیه رطوبت از عمق توسعه ریشه (Id) از رابطه ۱ محاسبه شد (Allen et al., 1998; Ebrahimi et al., 2017).

$$Id = (FC - PWP) * D * B * MAD \quad (1)$$

Id: عمق آب مجاز برای تخلیه در تیمار مورد نظر (میلی‌متر)

جدول ۱- اطلاعات خاک مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی واقع در دانشگاه شهید باهنر کرمان

Table 1- Soil information of the research field of Plant Production Technology Research Institute located in Shahid Bahonar University of Kerman

بافت خاک texture Soil	اسیدیته (Ph)	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	نیترژن Nitrogen (%)	فسفر Phosphorus (ppm)	پتاسیم Potassium (ppm)	منگنز Mn (ppm)	مس Cu (ppm)	روی Zn (ppm)	آهن Fe (ppm)
لومی - شنی Sandy-loamy	7.59	2.43	31	10.72	346.20	3.96	0.37	1.33	2.16

استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. آزمون وجود اختلاف معنی‌دار بین نسل‌ها، با استفاده تجزیه واریانس وزنی انجام شد. در صورت وجود اختلاف معنی‌دار بین نسل‌ها در صفات مورد مطالعه، تجزیه میانگین نسل‌ها و محاسبه پارامترهای ژنتیکی با کمک روش حداقل مربعات وزنی برای هر یک از شرایط محیطی نرمال و تنش خشکی انجام شد (Mather and Jinks, 1982). همچنین از آزمون مقیاس انفرادی برای میانگین صفات مورد مطالعه و تخمین بهترین مدل ژنتیکی در شرایط محیطی مختلف با روش متر و جیکنز استفاده گردید. از نرم‌افزارهای SAS 9.4 و اکسل جهت محاسبات و تجزیه داده‌ها انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب برای صفات مورد مطالعه در پژوهش در والدین رقم امید بخش ۹۳ و آمریکایی و نسل‌های حاصل از تلاقی (F1, F2, BC1, BC2) در شرایط محیطی تنش خشکی و نرمال نشان داد بین نسل‌ها در صفات SPAD، شاخه فرعی، وزن تر بوته و عملکرد تک بوته در سطح احتمال یک درصد، همچنین ارتفاع بوته، تعداد غوزه، روز تا ۵۰٪ درصد تکمه‌دهی و روز تا ۵۰٪ گل‌دهی در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار مشاهده گردید (جدول ۲). اختلاف معنی‌دار

برای اطمینان از عدم وجود تنش در تیمار شاهد و وجود تنش در تیمار تنش، قبل از آبیاری با استفاده از مارپیچ از سه نقطه در هر تیمار رطوبتی در عمق رشد ریشه، نمونه خاک تهیه و پس از اندازه‌گیری درصد رطوبت، با مقدار رطوبت در مورد انتظار خاک در زمان آبیاری (θ_{irri}) مقایسه شد. مقدار رطوبت مورد انتظار خاک در زمان آبیاری (θ_{irri}) از رابطه ۲ محاسبه شد (Allen et al., 1998; Ebrahimi et al., 2017).

$$\theta_{irri} = \theta_{FC} - [(\theta_{FC} - \theta_{PWP}) * MAD] \quad (2)$$

هر واحد آزمایشی، ۳ متر طول داشت و فاصله ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها ۲۰ سانتی‌متر بود. برای هر یک از والدین و نسل F1 در هر تکرار، تعداد ۲۵ بذر، از نسل BC1 و BC2، تعداد ۶۰ بذر و از نسل F2، ۸۰ بذر کشت گردید. صفات مورد مطالعه به صورت تک بوته اندازه‌گیری شد. همچنین برای اندازه‌گیری صفات مورد بررسی تعداد هفت بوته از والد P1، هفت بوته از والد P2، ۹ بوته از نسل BC1 و BC2، ۱۲ بوته از نسل F2 در هر تکرار هم در شرایط تنش و نرمال انتخاب گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

ابتدا آزمون نرمال بودن داده‌ها، پس از جمع‌آوری داده با

بین نسل‌ها در صفات مورد مطالعه، نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی بین نسل‌ها می‌باشد. پژوهش‌های دیگری به نتایج مشابهی دست یافتند که نشان دادند بین نسل‌ها تنوع ژنتیکی وجود دارد (Zabet et al., 2017).

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه برای نسل‌های مختلف حاصل از تلاقی ۹۳×امریکایی

Table 2- Analysis of variance of studied traits for different generations resulting from crossbreeding 93×American									
منبع	درجه	ارتفاع	SPAD	تعداد شاخه	تعداد	وزن تر	عملکرد	روز تا	روز تا
تغییرات	آزادی	Height		فرعی	غوزه	بوته	تک بوته	۵۰٪ تکمه‌دهی	گلدهی
S.O.V	Df	(cm)		Number of sub branches	Number of boll	Plant fresh weight	Single-plant yield (gr)	Day up to 50% Heading	Day up to 50% flowering
مکان P	1	**16354.26	**248.066	**147.16	**4300.86	**3.80	**9806.99	**1625.91	**2166.19
تکرار (مکان) R(P)	2	0.38	0.60	0.28	0.25	0.12	0.62	0.25	0.23
نسل G	5	*30.57	**34.42	**7.27	*18.42	**0.08	**3911.90	*34.80	*21.96
مکان *نسل P*G	5	**163.01	**39.63	**2.79	**132.81	**0.04	**639.35	**84.18	**147.86
خطا Error		2.32	0.82	3.61	4.41	3.99	1.83	0.45	0.30

* و **: به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respective

شد. همچنین در شرایط تنش خشکی، آماره کای اسکوئر برای تمامی صفات مورد مطالعه معنی‌دار شد و عدم کفایت مدل افزایشی - غالبیت و وجود اثرات متقابل غیرآلی (اپیستازی) و تایید شد (جدول ۳ و ۴).

نتایج تجزیه میانگین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه

آماره کای اسکوئر در محیط رطوبتی عدم تنش در تلاقی A×93 برای اکثر صفات بجز صفات شاخه فرعی و تعداد غوزه معنی‌دار نشد و مدل سه پارامتری (افزایشی - غالبیت) تایید

جدول ۳- تخمین پارامترهای ژنتیکی صفات ارزیابی شده در گیاه گلرنگ با مدل سه پارامتری، در تلاقی 93*A در محیط عدم تنش.

Table 3- Estimation of genetic parameters of evaluated traits in safflower plant with three-parameter model, in crossbreeding 93*A in non-stress humidity environment

۹۳ نرمال	درجه	ارتفاع	SPAD	تعداد شاخه	تعداد غوزه	وزن تر بوته	عملکرد تک بوته	روز تا
N.93	آزادی	Height		فرعی	Number of boll	Plant fresh weight	Single-plant yield (gr)	۵۰٪ تکمه‌دهی
	Df	(cm)		Number of sub branches				Day up to 50% Heading
میانگین m	133.41**	65.01**	16.98**	69.81**	1.07**	3.78**	129.94**	160.30**
اثرات افزایشی d	-9.09**	5.25**	1.20	-7.68**	-0.25**	49.28**	5.28**	9.03**
اثرات غالبیت h	-0.69	-7.65*	0.85*	-10.25**	0.45**	-50.82**	6.26**	5.44**
کای اسکوئر χ^2	5.63	7.48	11.46*	29.68**	4.83	4.94	2.56	3.08

* و **: به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respective

هر دو آزمون‌های مذکور، برای تشخیص اینکه آیا مدل ساده سه پارامتری مناسب می‌باشد یا خیر استفاده شدند. در پژوهشی

همچنین از آزمون مقیاس انفرادی (A, B, C و D) برای بررسی مدل افزایشی - غالبیت استفاده گردید (جدول ۵ و ۶).

غالبيت در توارث صفات نقش داشتند، اثرات غالبیت به‌طور چشمگیری اهمیت بیشتری از اثرات افزایشی دارد (Ljubicic et al., 2016).

محاسبه پارامتر میانگین، اثر افزایشی و غالبیت

نتایج این مطالعه نشان داد در این تلاقی و هر دو محیط تنش خشکی و عدم تنش پارامتر m برای تمامی صفات معنی‌دار بود. معنی‌دار شدن این پارامتر در تمام صفات، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری بین والدین و اهمیت برهمکنش‌های غیر آلی می‌باشد (جدول ۷ و ۸).

در همین راستا نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران گزارش شده است (Abd El-Hady et al., 2018; Salmi et al., 2019; Taheri et al., 2022).

به‌منظور مطالعه اثرات ژنی و تنوع ژنتیکی عملکرد و کیفیت محصول در شش نسل پایه حاصل از تلاقی دو گندم پاییزه، نتایج حاکی از آن است که اثرات افزایشی و غیر افزایشی در توارث صفات مورد مطالعه دخالت دارد. لذا برای توجیه ژنتیکی صفات، مدل سه پارامتری (افزایشی - غالبیت) کافی نمی‌باشد. همچنین اثرات غالبیت و اثرات اپیستازی (غالبیت × غالبیت) برای اکثر صفات مورد بررسی نقش مهمتری از اثرات افزایشی و اشکال دیگر اپیستازی داشتند (Bilgin et al., 2016). محققین در مطالعه‌ای جهت برآورد پارامترهای ژنتیکی عملکرد و اجزای عملکرد در گندم نان با استفاده از تجزیه میانگین نسل‌ها بیان کردند که در وراثت صفات مورد مطالعه اثرات افزایشی و غالبیت، اثرات اپیستازی (افزایشی × افزایشی و غالبیت × غالبیت) نقش مهمی ایفا می‌کنند. با آنکه اثرات افزایشی و

جدول ۴- تخمین پارامترهای ژنتیکی صفات ارزیابی شده در گیاه گلرنگ با مدل سه پارامتری، در تلاقی 93*A در محیط رطوبتی تنش.

Table 4- Estimation of genetic parameters of traits evaluated in safflower plant with three-parameter model, in crossbreeding 93*A in stress humidity environment

تنش ۹۳ T.93	درجه آزادی Df	ارتفاع Height (cm)	SPAD	تعداد شاخه فرعی Number of sub branches	تعداد غوزه Number of boll	وزن تر بوته Plant fresh weight	عملکرد تک بوته Single-plant yield (gr)	روز تا ۵۰٪ تکمه‌دهی Day up to 50% Heading
میانگین m	81.69**	52.41**	11.54**	37.73**	0.42**	117.75**	115.73**	146.85**
اثرات افزایشی d	7.92	-1.97*	1.53*	4.34*	-0.02	21.08*	-8.94*	-7.26
اثرات غالبیت h	-3.98**	2.10	-0.50**	0.71**	0.08*	-48.05*	0.25**	1.32*
کای اسکوئر χ ²	158.04**	246.76**	21.28**	144.10**	122.69**	216.62**	454.14**	308.88**

* و **: به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respective

جدول ۵- آزمون مقیاس انفرادی A, B, C و D صفات ارزیابی در گیاه گلرنگ در تلاقی 93*A در محیط فاقد تنش

Table 5- Individual scale test of A, B, C and D evaluation traits in safflower plant in crossing 93*A in the humidity environment of non stress

شرایط نرمال Normal conditions	آزمون Test	ارتفاع Height (cm)	SPAD	تعداد شاخه فرعی Number of sub branches	تعداد غوزه Number of boll	وزن تر بوته Plant fresh weight	عملکرد تک بوته Single-plant yield (gr)	روز تا ۵۰٪ تکمه‌دهی Day up to 50% Heading	تعداد شاخه فرعی Number of sub branches
93* American آمریکایی	A	1.470	1.882	0.89	3.48**	0.658	1.831	0.234	1.527
	B	0.356	1.542	2.81**	3.23**	1.642	1.319	1.191	0.312
	C	1.720	0.996	2.02*	1.71	1.131	0.957	1.340	0.451
	D	0.948	1.130	0.91	1.73	1.882	1.028	0.297	1.160

* و **: به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respective

جدول ۶- آزمون مقیاس انفرادی A, B, C و D صفات ارزیابی در گیاه گلرنگ در تلاقی 93*A در محیط تنش

Table 6- Individual scale test of A, B, C and D evaluation traits in safflower plant in 93*A crossing in stress humidity environment.

شرایط تنش Stress conditions	آزمون Test	درجه آزادی df	ارتفاع Height (cm)	SPAD	تعداد شاخه فرعی Number of sub branches	تعداد غوزه Number of boll	وزن تر بوته Plant fresh weight	عملکرد تک بوته Single-plant yield (gr)	روز تا ۵۰٪ تکمه‌دهی Day up to 50% Heading
93*American	A	7.15**	14.02**	2.58**	7.34*	7.35	0.60	11.57**	0.65
	B	7.79**	9.0**	2.99**	6.79**	6.27	0.02	5.95*	3.78**
	C	0.93	11.96**	0.79	3.42**	8.91**	14.38**	5.70**	14.19**
	D	11.07**	1.28	4.12**	3.37**	1.04	12.03**	17.80	13.15*

* و **: به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respective

افزایشی، اثرات غالبیت نیز تاثیر مهمی در کنترل صفات مورد مطالعه دارد. نتایج نشان داد که در تلاقی 93*A در شرایط عدم تنش تمامی صفات بجز ارتفاع بوته و همچنین در شرایط تنش رطوبتی اکثر صفات بجز SPAD پارامتر [h] معنی‌دار شد (جداول ۷ و ۸). در این مطالعه مقدار اثرات غالبیت از اثرات افزایشی در شرایط نرمال در تلاقی (93*A)، در صفات تعداد غوزه و روز تا ۵۰٪ درصد تکمه‌دهی و در شرایط تنش رطوبتی صفات SPAD، وزن تر بوته، روز تا ۵۰٪ تکمه‌دهی و روز تا ۵۰٪ گل‌دهی به مراتب بیشتر بود (جداول ۷ و ۸).

علامت منفی پارامتر غالبیت نشان‌دهنده غالبیت نسبی در جهت کاهش صفت مربوطه می‌باشد و با توجه به علامت مثبت پارامتر h برای صفات مورد بررسی، غالبیت ناقص به سمت ولدی رخ می‌دهد که دارای میانگین بالایی می‌باشد. بنابراین معنی‌دار شدن پارامتر غالبیت برای کارآمدتر شدن انتخاب در این پژوهش، ترجیح این است گزینش به نسل‌های آخر موکول شود تا هموزیگوستی افزایش یابد (Al-Naggar et al., 2021).

اثر غیرافزایشی (اثر اپیستازی)

اپیستازی زمانی رخ می‌دهد که اثر یک ژن، تحت تاثیر ژن یا ژن‌های دیگر در مکان‌های دیگر ژنی قرار گیرد. در بیشتر مدل‌های آماری برای محاسبه اثرات ژن‌های کنترل‌کننده صفات کمی، فرض می‌شود که اثر اپیستازی اهمیت کمی دارند. یکی از عمومی‌ترین فرضیات، فرض عدم وجود اپیستازی در مدل‌های ژنتیک کمی می‌باشد (Kearsey and Pooni, 1996).

برآورد پارامترهای ژنتیکی در شرایط نرمال و تنش خشکی

نتایج این مطالعه (جداول ۷ و ۸) نشان داد که در تلاقی 93*A در شرایط نرمال رطوبتی تمامی صفات، بجز شاخه فرعی و همچنین در شرایط تنش رطوبتی اکثر صفات بجز ارتفاع بوته، وزن تر بوته و روز تا ۵۰٪ درصد گل‌دهی پارامتر [d] معنی‌دار شد که بیانگر پتانسیل بهبود صفات مورد بررسی با استفاده از روش‌های گزینش شجره‌ای در نسل‌های اولیه در جمعیت در حال تفرق می‌باشد (Soliman, 2018; Koubisy, 2019; Al-Naggar et al., 2021). علامت مثبت پارامتر اثرات افزایشی به معنی برتری والد غالب در کنترل صفات مورد مطالعه است. منفی بودن این پارامتر نشان‌دهنده برتری والد مغلوب در کنترل صفت می‌باشد (Asadi et al., 2019). محاسبه اثرات افزایشی ممکن است به دلیل وجود درجه بالایی از پراکندگی کوچک ژنی باشد. بنابراین باید یادآور شد که علامت این پارامتر به این بستگی دارد که کدام والد P1 و کدام والد P2 در نظر گرفته شود (Shayan et al., 2017; Mather and Jinks, 1982). در این پژوهش در شرایط نرمال اهمیت اثرات افزایشی در وراثت صفات SPAD، شاخه فرعی، عملکرد تک بوته و روز تا ۵۰ درصد گل‌دهی و همچنین در شرایط تنش خشکی در صفات ارتفاع بوته، شاخه فرعی، تعداد غوزه و عملکرد تک بوته نشان می‌دهد (جدول ۷ و ۸). آزمایشی در گلرنگ نشان داد که برای تعداد شاخه فرعی، اثرات افزایشی ژن نقش مهمی در شرایط تنش خشکی داشت که با نتایج این پژوهش مشابهت دارد (Amini, 2020).

نتایج این آزمایش نشانگر این است که علاوه بر اثرات

در تلاقی رقم امید بخش ۹۳ × آمریکایی برای صفات مورد مطالعه، به شرح ذیل می‌باشد:

ارتفاع، SPAD، تعداد شاخه فرعی

در مورد این صفات در شرایط نرمال در تلاقی A×93 مدل ۳ پارامتری m-d-h برای صفت SPAD، برای صفت ارتفاع مدل ۲ پارامتری m-d و برای صفت تعداد شاخه فرعی مدل ۵ پارامتری m-d-h-i-j، به‌عنوان مناسبترین مدل انتخاب شد (جدول ۷). همچنین در شرایط محیطی تنش رطوبتی در تلاقی A×93 مدل ۴ پارامتری m-d-h-l برای صفت SPAD، مدل ۵ پارامتری m-d-h-i-l برای صفت ارتفاع بوته، صفت تعداد شاخه فرعی مدل ۵ پارامتری m-d-h-i-l به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد (جدول ۸). محققین در پژوهشی دیگر در بررسی نحوه توارث برخی صفات مرتبط با عملکرد و با استفاده از تجزیه میانگین نسل‌ها در گندم نان نشان دادند که صفت تعداد سنبله نابارور در بوته و ارتفاع سنبله در شرایط تنش خشکی تحت تاثیر اثرات اپیستازی (افزایشی × افزایشی و غالبیت × غالبیت) قرار گرفتند که با نتایج این پژوهش (تعداد شاخه فرعی و ارتفاع بوته در شرایط تنش رطوبتی) مطابقت داشت (Frozanfar et al., 2010). در مطالعه‌ای که با استفاده از تجزیه میانگین نسل‌ها بر روی تلاقی کلزا انجام شد، نتایج نشان داد که مدل ساده افزایشی - غالبیت برای توجیه صفت ارتفاع در شرایط تنش رطوبتی کافی نمی‌باشد بلکه اپیستازی برای توجیه آن نشان داده شد و در شرایط نرمال رطوبتی این صفت مدل اپیستازی وارد نشد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (Ahmadian et al., 2016).

زمانی که دو پارامتر اثر غالبیت و اثرات اپیستازی (غالبیت × غالبیت) در مدل باشد، لذا نوع اپیستازی را می‌توان مشخص کرد. بنابر نظرات محققین زمانی که این دو پارامتر علامت مشابهی داشته باشد، اپیستازی از نوع اپیستازی تکمیلی می‌باشد و زمانی که علامت این دو مشابه نباشد، اپیستازی مضاعف است (Al-Naggar et al., 2021). به این ترتیب علامت مخالف پارامترهای h و l برای صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی و SPAD در شرایط تنش خشکی حاکی از وجود اپیستازی مضاعف برای صفات فوق نشان می‌دهد که سبب

کاهش واریانس نسل‌های درحال تفرق می‌شود. این نوع از اپیستازی با کاهش تنوع در نسل F و نسل‌های بعد، سبب اختلال در فرایند گزینش می‌گردد و عمل گزینش تا دسترسی به سطح بالایی از تثبیت ژنی باید به تاخیر انداخته شود. این نوع اپیستازی در جهت گزینش گیاهان مطلوب مشکل ایجاد می‌کند. اپیستازی مضاعف ارزش اصلاحی ندارد و می‌تواند نتایج غیر قابل پیش بینی رخ دهد (Yadava and Narsinghani, 1999; Dorri et al., 2014).

تعداد غوزه، عملکرد تک بوته و وزن تر بوته

در مورد این صفات مورد مطالعه در شرایط عدم تنش در تلاقی A×93 مدل سه پارامتری m-d-h برای صفت عملکرد تک بوته، تعداد غوزه و وزن تر بوته به‌عنوان بهترین مدل برازش گردید. همچنین در شرایط محیطی تنش خشکی، مدل ۵ پارامتری m-d-h-i-l صفات عملکرد تک بوته، مدل ۴ پارامتری m-d-h-l برای صفت وزن بوته و مدل ۳ پارامتری m-d-h-i-j به‌عنوان بهترین مدل برآورد شد (جدول ۸ و ۷). در این پژوهش، صفت عملکرد تک بوته اثرات افزایشی و پارامتر اپیستازی (افزایشی × افزایشی) دارای علامت مخالف بودند که بیانگر ماهیت متضاد اثر متقابل برای صفت مورد مطالعه می‌باشد. در پژوهشی دیگری با استفاده از تجزیه میانگین نسل‌ها در ذرت نشان داده شد که عملکرد تک بوته تحت تاثیر اپیستازی (مدل ۵ پارامتری m-d-h-i-l) قرار گرفته است که با نتایج این مطالعه در شرایط تنش خشکی مطابقت داشت (Moosavi et al., 2018).

روز تا ۵۰ درصد تکمه‌دهی و روز تا ۵۰ درصد گل‌دهی

نتایج تجزیه میانگین نسل‌های این پژوهش نشان داد نسل‌های مورد مطالعه در شرایط نرمال در تلاقی A*93 برای صفات روز تا ۵۰ درصد تکمه‌دهی و روز تا ۵۰ درصد گل‌دهی مدل سه پارامتری افزایشی - غالبیت بهترین مدل برای توجیه کنترل ژنتیکی صفات مورد مطالعه می‌باشد. نتایج در شرایط تنش خشکی نشان‌دهنده آن است که برای صفت روز تا ۵۰ درصد تکمه‌دهی مدل ۵ پارامتری m-d-h-i-l و صفت روز تا ۵۰٪ گل‌دهی مدل ۴ پارامتری m-d-h-i به‌عنوان مناسبترین مدل انتخاب شدند (جدول ۸ و ۷).

جدول ۷- برآورد اجزای ژنتیکی مختلف برای صفات مورد بررسی در تلاقی 93*A در شرایط عدم تنش رطوبتی

Table 7- The estimation of different genetic components for the studied traits in the cross of 93*A in the condition of no humidity stress

Traits صفات	m	[d]	[h]	[i]	[j]	[l]
ارتفاع Height (cm)	133.41**	-9.09**	-0.69 ^{ns}	-	-	-
SPAD	65.01**	5.25**	-7.65*	-	-	-
تعداد شاخه فرعی Number of sub branches	19.44**	2.23**	-3.93*	-3.43*	-6.87**	-
تعداد غوزه Number of boll	69.15**	-9.09**	-9.59**	-	7.97*	-
وزن تر بوته Plant fresh weight	1.07**	-0.25**	0.45**	-	-	-
عملکرد تک بوته Single-plant yield (gr)	230.48**	49.28**	-50.82**	-	-	-
روز تا 50% Heading تکمه‌دهی Day up to 50% Heading	129.94**	5.28**	6.26**	-	-	-
روز تا 50% گلدهی Day up to 50% flowering	160.3**	9.03**	5.44**	-	-	-

* و **: به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5 و 1 درصد و ns: عدم معنی‌داری

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respective and ns, not significant

m: میانگین والدین، d: مجموع اثرهای افزایشی، h: مجموع اثرهای غالبیت، i: مجموع اثر متقابل اثرهای افزایشی، j: مجموع اثر متقابل اثرهای افزایشی و غالبیت، l: مجموع اثر متقابل غالبیت

[m]: mid-parent value, [d]: pooled additive effects, [h]: pooled dominance effects, [i]: pooled interactions between additive effects, [j]: pooled interactions between additive and dominance effects, [l]: pooled interactions between dominance effects

جدول ۸- برآورد اجزای ژنتیکی مختلف برای صفات مورد بررسی در تلاقی 93*A در شرایط تنش رطوبتی

Table 8- The estimation of different genetic components for the examined traits in the 93*A cross under humidity stress conditions

صفات Traits	m	[d]	[h]	[i]	[j]	[l]
ارتفاع Height (cm)	**124.76	*8.38	*-117.76	*-40.79	-	*76.66
SPAD	**57.07	-2.23	*-23.23	-	-	*26.15
تعداد شاخه فرعی Number of sub branches	**21.45	**1.52	**26.53	**9.61	-	**17.42
تعداد غوزه Number of boll	**38.27	*7.88	0.52	-	*-30.41	-
وزن تر بوته Plant fresh weight	**0.39	**0.02	**0.48	-	-	**0.45
عملکرد تک بوته Single-plant yield (gr)	**250.52	**20.93	*-322.15	*-137.43	-	*-140.54
روز تا 50% Heading تکمه‌دهی Day up to 50% Heading	**162.76	-5.67	*-119.14	*-46.70	-	*77.05
روز تا 50% گلدهی Day up to 50% flowering	**163.38	*-6.89	*-26.16	*-21.09	-	-

* و **: به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5 و 1 درصد

* and **: significant at the 5 and 1% probability levels, respective

m: میانگین والدین، d: مجموع اثرهای افزایشی، h: مجموع اثرهای غالبیت، i: مجموع اثر متقابل اثرهای افزایشی، j: مجموع اثر متقابل اثرهای افزایشی و غالبیت، l: مجموع اثر متقابل غالبیت

[m]: mid-parent value, [d]: pooled additive effects, [h]: pooled dominance effects, [i]: pooled interactions between additive effects, [j]: pooled interactions between additive and dominance effects, [l]: pooled interactions between dominance effects

است. بعلاوه اثرات ژنی غیر افزایشی (اپیستازی) در کنترل ژنتیکی تمام صفات در شرایط تنش خشکی نقش بارزتری داشتند. پس بهتر است انتخاب در نسل‌های بعد و پس از رسیدن به خلوص بیشتر (هموزیگوستی بالا) انجام شود. با این وجود با توجه به تاثیر بیشتر ژنهای با اثر افزایشی در کنترل صفات SPAD، تعداد شاخه فرعی و عملکرد تک بوته در شرایط نرمال و همچنین در شرایط تنش خشکی شاخه فرعی، تعداد غوزه و عملکرد تک بوته استفاده از روش گزینش دوره‌ای برای افزایش ژن‌های مطلوب و در نهایت ژنوتیپ‌های خالص ارائه می‌شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از زحمات و همکاری پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان تقدیر و تشکر می‌گردد. همچنین، این تحقیق توسط کمک هزینه پژوهشی (UOZ-GR-3014) دانشگاه زابل حمایت شده است و مراتب سپاس خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه زابل اعلام می‌داریم.

محققین با استفاده از روش تجزیه میانگین نسل‌ها درنتاج حاصل از تلاقی ارقام گندم نان مغان ۳ و ارگ تحت شرایط تنش کمبود آب نشان دادند که روز تا رسیدگی تحت تاثیر اپیستازی (مدل ۴ پارامتری m-d-h-i) قرار گرفته است که با نتایج این آزمایش در شرایط تنش خشکی مطابقت داشت (Shayan et al., 2017). در پژوهش دیگری که با روش تجزیه میانگین نسل‌ها در مورد نحوه توارث تحمل به خشکی در گندم نان در تلاقی شیراز × WS-82-14 انجام شد نتایج نشان داد صفت روز تا گلدهی تحت تاثیر مدل سه پارامتری افزایشی - غالبیت معنی‌دار شد همچنین نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های محققین دیگر بر روی گندم همسو بود (Cheloei et al., 2012).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که برای بیشتر صفات گیاهی مورد مطالعه در شرایط عدم تنش مدل سه پارامتری مناسب بوده و پارامترهای اپیستاتیک در کنترل این صفات نقش نداشته

References

- Abd EL-Hady, M.A., Fergani, M.A., EL-Temseh, M.E. and Abd EL-Kader, M.A., 2018. Physiological response of some wheat cultivars to antitranspirant under different irrigation treatments. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 7(1), pp.100-109.
- Ahmadian, S., Mortazavian, M.M., Ebrahimi, M., Amini, F., Ghorbani Javid, M. and Foghi, B., 2016. Genetic Analysis of some morphological traits in wheat using generation mean analysis under normal and drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 20(8), pp.175-182. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2372.1614>
- Akhtar, N. and Chowdhry, M.A., 2006. Genetic analysis of yield and some other quantitative traits in bread wheat. *International Journal of Agriculture and Biology*, 4, pp.523-527.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.
- Al-Naggar, A.M.M., Al-Azab, K.F., Younis, A.S.M., Hassan, I.O., Basyouny, M.A.E. and Ayaad, M., 2021. Genetic parameters controlling the inheritance of glaucousness and yield traits in bread wheat. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e253864. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.253864>
- Amini, F., 2020. Generation mean analysis to determine genetic components of drought tolerance in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 9(2), pp.107-114.

- Amiri, R., Bahraminejad, S. and Cheghamirza, K., 2020. Genetic analysis of iron and zinc concentrations in bread wheat grains. *Journal of Cereal Science*, 95, 103077. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103077>
- Amiri, R., Bahraminejad, S. and Cheghamirza, K., 2021. Estimation of genetic control model for agronomic traits in the progeny of Marvdasht and MV-17 wheat cross under normal and terminal drought stress conditions. *Plant Genetic Researches*, 8(1), pp.61-80. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/pgr.8.1.5>
- Asadi, A.A., Valizadeh, M., Mohammadi, S.A. and Khodarahmi, M., 2019. Genetic analysis of response to water deficit stress based on physiological traits in wheat. *Plant Genetic Researches*, 6(2), pp.1-20. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/pgr.6.2.1>
- Bilgin, O., Kutlu, I. and Balkan, A., 2016. Gene effects on yield and quality traits in two bread wheat (*T. aestivum* L.) crosses. *International Journal of Crop Science and Technology*, 2, pp.1-10.
- Cheloei, G.R., Mohammadi, A., Bihamta, M.R., Ramshini, H.A. and Najafiyahn, G., 2012. Inheritance of drought tolerance in bread wheat using generation mean analysis. *Journal of Plant Production*, 19(1), pp.43-66.
- Dorri, P., Khavari-Khorasani, S., Valizadeh, M. and Taheri, P., 2014. The study of inheritance and gene effects on yield and agronomic traits of early generations of genetic maize Dehghan (KSC400). *The Plant Genetic Resources*, 1(2), pp.33-42. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/pgr.1.2.33>
- Ebrahimi, F., Majidi, M.M., Arzani, A., Mohammadi Nejad, GH. and Dehghan Kouhestani, R., 2017. Yield potential and drought tolerance of some domestic and foreign varieties of safflower in three regions of Iran. *Journal of Crop Production and Processing*, 7(3), pp.1-18. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcpp.7.3.1>
- Ferrari, E.D., Ferreira, V.A., Grassi, E.M., Picca, A.M.T. and Paccapelo, H.A., 2018. Genetic parameters estimation in quantitative traits of a cross of triticale (\times *Triticosecale* W.). *Open Agriculture*, 3(1), pp.25-31. <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0003>
- Frozanfar, M., BiHamta, M.R., Peyghambari, H. and Zainali, H., 2010. Inheritance of some traits associated with yield in bread wheat using generation mean analysis. *Seed and Plant Journal*, 25(3), pp.419-431. [In Persian].
- Gangopadhyay, S., Panwar, I.S. and Singh, V., 2018. Estimates of genetic effects of yield and related traits through generation mean analysis in bread wheat. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 6(2), pp.1627-1631. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.6220>
- Haluvar, A.R. and Miranda, G.D., 1985. *Quantitative genetics in maize breeding*. Iowa State Press. Ames Iowa. 339 p.
- Kearsey, M.J and Pooni, H.S., 1996. *The genetic analysis of quantitative traits*. Chapman & Hall, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4441-2>
- Khajeh Pour, M.R., 2005. *Industrial crop production*. University Jihad, Isfahan University of Technology. [In Persian].
- Koubisy, Y.S.I., 2019. Generation mean analysis in two bread wheat crosses under heat stress conditions. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 97(2), pp.589-607. <https://doi.org/10.21608/ejar.2019.111095>

- Ljubcic, N., Petrovic, S., Dimitrijevic, M. and Hristov, N., 2016. Gene actions involved in the inheritance of yield related traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28(7), pp.477-484. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-02-117>
- Mather, K. and Jinks, J.L., 1982. *Biometrical Genetics: the study of continuous variation*, 3rd Ed. Chapman and Hall, London, UK.. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3406-2>
- Moosavi, S.S., Ghanbari, F., Abdollahi, M.R., Kiani, A.R. and Mosavat, S.A., 2018. Evaluation of heritability and genetic parameters of grain yield and important agronomic traits in maize (*Zea mays* L.) lines using generations mean analysis method. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 20(2), pp.93-107. [In Persian].
- Mundel, H.H. and Bergman, J.W., 2008. Safflower breeding. In J. Vollmann & I. Rajcan (Eds.), *Oil crop breeding. Handbook of Plant Breeding* (pp. 423–447). Springer, Berlin.
- Nemati, M., Vahed, M.M., Norouzi, M., Toorchi, M. and Mohammadi, S.A., 2018. Inheritance of agronomic traits in the generations from the cross between arta and arg wheat cultivars under water deficit stress. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 13(6), pp.24-31.
- Salmi, M., Benmahammed, A., Benderradji, L., Fellahi, Z., Bouzerzour, H., Oulmi, A. and Benbelkacem, A., 2019. Generation means analysis of physiological and agronomical targeted traits in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cross. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(3), pp.8971-8981. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.77410>
- Shayan, S., Vahed, M.M., Norouzi, M., Mohammadi, S.A., Toorchi, M. and Molaei, B., 2017. Inheritance of agronomical and physiological traits in the progeny of moghan3 and arg bread wheat varieties Cross. *Plant Genetic Researches*, 4(2), pp.43-60. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/pgr.4.2.43>
- Soliman, G.M.M., 2018. Genetical analysis for yield and yield component in durum wheat under different sowing dates. *Proceedings of the 7th Field Crops Conference*. Giza, Egypt.
- Taheri, R., Khodarahmpour, Z., Khodarahmi, M. and Moradi, M., 2022. Genetic analysis of agronomic and morphological traits of durum wheat [*Triticum turgidum* L. spp. *durum* (Desf.)] using generations mean analysis under non-stress and terminal drought stress conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 24(2), pp.150-164. [In Persian].
- Wasaya, A., Zhang, X., Fang, Q. and Yan, Z., 2018. Root phenotyping for drought tolerance: A review. *Agronomy*, 8, pp.241-260. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110241>
- Yadava, R.K. and Narsinghani, V.G., 1999. Gene effects for yield and its components in wheat. *Rachis Newsl*, 18(2), pp.79-89.
- Zabet, M., Mostafavi, Kh., Karimi, H. and Khodarahmi, M., 2017. Genetic study of yield and some agronomic traits in barley using generation mean analysis. *Seed and Plant Improvement Journal*, 33(1), pp.109-131. [In Persian].
- Zare, M., Chogan, R., Majidi-Heravan, E. and Behamta, M.R., 2008. Generation mean analysis for grain yield and its associated traits in maize. *Seed and Plant Journal*, 24(1), pp.63-81. [In Persian].

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 139-155

Investigating the effect of physiological characteristics of durum wheat on yield under rainfed conditions using multivariate statistical methods

Hoshang Rahmati ^{*a}, Ali Nakhzari Moghadam ^b

^a Department of Agriculture, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

^b Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

*Corresponding Author: hoshang.rahmatipnu@pnu.ac.ir

Received: 8 August 2024 Accepted: 30 September 2024

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.472463.1429

How to cite this article:

Rahmati, H. and Nakhzari Moghadam, A., 2025. Investigating the effect of physiological characteristics of durum wheat on yield under rainfed conditions using multivariate statistical methods. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 139-155. <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.472463.1429>

Abstract

Introduction: Drought is one of the most important limiting factors for wheat production in the world and it affects the plant from different aspects. Drought stress causes many physiological changes, including changes in relative water content, vegetation index and photosynthetic efficiency of wheat, which ultimately causes a significant reduction in plant growth parameters and grain yield. Basically, the response of plants to drought stress is complex; because it is a combination of the effect of stress, plant reactions to stress, time, intensity, and duration of stress occurrence in different years and places, and therefore the amount of damage also varies greatly depending on the growth stage of the plant at the time of stress occurrence. The most damage caused by drought stress in Iran is in the stage of wheat grain filling. Durum wheat (*Triticum durum*, Desf) is an important food product with heavy gluten and non-sticky dough, ideal for making pasta and spaghetti.

Materials and Methods: In order to investigate the relationship between physiological characteristics and grain yield in durum wheat cultivars under rainfed conditions, 10 durum wheat genotypes were studied in the form of a randomized complete block design with 3 replications during the cropping years of 2017 - 2018 and 2018 - 2019, in Kohdasht city of Lorestan province was evaluated. Seed yield traits and physiological characteristics of photosynthetic pigments, vegetation index, relative water content, leaf protein and light use efficiency were investigated.

Results and Discussion: The phenotypic correlation of the traits showed that all the physiological traits had a positive relationship with the yield, and among the eight investigated traits, the relationship between the chlorophyll a, total chlorophyll and vegetation index with grain yield was significant at the 5% level, but the other five traits had a non-significant relationship. Based on Principle components analysis for traits among genotypes, two components were extracted that explained 83.2% of the variance. According to the distribution diagram of traits based on two components, it was observed that vegetation index and relative leaf water content had the most relationship with seed yield. According to the path analysis, it was observed that the two traits of light use efficiency and total chlorophyll had the highest positive effect on grain yield with direct effects of 1.392 and 0.772, respectively, and leaf protein and chlorophyll b with the effects of direct -0.646 and -0.884 had the



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

most negative effect on grain yield. On the other hand, it was observed that chlorophyll-a and carotenoids had a positive indirect effect on yield through the two traits of total chlorophyll and light use efficiency, and relative leaf water content and vegetation index also had a positive indirect effect on grain yield through light use efficiency. And finally, all traits except the vegetation index had a negative indirect effect on yield through chlorophyll-b.

Conclusion: In general, it can be stated that all the physiological characteristics investigated under rainfed conditions were directly or indirectly effective on the yield of durum wheat, and among these traits, total chlorophyll and light use efficiency directly had the most positive effect on the seed yield. Photosynthetic pigments also increased seed yield through total chlorophyll and light use efficiency. The vegetation index, leaf protein and relative water content of leaves also increased the seed yield by increasing the efficiency of light use. All the traits, except the vegetation index, increased the yield through a negative indirect effect on chlorophyll b. Based on this, it is recommended that in breeding programs, in order to improve yield under dryland conditions, selection be made based on two characteristics: total chlorophyll and light use efficiency to increase yield.

Keywords: Path analysis, Plant physiology, Seed yield, Water stress, Wheat

بررسی تاثیر خصوصیات فیزیولوژیک گندم دوروم بر عملکرد تحت شرایط دیم با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره

هوشنگ رحمتی^{۱*}، علی نخزری مقدم^۲

۱- گروه کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

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

* مسئول مکاتبه: hoshang.rahmatispnu@pnu.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.472463.1429

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

چکیده

خشکی باعث تغییرات متعدد فیزیولوژیک و کاهش قابل توجه پارامترهای رشد گیاه و عملکرد گندم شده و ساختار ارتباط بین پارامترهای فیزیولوژیک، رشدی و عملکردی نسبت به شرایط نرمال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به منظور بررسی ارتباط بین خصوصیات فیزیولوژیک با عملکرد دانه گندم دوروم تحت شرایط دیم، تعداد ۱۰ ژنوتیپ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در طی سال‌های زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹ در شهرستان کوه‌دشت با شرایط آب و هوایی نیمه گرمسیری ارزیابی شد. بر اساس داده‌های مرکب از دو سال آزمایش، همبستگی فنوتیپی صفات نشان داد که تمام خصوصیات فیزیولوژیک با عملکرد همبستگی مثبت داشتند. همبستگی سه صفت کلروفیل a، کلروفیل کل و شاخص سبزیگی با عملکرد دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صفات شاخص سبزیگی و محتوای آب نسبی برگ بیشترین ارتباط را با عملکرد دانه داشتند. با توجه به تجزیه علیت دو صفت کارایی مصرف نور و کلروفیل کل، به ترتیب با میزان اثرات مستقیم ۱/۳۹۲ و ۰/۷۷۲ دارای بیشترین تاثیر مثبت بر عملکرد دانه بودند و صفات پروتئین برگ و کلروفیل b به ترتیب با میزان اثرات مستقیم ۰/۶۴۶- و ۰/۸۸۴- بیشترین تاثیر منفی بر عملکرد دانه داشتند. رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی نیز از طریق دو صفت کلروفیل کل و کارایی مصرف نور، سبب افزایش عملکرد شدند. شاخص سبزیگی، پروتئین برگ و محتوای آب نسبی برگ نیز با بالا بردن کارایی مصرف نور موجب افزایش عملکرد شدند. بر این اساس گزینش بر اساس صفات کلروفیل کل و کارایی مصرف نور در شرایط دیم به منظور بهبود عملکرد در برنامه‌های اصلاحی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تجزیه علیت، تنش رطوبتی، عملکرد دانه، فیزیولوژی گیاهی، گندم

مقدمه

۵۰ درصد سطح زیر کشت و تولید جهانی گندم دوروم را تشکیل می‌دهند. خارج از منطقه مدیترانه، کانادا، مکزیک، ایالات متحده آمریکا، روسیه، قزاقستان، آذربایجان و هند تولیدکنندگان بزرگ گندم دوروم هستند که سه کشور اول، مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند (Mohammadi and Haghparsat, 2022).

بخش بسیار وسیعی از اراضی زیر کشت گندم در جهان و ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است و در این مناطق به سبب کمبود آب و در نتیجه حادث شدن تنش خشکی در محیط رشد گندم عملکرد گیاه به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد (Shirvani et al., 2021). از طرفی تنوع زیاد در میزان و پراکنش بارندگی و به تبع آن تغییرات عملکرد محصول در سال‌های مختلف از مشکلات مهم تولید پایدار در دیمزارها به شمار می‌رود (Najafi et al., 2022). خشکی

گندم دوروم (*Triticum turgidum* L. var. durum) تنها گندم تتراپلوئید است که به دلیل خواص منحصربه‌فرد دانه و کاربردهای متنوع آن همچنان در دنیا کشت می‌شود (Ahmadi, 2021). این گیاه دومین گونه زراعی مهم گندم و دهمین محصول زراعی مهم دنیا است که حدود شش درصد سطح زیر کشت گندم را شامل می‌شود و تولید سالانه آن بین ۳۷ تا ۴۰ میلیون تن می‌باشد. کشورهای با شرایط آب و هوایی مدیترانه‌ای، بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گندم دوروم و بزرگ‌ترین مصرف‌کننده محصولات و فرآورده‌های آن هستند. از لحاظ تاریخی، گندم دوروم به محیط‌های کپارش و با بارندگی متغیر و با تنش گرمایی انتهای فصل رشد، مانند شرایط مدیترانه، سازگار است. در واقع، کشورهای حوزه مدیترانه (الجزایر، ترکیه، ایتالیا، مراکش، سوریه، تونس، فرانسه، اسپانیا و یونان) تقریباً

محلول کاهش نشان می‌دهد (Abdoli et al., 2013; Keshavarznia et al., 2017). تحقیقات نشان داده است که اندازه‌گیری میزان پرولین در شرایط تنش می‌تواند شاخص مناسبی در جهت یافتن لاین‌های مقاوم باشد (Shahbazi et al., 2016).

همچنین گزارش شده است که به دلیل سهولت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک در شرایط کنترل‌شده، می‌توان جهت دستیابی به ارقام متحمل به تنش در برنامه‌های بلندمدت اصلاحی از این صفات استفاده کرد (Asadi and Hatami, 2021)؛ اما در مورد ارتباط صفات فیزیولوژیک در شرایط تنش وجود همبستگی‌های منفی و مثبت معنی‌دار گزارش شده است (Keshavarznia et al., 2017).

بر همین اساس می‌توان بیان داشت که صفات فیزیولوژیک مختلف در شرایط تنش واکنش متفاوتی دارند و روند واکنش صفات نسبت به تنش کاملاً همسو نمی‌باشد. از این رو نیاز است که ارتباط بین خصوصیات فیزیولوژیک با همدیگر و با عملکرد بیشتر مورد بررسی قرار گیرد تا در برنامه‌های اصلاحی از صفاتی استفاده شود که بیشتر بر عملکرد مؤثر بوده و همچنین در برنامه‌های اصلاحی تعادلی در بین افزایش یا کاهش خصوصیات فیزیولوژیک مدنظر قرار گیرد؛ بر همین اساس تجزیه علیت بیشتر به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی اهمیت صفات مؤثر بر عملکرد به کار می‌رود. در واقع عملکرد، صفت کمی پیچیده‌ای است که تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی و ژنتیکی قرار می‌گیرد، همچنین به دلیل تعداد زیاد ژن کنترل‌کننده، قابلیت توارث پایین دارد، لذا جهت افزایش عملکرد، در روش‌های اصلاحی، انتخاب بر مبنای صفات مرتبط با عملکرد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Hakimipoor and Mostafav, 2011). بنابراین با توجه به آنچه بیان شد، این تحقیق به‌منظور ارزیابی ارتباط صفات فیزیولوژیک در شرایط دیم با همدیگر و نهایتاً عملکرد دانه در گندم دوروم بر اساس روش‌های چند متغیره انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۱۰ ژنوتیپ گندم دوروم تهیه‌شده از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان در دو سال زارعی مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱).

به‌عنوان یک تنش چندبعدی، گیاهان را در سطوح مختلف تحت تأثیر قرار می‌دهد (Rahmati et al., 2020). اساساً پاسخ گیاهان به تنش خشکی پیچیده است؛ زیرا ترکیبی از تأثیر تنش، واکنش‌های گیاه در مقابل تنش، زمان، شدت و طول دوره وقوع تنش در سال‌ها و مکان‌ها مختلف است و به همین دلیل میزان خسارت نیز با توجه به مرحله رشد گیاه در زمان وقوع تنش بسیار متفاوت است (Kilic and Yagbasanlar, 2010). همچنین تحمل خشکی تحت تأثیر خصوصیات مختلف مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی می‌باشد و از دیدگاه فیزیولوژیک با محتوای آب نسبی برگ، میزان آب نسبی از دست‌رفته، تجمع پرولین و اسید آسبزیک، تنظیم اسمزی، کلروفیل فلورسنس تبادل روزنه‌ای و کارایی مصرف آب و دیگر خصوصیات فیزیولوژیک مرتبط می‌باشد (Mohammadi et al., 2010). لذا درک کامل مبانی فیزیولوژیک تحمل تنش می‌تواند برای انتخاب ارقام متحمل و افزایش بهره‌وری مفید باشد (Lizana et al., 2006). به عبارتی مطالعه صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی می‌تواند به شناخت راهکارهایی برای انتخاب ارقام متحمل و افزایش عملکرد در شرایط متنوع محیطی از جمله شرایط تنش خشکی کمک کنند (Abdoli et al., 2013). در هر حال آگاهی از تغییرات فیزیولوژیک مؤثر بر بهبود ژنتیکی پتانسیل عملکرد گندم، برای شناخت دقیق‌تر عوامل محدودکننده عملکرد به‌منظور تعیین استراتژی‌های اصلاح نباتات در آینده ضروری است (Asadi et al., 2018).

مرحله رشد رویشی در تعیین پاسخ نهائی عملکرد دانه به تنش خشکی اهمیت زیادی دارد. بررسی پاسخ فیزیولوژیک گیاه در شرایط رشد رویشی می‌تواند تا حد زیادی سازوکارهای پاسخ عملکرد دانه را نیز به تنش خشکی آشکار نماید (Sadegzadeh et al., 2014). در این مرحله کمبود آب از بزرگ شدن سلول‌ها قبل از تقسیم سلولی جلوگیری کرده و با تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مثل فتوسنتز، تنفس، انتقال مجدد، جذب یونی، کربوهیدرات‌ها، سوخت‌وساز مواد لندوخته‌ای و سازمان‌یابی رشد، موجب کاهش رشد گیاه می‌شود (Jaleel et al., 2007). همچنین گزارش شده است که در شرایط تنش کم‌آبی غلظت پروتئین‌های محلول، محتوی کلروفیل a و b، نسبت کلروفیل a/b، شاخص سبزیگی کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II، محتوای آب نسبی و غلظت کربوهیدرات‌های

جدول ۱- لیست ژنوتیپ‌های مورد مطالعه گندم دوروم

Table 1- The list of studied durum wheat genotypes

منشأ	شجره نامه	نام ژنوتیپ
Origin	Pedigree	Genotype name
ایکاردا	Jori C69/Hau	اومرابی ۳
ICARDA	RA/INTER_16/SNITAN/9/USDA595/3/D67.3	Omrabi3
سیمیت	ARDENTE//6/BI//CRA/4/ALO/5/HUI/YAV_1	هانا
CIMMYT	7/HUI/YAV79/8/POD_9	Hana
ایکاردا	MEXICALI 75	آریا
ICARDA		Arya
ایکاردا	MRB11//SNIPE/MAGH/3/RUFOM-7	ساجی
ICARDA		Saji
سیمیت	ZHONG ZUO/2*GREEN-3	بهرنگ
CIMMYT	030Y--SORA/2*PLATA12, CD96587-G-1M	Behrang
سیمیت	040PAP-040YRL-4H-1Y- 0B	شبرنگ
CIMMYT		Shabrang
ایکاردا	15/A/Maragheh	مراغه ۱
ICARDA		Maragheh 1
ایکاردا	18/A/maragheh	مراغه ۲
ICARDA		Maragheh 2
ایکاردا	SHWA/MALD/Aaz	دی ام-۷۳-۱۳
ICARDA		DM-73-13
ایتالیا	Capeiti: EIT16/Cappelli	دهدشت
Italy		Dehdasht

خاک، برای تأمین نیاز کودی پیش از کاشت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم و ۷۰ کیلوگرم در هکتار اوره به خاک داده شد. زمین محل آزمایش به عمق ۲۵ سانتی‌متر شخم شد تا کود با خاک مخلوط شود. بعد از تسطیح و آماده‌سازی بستر، کشت در هر دو سال در تاریخ ۱۰ آذرماه انجام شد. بذور قبل از کشت با قارچ‌کش ویتاواکس با نسبت دو در هزار ضدعفونی شدند. در مرحله پنجه‌زنی، میزان ۴۰ گرم اوره ۴۶ درصد به‌صورت سرک به هر کرت اضافه شد (معادل ۱۱۰ کیلوگرم در هکتار اوره). وجین دستی نیز در بهار طی دو مرحله انجام گرفت. برای مبارزه با سن گندم از سم دسیس به میزان ۰/۳ لیتر در هکتار ماده تجاری و برای مبارزه با زنگ زرد از سم التو به میزان ۰/۵ لیتر در هکتار ماده تجاری استفاده شد.

نمونه‌گیری جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیولوژیک با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و اطمینان از اعمال تنش خشکی بر ژنوتیپ‌های مورد بررسی انجام شد. لوله‌ای شدن برگ‌ها در اوایل صبح مبنای اعمال تنش خشکی بر گیاهان لحاظ گردید (Jafarian and Maghsoudi Maud, 2015).

تحقیق حاضر در مزرعه تحقیقاتی شهرستان کوهدشت متعلق به مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، با ارتفاع ۱۱۹۵ متر از سطح دریا و موقعیت جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶۰ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۵۳ دقیقه عرض شمالی اجرا شد. طبق تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتن، کوهدشت دارای اقلیم نیمه گرمسیری با تابستان گرم و خشک می‌باشد. متوسط حداقل دما ۶/۹- درجه سانتی‌گراد و متوسط حداکثر دما ۲۴/۶ درجه سانتی‌گراد است. در دو سال زراعی، میزان بارندگی به ترتیب ۴۸۳ و ۶۵۰ میلی‌متر بود. افزایش دما در اواخر فصل یعنی در اواخر اردیبهشت تا تیرماه در این منطقه که معمولاً با قطع بارندگی همراه است، زراعت دیم را با تنش خشکی مواجه می‌سازد. نتایج آزمون خاک مزرعه از عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری به همراه میانگین بارش و دمای ماهانه طی دو سال زراعی به شرح جدول ۲ بود.

این پژوهش به‌صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در شرایط دیم اجرا شد. هر کرت شامل شش خط سه متری به فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۳۵۰ بذر در مترمربع بود. طبق آزمایش

کارایی مصرف نور اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک به شرح زیر اقدام شد. تمامی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان انجام شد.

برای انجام یادداشت‌برداری‌ها، از هر ژنوتیپ در هر تکرار ۱۰ بوته به صورت تصادفی با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای انتخاب شدند. در هر کرت، صفت عملکرد دانه، به همراه صفات فیزیولوژیک محتوای رطوبت نسبی برگ، کلروفیل a و b، کلروفیل کل، کاروتنوئید، شاخص سبزی‌نگی، پروتئین برگ و

جدول ۲- مشخصات خاک مزرعه تحقیقاتی در عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری، میانگین بارش و دمای ماهیانه طی دو سال زراعی

Table 2- Soil characteristics of the research field at a depth of 0 to 60 cm, average monthly rainfall and temperature during two crop years

آهن Iron (ppm)	کربن آلی Organic carbon(%)	نیتروژن کل Total N (%)	پتاسیم قابل جذب Available K (ppm)	فسفر قابل جذب Available P(ppm)	هدایت الکتریکی Ec×10 ³	اسیدیته خاک pH	خصوصیت Character						
2.8	1.17	0.16	230	5.8	1.28	7.85	میزان Value						
شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بور Boron (ppm)	مس Copper (ppm)	روی Zinc (ppm)	منگنز Manganese (ppm)	خصوصیت Character						
35	38	27	0.6	0.50	0.73	6.5	میزان Value						
شهریور September	مرداد August	تیر July	اردیبهشت June	خرداد May	فروردین April	اسفند March	بهمن February	دی January	آذر December	آبان November	مهر October	سال زراعی Crop year	
0.0	0.0	0.0	7.1	181.7	57.8	53.8	68.2	34.6	56.2	7.7	0.0	بارش (mm) Rainfall	۱۳۹۶-۱۳۹۷
26.1	29.1	28.9	23.7	16.5	14.5	8.4	3.8	6.5	6.3	14.6	18.8	دما (°C) Temperature	2017-2018
0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	283.5	63.6	103.2	82.1	109.1	135.6	12.3	بارش (mm) Rainfall	۱۳۹۷-۱۳۹۸
26.3	29.6	28.6	24.7	16.4	11.6	7.0	6.2	5.9	8.6	13.2	20.6	دما (°C) Temperature	2018-2019

بلو G250 موجود در معرف اسیدی به مولکول پروتئین بود. برای اندازه‌گیری غلظت پروتئین، ۲۰ میکرولیتر عصاره استخراج شده را در ۸۰ میکرولیتر بافر استخراج رقیق و پنج میلی‌لیتر معرف کوماکسی بلو تازه به آن افزوده و دو دقیقه به هم زده شد. پس از پنج دقیقه، میزان جذب نوری آن در طول موج ۵۹۵ نانومتر توسط دستگاه الیزا قرائت شد و از بافر استخراج به‌عنوان شاهد استفاده شد. غلظت پروتئین محلول در نمونه با توجه به جذب نمونه و با استفاده از منحنی استاندارد به دست آمد و محتوی پروتئین محلول محاسبه گردید.

برای اندازه‌گیری محتوی کلروفیل و کاروتنوئیدها از روش (Lichtenthaler and Wellburn, 1983) استفاده شد. به‌منظور اندازه‌گیری کارایی مصرف نور نیز میزان تابش دریافتی به‌وسیله دستگاه تابش‌سنج (مدل SF-80T) مجهز به حس‌گر

پس از پر شدن دانه شاخص سبزی‌نگی اندازه‌گیری شد. برای این منظور از هر کرت ۱۰ بوته انتخاب شده و قرائت اسپد (مدل Spad-502) از سه نقطه برگ پرچم در اول صبح انجام گرفت. از اعداد به‌دست‌آمده از هر کرت میانگین گرفته شد و عدد حاصل برای آن کرت در نظر گرفته شد.

همچنین برای اندازه‌گیری پروتئین، ابتدا ۰/۵ گرم نمونه برگ در نیتروژن مایع کاملاً خرد شد. سپس دو میلی‌لیتر محلول بافر تریس اسیدکلریدریک به آن اضافه و در داخل هاون چینی کاملاً هم‌وزنیزه شد. فازهای مخلوط حاصل در لوله اپیندورف و به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه توسط سانتریفیوژ جداسازی و پس از آن فاز بالایی جهت قرائت محتوی پروتئین محلول جدا شد (Reddy et al., 2004). مبنای روش اندازه‌گیری پروتئین اتصال رنگ کوماکسی بریانت

نسبی برگ در شرایط تنش در مورد گندم وجود دارد (Rahmati et al., 2018; Asadi et al., 2020). اما در مورد کلروفیل b تاثیرپذیری آن به محیط بیشتر ناشی از تاثیر تنش بر این صفت است بر همین اساس در شرایط تنش برای گندم گزارش شده است که میزان کلروفیل a کاهش و میزان کلروفیل b افزایش دارد (Amiri et al., 2013) و نتیجه‌گیری بدست آمده از این تحقیق نیز ممکن است ناشی از این پدیده باشد.

همبستگی فنوتیپی صفات

نتایج همبستگی فنوتیپی صفات نشان داد که تمام خصوصیات فیزیولوژیک با عملکرد رابطه مثبت داشتند که در بین هشت صفت مورد بررسی رابطه‌ی سه صفت کلروفیل a، کلروفیل کل و شاخص سبزی‌نگی با عملکرد دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود، اما پنج صفت دیگر رابطه معنی‌دار نداشتند (جدول ۴). بررسی همبستگی عملکرد دانه گندم با صفات مختلف در شرایط متفاوت محیطی، می‌تواند تا حدودی به درک روابط بین صفات با عملکرد کمک نماید (Afiuni and Mahlouji, 2006). به عبارتی، کارایی انتخاب برای عملکرد دانه را می‌توان با گزینش صفات فیزیولوژیک که ارتباط مستقیم و مثبتی با عملکرد دانه دارند و سریع و آسان نیز اندازه‌گیری می‌شوند، افزایش داد (Najafi et al., 2022). مطابق با نتیجه این تحقیق در گندم بهاره نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار میزان کلروفیل با عملکرد دانه گزارش شده و بیان شده است که کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش و در ادامه کاهش میزان فتوسنتز سبب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Naghavi et al., 2016)، بنابراین میزان سبزی‌نگی گیاه با عملکرد در ارتباط است. در شرایط دیم میزان کاروتنوئید سبب کاهش اثر تنش رطوبتی می‌شود (Feiziasl et al., 2019)، به نظر می‌رسد کاهش میزان کاروتنوئید به‌عنوان سازوکاری برای مقابله با تنش می‌باشد (Sadegzadeh et al., 2014). نتایج تحقیقات در تربیت‌کاله نشان داد که همبستگی منفی و معنی‌دار میزان کاروتنوئید با عملکرد در شرایط تنش وجود داشت (Saed-Moucheshi et al., 2019)، اما از طرف دیگر در گندم دروم گزارش شد که تنش خشکی سبب کاهش میزان کاروتنوئید و در ادامه عملکرد دانه می‌شود (Pour-Aboughadareh et al.,

یک متری در بالا و پایین سایه‌انداز گیاهی در مرحله شیری شدن و رسیدگی دانه اندازه‌گیری شد (Slafer and Savin, 1994)، سپس درصد جذب تابش^۱ (Fischer, 2001) و ضریب خاموشی نور^۲ (Ezzat Ahmadi et al., 2012) محاسبه شد.

در نهایت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها شامل همبستگی فنوتیپی صفات، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه علیت با نرم‌افزارهای SPSS 18، Minitab 16 و Path2 انجام شد.

نتایج و بحث

برآورد اجزاء واریانس

نتایج تجزیه واریانس و برآورد اجزاء واریانس ژنتیکی و محیطی نشان داد (جدول ۳) که در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی برای تمام صفات به استثناء عملکرد دانه و کلروفیل b اختلاف معنی‌دار وجود داشت و سهم واریانس ژنتیکی برای تمام صفات به استثناء عملکرد دانه، کلروفیل b و محتوای آب نسبی بسیار بیشتر از واریانس محیطی بود. بنابراین می‌توان بیان داشت که در بین ژنوتیپ‌ها برای صفات دارای اختلاف معنی‌دار پتانسیل ژنتیکی متفاوتی در شرایط دیم وجود داشت، مطابق این نتیجه‌گیری در بین ۲۵ ژنوتیپ گندم دوروم برای تمام صفات به جزء عملکرد دانه تنوع معنی‌دار گزارش شد و نتیجه گیری شد که در شرایط دیم لاین‌های مورد بررسی واکنش متفاوتی داشتند (Alvandi et al., 2015).

بالا بودن سهم واریانس ژنتیکی از واریانس فنوتیپی برای اکثر صفات مورد بررسی در بین ژنوتیپ‌ها بیانگر تاثیر پتانسیل ژنتیکی متفاوت ژنوتیپ‌ها برای صفات در شرایط تنش است. بر همین اساس گزارش شده است که به جز صفت عملکرد دانه بیشتر صفات در گندم دارای سهم واریانس ژنتیکی بالایی هستند و نشان دهنده سهم و تاثیر بیشتر ژنتیک بر این صفات در شرایط تنش است (Bavandpouri, 2022).

برای صفات آب نسبی برگ، عملکرد و کلروفیل b تاثیر محیط بیشتر بود، برای دو صفت عملکرد و میزان آب نسبی برگ این نتیجه‌گیری طبیعی به نظر می‌رسد زیرا گزارشات متعدد در زمینه‌ی تاثیر محیط بر عملکرد دانه و همچنین آب

² - Light Extinction Coefficient

¹- Intercepted Radiation

شامل می‌شود و ثبات پروتئینی تحت شرایط دیم به مفهوم حفظ فعالیت‌های آنزیمی برگ در این شرایط است (Siosemardeh *et al.*, 2013)، بنابراین حفظ محتوای پروتئین در شرایط دیم در گیاه بیانگر توان فتوسنتزی مناسب در این شرایط است (Rahmati and Nakhzari Moghadam, 2024) که منجر به جلوگیری از کاهش عملکرد می‌شود. مطابق با نتایج این تحقیق رابطه مثبت غیر معنی‌دار بین پروتئین برگ و عملکرد در شرایط تنش در گندم نان گزارش شده است (Bavandpouri, 2022).

2020) که مطابق با نتایج این تحقیق بود. علاوه بر این تحت شرایط دیم که میزان آب قابل دسترس محدود است، محتوای رطوبت نسبی برگ می‌تواند توانمندی گیاه در مواجهه با تنش خشکی را نشان دهد (Baghbankhalilabad *et al.*, 2019)، بر همین اساس حفظ محتوای نسبی رطوبت برگ سبب جلوگیری از کاهش عملکرد خواهد شد. در هر حال مطابق با نتایج این تحقیق وجود رابطه مثبت بین محتوای آب نسبی برگ با عملکرد دانه در گندم تحت شرایط تنش گزارش شده است (Bavandpouri, 2022). محتوای پروتئین محلول برگ تمام ترکیبات آنزیمی را نیز

جدول ۳- تجزیه واریانس و برآورد اجزاء واریانس صفات مورد بررسی گندم دوروم در شرایط دیم

Table 3- Variance analysis and estimation of variance components of durum wheat traits of under rainfed conditions

منابع تغییرت و اجزای واریانس Variation sources and components	درجه آزادی Degree of freedom	عملکرد دانه Seed yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	کارایی مصرف نور Light use efficiency	پروتئین برگ Leaf protein	شاخص سبزیبگی Vegetation index	محتوای آب نسبی Relative water content
تکرار Replication	2	895.5 ^{ns}	0.172 [*]	0.034 ^{ns}	0.313 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.001 ^{ns}	3.91 ^{ns}	85.69 ^{ns}
ژنوتیپ Genotype	9	1441 ^{ns}	1.415 [*]	0.210 ^{ns}	2.447 ^{**}	0.674 ^{**}	0.116 ^{**}	0.688 ^{**}	33.39 ^{**}	44.85 ^{**}
خطا Error	18	1380	0.124	0.110	0.219	0.073	0.014	0.088	8.13	18.94
درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation percentage		20.40	6.44	3.86	17.00	4.22	10.08	9.56	4.55	6.24
واریانس فنوتیپی Phenotypic variance		1400	0.554	0.143	0.962	0.273	0.048	0.288	16.55	27.58
واریانس محیطی Environmental variance		1380	0.124	0.110	0.219	0.073	0.014	0.088	8.13	18.94
واریانس ژنتیکی Genetical variance		20.34	0.430	0.033	0.743	0.200	0.034	0.2	8.42	8.64
درصد واریانس محیطی Environmental variance percentage		98.55	22.37	76.74	22.77	26.71	29.17	30.56	49.14	68.68
درصد واریانس ژنتیکی Genetical variance percentage		1.45	77.63	23.26	77.23	73.29	70.83	69.44	50.87	31.32

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد؛ * معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ ^{ns} اختلاف غیر معنی‌دار

** Significant at 1% level; * Significant at 5% level; ^{ns} Non-significant difference

نسبی برگ، پروتئین برگ و شاخص سبزیبگی معنی‌دار نبود و در دیگر موارد در سطح یک یا پنج درصد معنی‌دار شد. مطابق با این نتیجه گیری در گندم بهاره نیز همبستگی بالا و معنی‌دار بین صفات فیزیولوژیک گزارش شده است (Mohammadi *et al.*

از طرف دیگر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مورد بررسی باهم دیگر رابطه مثبت نشان دادند که این ارتباط تنها برای صفت محتوای آب نسبی برگ با کارایی مصرف نور و پروتئین برگ و همچنین کلروفیل a با سه صفت محتوای آب

مورد ارزیابی بود و تغییر در این خصوصیات سبب تغییرات عملکرد در شرایط دیم می‌باشد. (al., 2013). با توجه به بررسی همبستگی صفات فیزیولوژیکی می‌توان بیان داشت که عملکرد تحت تأثیر تمام خصوصیات

جدول ۴- ضریب همبستگی فنوتیپی صفات مورد بررسی با روش پیرسن

Table 4- Phenotypic correlation coefficient of investigated traits by Pearson's method

صفات Traits	عملکرد دانه Seed yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	کارایی مصرف نور Light use efficiency	پروتئین برگ Leaf protein	محتوای آب نسبی Relative water content
کلروفیل a Chlorophyll a	0.721*							
کلروفیل b Chlorophyll b	0.511	0.754*						
کلروفیل کل Total Chlorophyll	0.698*	0.981**	0.866**					
کاروتنوئید Carotenoid	0.596	0.755*	0.925**	0.845**				
کارایی مصرف نور Light use efficiency	0.624	0.679*	0.874**	0.772**	0.925**			
پروتئین برگ Leaf protein	0.361	0.576	0.825**	0.680*	0.782**	0.857**		
محتوای آب نسبی Relative water content	0.574	0.581	0.779**	0.670*	0.742*	0.589	0.433	
شاخص سبزی‌نگی Vegetation index	0.651*	0.577	0.676*	0.637*	0.657*	0.636*	0.684*	0.677*

* همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار (دو طرفه)

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار (دو طرفه)

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

محتوای آب نسبی برگ، شاخص سبزی‌نگی و پروتئین برگ بیشترین رابطه با عملکرد دانه را داشتند و صفات کارایی مصرف نور، کاروتنوئید، کلروفیل a، b و کلروفیل کل دارای رابطه کمتری با عملکرد بودند، هرچند تمام صفات بر اساس مؤلفه اول با عملکرد همسو بودند. در مقابل بر اساس مؤلفه دوم صفات محتوای آب نسبی برگ، شاخص سبزی‌نگی، کلروفیل a و کلروفیل کل بیشترین رابطه با عملکرد دانه را داشتند و صفات کلروفیل b، کاروتنوئید، کارایی مصرف نور و پروتئین برگ رابطه کمتری با عملکرد دانه داشتند و دارای یک روند جداگانه بودند، یا به عبارتی با عملکرد دانه همسو نبودند. اما در مجموع با توجه به نمودار مشاهده شد که صفات کلروفیل کل و کلروفیل a در یک گروه قرار داشتند و بر اساس هر دو مؤلفه مقادیر ویژه مثبت

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

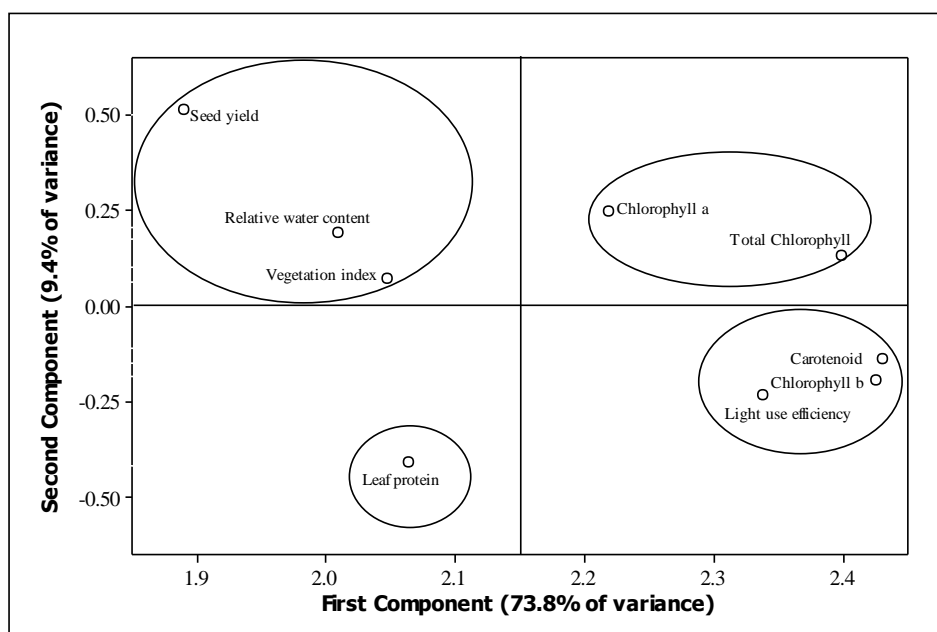
بر اساس تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای صفات مورد بررسی در بین ۱۰ ژنوتیپ مورد مطالعه دو مؤلفه استخراج شد که مؤلفه اول ۷۳/۸ درصد و مؤلفه دوم ۹/۴ درصد از واریانس را توجیه نمودند و در مجموع با دو مؤلفه اول، ۸۳/۲ درصد از واریانس کل توجیه شد. بیان درصد بالای از واریانس با دو مؤلفه اول نشانگر ارتباط صفات با همدیگر یا به عبارتی همسو بودن تغییرات صفات می‌باشد، که این نتیجه‌گیری تأییدی بر نتایج همبستگی صفات بود.

با توجه به اینکه هدف از این تجزیه بررسی رابطه صفات با عملکرد بود، تنها نمودار پراکنشی صفات بر اساس دو مؤلفه در شکل ۱ ارائه شد و مشاهده شد که بر اساس مؤلفه اول صفات

کارایی مصرف نور با محتوای آب نسبی برگ نیز در ارتباط است و در شرایط تنش کم شدن محتوای آب نسبی برگ موجب تأثیر منفی بر کارایی مصرف نور می‌شود (*Rahimi et al., 2019*). محتوای آب نسبی برگ تحت تأثیر اثر افزایشی ژن‌ها بوده و وراثت‌پذیری خصوصی بالایی دارد که می‌توان بازده ژنتیکی نسبتاً بالایی برای بهبود این صفت در شرایط دیم انتظار داشت (*Maleky et al., 2019*). این صفت بیشتر سبب افزایش فتوسنتز و تعرق بیشتر گیاه می‌شود (*Chandrasekar et al., 2000*) و به‌عنوان شاخصی مهم در تعیین وضعیت آبی گیاه و شناسایی ارقام متحمل به تنش خشکی (*Rezaie et al., 2020*) در جهت بهبود عملکرد دانه مؤثر است که مطابق با نتایج این تحقیق است. علاوه بر این نتایج تحقیقات نشان داده است که تحت شرایط دیم، افزایش پرولین با کاهش میزان پروتئین کل به‌منظور سنتز و تجمع بیشتر پرولین به هنگام تنش همراه است (*Ghaderi et al., 2021*). از طرف دیگر نقش فعال کاروتنوئیدها در دفاع آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش خشکی سبب می‌شود که در این شرایط به دلیل کم کردن گونه‌های فعال اکسیژن، میزان کاروتنوئید کاهش یابد (*Samsami et al., 2020*) که در مجموع این کاهش در میزان کاروتنوئید و پروتئین محلول در جهت ثبات و پایداری عملکرد دانه می‌باشد.

داشتند، از طرف دیگر صفات کلروفیل b، کاروتنوئید و کارایی مصرف نور با داشتن مقادیر ویژه مثبت برای مولفه اول و مقادیر ویژه منفی برای مولفه دوم در یک قسمت از نمودار قرار گرفتند و صفت پروتئین برگ با داشتن مقادیر ویژه منفی برای هر دو مولفه به تنهایی در یک گروه قرار گرفت و در نهایت بر اساس دو مؤلفه اول صفات شاخص سبزی‌نگی و محتوای آب نسبی برگ بیشترین رابطه با عملکرد دانه را داشتند و در یک گروه قرار گرفتند (شکل ۱).

محتوای سبزی‌نگی برگ‌ها یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک می‌باشد که کاهش آن به دلیل تخریب ساختمان کلروفیل در شرایط تنش خشکی است (*Ghosh, 2004*). کاهش محتوای کلروفیل در تنش خشکی به دلیل کم شدن عوامل لازم برای سنتز کلروفیل و تخریب ساختمان آن می‌باشد، بدین معنی که کاتابولیسم کلروفیل در شرایط تنش خشکی افزایش می‌یابد که علت عمده آن علاوه بر موارد ذکر شده می‌توان به دلیل پیری زودرس برگ‌ها در اثر اختلال هورمونی ناشی از تنش خشکی باشد (*Moradgholi et al., 2023*). در هر حال کاهش محتوای کلروفیل و به دنبال آن کم شدن شاخص سبزی‌نگی در گیاه منجر به کم شدن فعالیت فتوسنتزی و کاهش میزان کارایی مصرف نور شده و در نتیجه عملکرد نیز کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات نشان داده که میزان



شکل ۱- بای‌پلات پراکنش صفات بر اساس دو مؤلفه اول حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی صفات مورد بررسی در ۱۰ ژنوتیپ گندم دوروم

Figure 1- Traits scatter plot for the first two components resulting from principal component analysis of the investigated traits in 10 durum wheat genotypes

تجزیه علیت

نتایج تجزیه علیت تأثیر صفات فیزیولوژیکی مورد بررسی بر عملکرد دانه در جدول ۵ و نمودار حاصل با حذف اثرات مستقیم و غیر مستقیم ضعیف در شکل ۲ ارائه شده است. در بین ۸ صفت مورد بررسی، دو صفت کارایی مصرف نور و کلروفیل کل، به ترتیب با میزان اثرات مستقیم ۱/۳۹۲ و ۰/۷۷۲ دارای بیشترین تأثیر مثبت بر عملکرد دانه بودند. فتوسنتز نیروی محرکه اصلی است که بر توزیع ماده خشک و تشکیل اندام تأثیر می‌گذارد، در واقع اساس تولید گیاه و عامل اصلی تعیین‌کننده عملکرد محصول است (Dong et al., 2019) که میزان کلروفیل و کارایی مصرف نور دو عامل مهم و تأثیرگذار بر فتوسنتز می‌باشد. نتایج تحقیقات نشان داد که میزان نور جذب‌شده توسط گندم با عملکرد زیست‌توده هوایی دارای رابطه خطی بود، همچنین بیان‌شده که بین کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نور رابطه خطی وجود دارد، به عبارتی با افزایش کارایی مصرف آب در گندم کارایی مصرف نور نیز افزایش می‌یابد (Kukul and Irmak, 2020).

در مقابل صفات پروتئین برگ و کلروفیل b به ترتیب با میزان اثرات مستقیم ۰/۶۴۶- و ۰/۸۸۴- بیشترین تأثیر منفی بر عملکرد دانه داشتند. گزارش شده که سطح تنش در افزایش یا کاهش پروتئین‌های محلول مؤثر است و با افزایش شدت تنش میزان پروتئین‌های محلول افزایش می‌یابد. همچنین ارقام مقاوم به تنش در شرایط تنش بالا نیز کاهش کمتری در پروتئین‌های محلول نشان می‌دهند (Ghaderi et al., 2021)؛ اما به نظر می‌رسد در شرایط این تحقیق پروتئین‌های محلول در بین ارقام با عملکرد بیشتر روند کاهشی داشته و سبب ارتباط منفی عملکرد با پروتئین‌های محلول شده است؛ اما از طرف دیگر مشاهده شد که پروتئین محلول از طریق کارایی مصرف نور تأثیر غیر مستقیم بالایی بر عملکرد دارند. به نظر می‌رسد در شرایط دیم افزایش سیستم‌های آنزیمی و پروتئین‌های درگیر در فتوسنتز سبب افزایش کارایی مصرف نور می‌شود (منبع) که منجر به افزایش عملکرد می‌گردد.

در مورد کلروفیل b هر چند اثر مستقیم منفی بر عملکرد داشت، اما از طریق کلروفیل کل و کارایی مصرف نور اثر غیر مستقیم مثبت بالا بر عملکرد نشان داد و این مسئله سبب شد که مجموع اثرات مستقیم و غیر مستقیم این صفت مثبت شود و همبستگی مثبت بالایی با عملکرد نشان دهد. مهم‌ترین دلیل این نتیجه‌گیری به تغییرات دو نوع کلروفیل a و b تحت شرایط تنش خشکی مرتبط است، زیرا گزارش شده است که کلروفیل

b در شرایط تنش ملایم روند افزایشی دارد (Amiri et al., 2013)، اما در مقابل کلروفیل a دارای روند کاهشی است (Hassanpour Lescokelaye et al., 2015). در مواردی نیز بیان شده است که تنش خشکی کوتاه‌مدت در گندم باعث توقف کامل فتوسنتز و افزایش نسبت کلروفیل a/b می‌شود ولی اثری بر محتوای کلروفیل برگ ندارد (Abdoli et al., 2013). در ارتباط با کاهش کلروفیل a در اثر تنش خشکی، بیان شده است که تولید رادیکال‌های اکسیژن افزایش یافته و این رادیکال‌های آزاد باعث پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه‌ی این رنگیزه می‌شوند (Amiri et al., 2013). در مجموع بیان شده است که کاهش کلروفیل در شرایط تنش خشکی می‌تواند جنبه سازشی داشته باشد زیرا کاهش کلروفیل سبب کاهش الکترون برانگیخته طی فتوسنتز شده و خسارت‌های ناشی از تشکیل رادیکال‌های آزاد اکسیژن کم می‌شود (Kraner et al., 2002).

کمترین تأثیر مستقیم نیز به کلروفیل a با میزان اثر مستقیم ۰/۰۶۵ اختصاص داشت. در هر حال در گزارش‌های متعدد کاهش میزان کلروفیل a بر اثر تنش خشکی گزارش شده است (Baghbankhalilabad et al., 2019; Abdoli et al., 2013; Siosemardeh et al., 2013). از طرف دیگر مشاهده شد که کلروفیل a و کاروتنوئید از طریق دو صفت کلروفیل کل و کارایی مصرف نور دارای تأثیر غیر مستقیم مثبت بر عملکرد بودند و از طریق کلروفیل b نیز تأثیر غیر مستقیم منفی بر عملکرد داشتند. کاروتنوئیدها به‌طور غیر مستقیم تولید گونه‌های اکسیژن را کاهش می‌دهند (Groppa and Benavides, 2008) و به‌طور کلی، کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی می‌تواند به دلیل تخریب ساختمان کلروپلاست و دستگاه فتوسنتزی، فتواکسیداسیون و واکنش آن‌ها با گونه‌های فعال اکسیژن باشد (Neocleous and Nasilakakis, 2007). کاروتنوئیدها می‌توانند انرژی را به کلروفیل a منتقل کرده و دامنه طول موج‌های مؤثر برای فتوسنتز را افزایش دهند (Colasuonno et al., 2017) و بر همین اساس نقش مهمی در فتوسنتز و افزایش عملکرد دارند. محتوای آب نسبی برگ نیز از طریق کارایی مصرف نور تأثیر غیر مستقیم مثبت و از طریق کلروفیل b تأثیر غیر مستقیم منفی بر عملکرد دانه داشت و در نهایت شاخص سبزیگی از طریق کارایی مصرف نور دارای تأثیر غیر مستقیم مثبت بر عملکرد بود. کارایی مصرف نور بیانگر کارایی در انتقال و ذخیره‌ی مواد فتوسنتزی به اندام‌های هوایی و تولید ماده خشک

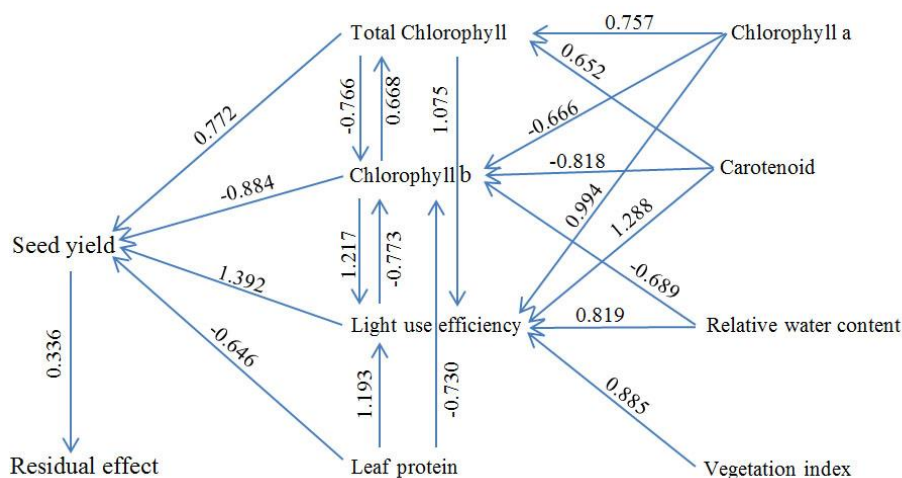
کل است که از یک واحد تابش است که تحت تأثیر شاخص سطح برگ، سرعت رشد و آرایش مناسب و یکنواخت برگ است (Rezvani et al., 2014)، نتایج تحقیقات نشان داده است که تنش رطوبتی از عوامل مؤثر بر کارایی مصرف نور است (Ezzat

کل است که از یک واحد تابش است که تحت تأثیر شاخص سطح برگ، سرعت رشد و آرایش مناسب و یکنواخت برگ است (Rezvani et al., 2014)، نتایج تحقیقات نشان داده است که تنش رطوبتی از عوامل مؤثر بر کارایی مصرف نور است (Ezzat

جدول ۵- اثرات مستقیم (اعداد روی قطر)، غیر مستقیم و اثرات کل صفات فیزیولوژیک بر عملکرد دانه گندم دوروم

Table 5- Direct (numbers on diameter), indirect and total effects of physiological traits on durum wheat seed yield

صفات Traits	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	کارایی مصرف نور Light use efficiency	پروتئین برگ Leaf protein	محتوای آب نسبی Relative water content	شاخص سبزیگی Vegetation index
کلروفیل a Chlorophyll a	0.065	0.049	0.064	0.049	0.044	0.037	0.038	0.037
کلروفیل b Chlorophyll b	-0.666	-0.884	-0.766	-0.818	-0.773	-0.730	-0.689	-0.598
کلروفیل کل Total Chlorophyll	0.757	0.668	0.772	0.652	0.596	0.524	0.517	0.491
کاروتنوئید Carotenoid	-0.453	-0.554	-0.507	-0.599	-0.555	-0.469	-0.445	-0.394
کارایی مصرف نور Light use efficiency	0.944	1.217	1.075	1.288	1.392	1.193	0.819	0.885
پروتئین برگ Leaf protein	-0.372	-0.533	-0.439	-0.505	-0.553	-0.646	-0.280	-0.442
محتوای آب نسبی Relative water content	0.170	0.229	0.197	0.218	0.173	0.127	0.294	0.199
شاخص سبزیگی Vegetation index	0.272	0.319	0.300	0.310	0.300	0.323	0.319	0.472
اثر کل Total effects	0.721	0.511	0.698	0.596	0.624	0.361	0.574	0.651
اثر باقیمانده Residual effect	0.336							



شکل ۲- نمودار تجزیه علیت صفات فیزیولوژیک مؤثر بر عملکرد دانه گندم دوروم

Figure 2- Path analysis diagram of effective physiologic triats on seed yield of durum wheat

نتیجه‌گیری کلی

سبزی‌نگی، پروتئین برگ و محتوای آب نسبی برگ نیز با بالا بردن کارایی مصرف نور موجب افزایش عملکرد شدند. تمام صفات از طریق تأثیر غیر مستقیم منفی بر کلروفیل b باعث افزایش عملکرد بودند. بر این اساس دو صفت کلروفیل کل و کارایی مصرف نور در بین صفات مورد بررسی، تأثیر بیشتری بر افزایش عملکرد گندم دوروم در شرایط دیم داشتند و انجام برنامه‌های اصلاحی برای این دو صفت مفید می‌باشد.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان بیان داشت که تمام خصوصیات فیزیولوژیک مورد بررسی تحت شرایط دیم بر روی عملکرد گندم دوروم یا به‌صورت مستقیم یا غیر مستقیم مؤثر بودند که در این بین صفات کلروفیل کل و کارایی مصرف نور مستقیماً بیشترین تأثیر مثبت بر عملکرد را داشتند. رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی نیز از طریق دو صفت کلروفیل کل و کارایی مصرف نور سبب افزایش عملکرد شدند. شاخص

References

- Abdoli, M., Saeidi, M., Jalali-Honarmand, S., Mansourifar, S. and Eghbal-Ghobadi, M., 2013. Evaluation of some physiological and biochemical traits and their relationships with yield and its components in some improved wheat cultivars under post-anthesis water deficit. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 6(1), pp.47-63. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2013.137>
- Afiuni, D. and Mahlouji, M., 2006. Correlation analysis of some agronomic traits in Wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under salinity stress. *Seed and Plant*, 22(2), pp.186-197. [In Persian].
- Ahmadi, Gh., 2021. Relationship between developmental traits and grain yield in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under terminal drought stress condition. *Applied Research in Field Crops*, 33(4), pp.84-107. [In Persian].
- Alvandi, R., Mohammadi, R. and Shooshtari, L., 2015. Genetic diversity of durum wheat genotypes using agronomic characteristics and molecular markers, *Seed and Plant Journal*, 31(3), pp.441-458. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/spij.2017.111269>
- Amiri, R., Bahraminejad, S. and Sasani, S., 2013. Evaluation of genetic diversity of bread wheat genotypes based on physiological traits in non-stress and terminal drought stress conditions. *Cereal Research*, 2(4), pp.289-305. [In Persian].
- Asadi, A., Askary Kelestani, A.R., Mirfakhraei, R., Abasi, A. and Khodadadi, M., 2018. Genetic variation of bread wheat genotypes for some important physiological traits under chilling stress, *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(1), pp.171-183. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2017.195.1049>
- Asadi, A.A. and Hatami, A., 2021. Effect of Water Deficit Stress on Physiological Characteristics in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Process and Function*, 10(41), pp.115-128. [In Persian].
- Asadi, A.A., Valizadeh, M., Mohammadi, S.A. and Khodarahmi, M., 2020. Genetic analysis of response to water deficit stress based on physiological traits in Wheat. *Plant Genetic Researches*, 6 (2), pp.1-20. <https://doi.org/10.29252/pgr.6.2.1>
- Baghbankhalilabad, S., Khazaei, H.R. and Kafi, M., 2019. Effect of deficit irrigation on kernel yield, yield components and some physiological traits of different varieties of bread wheat and durum wheat. *Applied Field Crops Research*, 32(1), pp.1-12. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/aj.2018.116367.1220>

- Bavandpouri, F., 2022. Association mapping of in vitro and In vivo indicators of drought tolerance in bread wheat. Ph. D. Thesis. Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran, 429 P. [In Persian].
- Chandrasekar, V., Sairam, R.K. and Srivastava, G.C., 2000. Physiological and biochemical responses of hexaploid and tetraploid wheat to drought stress. *Agronomy & Crop Science*, 185, pp.219-227. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00430.x>
- Colasuonno, P., Lozito, M.L., Marcotuli, L., Nigro, D., Giancaspro, A., Mangini, G., Vita, P.D., Mastrangelo, A. M., Pecchioni, N., Houston, K., Simeone, R., Gadaleta, A. and Blanco, A., 2017. The carotenoid biosynthetic and catabolic genes in wheat and their association with yellow pigments. *BMC Genomics*, 18, 122. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3395-6>
- Dong, H., Zhang, X., Li, J., Zhang, C., Wei, T., Yang, Z., Cai, T., Zhang, P., Ding, R. and Jia, Z., 2019. Photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to fertilizer, precipitation, and soil water storage before sowing under the ridge and furrow system: A path analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 272–273, pp.12-19. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.015>
- Ezzat Ahmadi, M., Nourmohammadi, Gh., Ghodsi, M. and Kafi, M., 2012. Evaluation of Water and Radiation Use Efficiencies of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes under Different Moisture and Photosynthetic Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 10(1), pp.225-239. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v10i1.14512>
- Feiziasl, V., Fotovat, A., Astarai, A., Lakzian, A. and Jafarzadeh, J., 2019. Determination of Chlorophyll Content and Nitrogen Status Using SPAD in Dryland Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 17(2), pp.221-240. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v17i2.68973>
- Fischer, R.A., 2001. Selection traits for improving yield potential. In: Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio J.I., McNab, A., (eds). *Application physiology in wheat breeding* (pp. 148–159). CIMMYT, Mexico, D.F.
- Ghaderi, A., Jahanbakhsh Godehkahriz, S. and Raeisi sadati S.Y., 2021. Study of total protein content, soluble sugar, proline content and P5CS gene expression in leaves of three wheat cultivars under drought stress. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 12(4), pp.125-144. [In Persian].
- Ghosh, P.K., 2004. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India. *Field Crops Research*, 88(2-3), pp.227–237. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.015>
- Groppa, M.D. and Benavides, M.P., 2008. Polyamines and abiotic stress: recent advances. *Amino Acids*, 34, pp.35-45. <https://doi.org/10.1007/s00726-007-0501-8>
- Hakimipoor, A. and Mostafavi, Kh., 2011. Evaluation of yield relationships and grain yield components in bread wheat using path analysis. *Journal of Plant Production Sciences*, 1(1), pp.25-28. [In Persian].
- Hassanpour Lescokelaye, K., Ahmadi, J., Daneshyan, J. and Hatami, S., 2015. Changes in Chlorophyll, Protein and Antioxidant Enzymes on Durum Wheat under Drought Stress. *Journal of Crop Breeding*, 7(15), pp.76-87. [In Persian].

- Jafarian, T. and Maghsoudi Maud, A.A., 2015. Wheat leaf rolling under drought stress and its effect on yield and yield components, *Journal of Crop Production*, 8(2), pp.117-132. [In Persian].
- Jaleel, C.A., Manhvannan, P., Kishorekumar, A., Sankar, B., Gopi, R., Somasundaram, R. and Panneerselvam, R., 2007. Alterations in osmasundaram, antioxidant enzymes and indole alkaloid levels in *Catharanthus roseus* exposed to water deficit. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 59, pp.150-157. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.05.001>
- Keshavarznia, R., Peyghambari, S.A. and Bihamta, M., 2017. The impact of seedling drought stress and recovery on chlorophyll fluorescence parameters and physiological characteristics of wheat. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(1), pp.39-45. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.202541.654065>
- Kilic, H. and Yagbasanlar, T., 2010. The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum durum* ssp. durum) cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca Journal*, 38(1), pp.164-170. <https://doi.org/10.15835/nbha3814274>
- Kranner, I., Beckett, R. P., Wornik, S., Zorn, M., & Pfeifhofer, H. W. (2002). Revival of a resurrection plant correlates with its antioxidant status. *The Plant Journal*, 31, 13–24. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2002.01329.x>
- Kukul, M.S. and Irmak, S., 2020. Interrelationships between water use efficiency and light use efficiency in four row crop canopies. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1), e20110. <https://doi.org/10.1002/agg2.20110>
- Lichtenthaler, H. and Wellburn, A.R., 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, pp.591-592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
- Lizana, C., Wentworth, M. and Martinez, J.P., 2006. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. I.Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 57, pp.685–697. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj062>
- Maleky, AA., Saba J. and Shekary F., 2009. Inheritance of leaf relative water content in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed conditions. *Journal of Agricultural Knowledge*, 19(2), pp.177-183. [In Persian]
- Mohammadi, M., Mirfakhraei, R. and Abbasi, A., 2013. Study of genetic variation on response to spring cold stress in iranian bread wheat cultivars using multivariate statistical methods. *Journal of Crop Production*, 6(2), pp.149-166. [In Persian]. <https://doi.org/10.1001.1.2008739.1392.6.2.9.7>
- Mohammadi, R. and Haghparast, R., 2022. Review; Durum wheat: production, nutritional value and economic importance. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 1(3), pp.414-445. [In Persian]. <https://doi.org/10.22126/cbb.2022.8385.1021>
- Mohammadi, R., Daryaei, A., & Rajabi, R. (2010). Study of agro-physiological characteristics related to drought tolerance in advanced durum genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8(3), 403–414. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i3.7754>

- Mohammadi, S.S. and Prasanna, B., 2003. Analysis of genetic diversity in crop plants salient statistical tools and considerations. *Crop Science*, 43, pp.1235-1248. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1235>
- Moradgholi, A., Mobasser, H., Ganjali, H., Fanaie, H. and Mehraban, A., 2023. Improving the water use efficiency, greenness index, and wheat grain yield under various irrigation regions using biofertilizer. *Journal of Plant Production Sciences*, 13(1), pp.43-58. [In Persian]
- Naghavi, M.R., Moghaddam, M., Toorchi, M. and Shakiba, M.R., 2016. Evaluation of Spring Wheat cultivars for Physiological, morphological and agronomic traits under drought stress. *Journal of Crop Breeding*, 8(18), pp.64-77. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.8.18.64>
- Najafi, S., Mohammadi, R., Shooshtari, L., Etminan, A. and Mehrabi, A.M., 2022. Evaluation of morpho-physiological diversity of Durum Wheat genotypes using genotype \times trait biplot method. *Journal of Crop Breeding*, 14(44), pp.211-226. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.211>
- Neocleous, D. and Nasilakakis, M., 2007. Effects of NaCl stress on red raspberry (*Rubus idaeus* L. "Autumn Bliss"). *Scientia Horticulture*, 112, pp.282-289. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.025>
- Pour-Aboughadareh, A., Etminan, A., Abdelrahman, M.K., Siddique, H.M. and Phan Tran, L.S., 2020. Assessment of biochemical and physiological parameters of durum wheat genotypes at the seedling stage during polyethylene glycolinduced water stress. *Plant Growth Regulation*, 92, pp.81-93. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00621-4>
- Rahimi, Z., Hosseinpanahi, F. and Siosemardeh, A., 2019. Evaluation of yield, radiation and water use efficiency of drought resistant and susceptible Wheat cultivars under different irrigation levels. *Plant Production and Genetics*, 2(1), pp.19-34. [In Persian]
- Rahmati, H. and Nakhzari Moghadam, A., 2024. Evaluation of agronomic and physiological characteristics of durum wheat cultivars under rainfed and supplementary irrigation conditions. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 2(4), pp.446-467. [In Persian]. <https://doi.org/10.22126/cbb.2024.10445.1068>
- Rahmati, H., Nakhzari Moghadam, A., RahemiKarizaki, A. and Avarseji, Z., 2020. Evaluation of drought tolerance in Durum Wheat genotypes using drought tolerance indices. *Journal of Crop Breeding*, 12(33), pp.174-183. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.12.33.174>
- Rahmati, M., Ahmadi, A. and Hosseinpour, T., 2018. Study of genetic variability, heritability and relationship between grain yield and yield-related traits on bread wheat genotypes under dry land conditions. *Journal of Crop Breeding*, 10(25), pp.167-175. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jcb.10.25.167>
- Reddy, A.R., Chaitanya, K.V. and Vivekanandan, M., 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, 161, pp.1189-1202. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
- Rezaie, A., Bijanzadeh, E. and Behpouri, A., 2020. Evaluation of weed control on biochemical characteristics, relative water content, and grain yield of mixed cropping of Wheat cultivars *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(3), pp.297-308. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v18i3.85660>

- Rezvani, H., Asghari, J., Ehteshami, S.M.R. and Kamkar, B., 2014. Investigation of light use efficiency and light extinction coefficient of Wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in competition with wild Mustard (*Sinapis arvensis* L.) at Gorgan. *Journal of Plant Process and Function*, 3(8), pp. 97-110. [In Persian]
- Sadegzadeh, N., Hajiboland, R. and Sadegzadeh, B., 2014. Different physiological response to drought in bread and durum wheat genotypes. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 3(1), pp.21-32. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/idaj.2014.100526>
- Saed-Moucheshi, A., Razi, H., Dadkhodaie, A., Ghodsi, M. and Dastfal, M., 2019. Association of biochemical traits with grain yield in triticale genotypes under normal irrigation and drought stress conditions. *Australian Journal of Crop Science*, 13(02), pp.272-281. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.02.p1403>
- Samsami, S., Bazrafshan, F., Zare, M., Amiri, B. and Bahrani, A., 2020. Interaction Between Different Levels of Nitrogen Fertilizer and Drought Stress on Photosynthetic Pigments and Yield in Four Wheat Cultivars. *Journal of Plant Ecophysiology*, 12(43), pp.171-184. [In Persian]
- Shahbazi, H., Arzani, A. and Esmaelzadeh Moghadm, M., 2016. Effects of drought stress on physiological characteristics in Wheat recombinant inbred lines. *Plant Process and Function*, 5 (15), pp.123-132. [In Persian]
- Shirvani, F., Daneshvar, M., Mohammadi, R. and Ismaili, A., 2021. Evaluation of agro-physiological characteristics and drought tolerance in some of Durum Wheat breeding genotypes. *Journal of Crop Breeding*, 12(36), pp.117-135. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/jcb.12.36.117>
- Siosemardeh, A., khalvandi, M., Bahram nejad, B. and Roohi, E., 2013. Effect of water stress on gas exchanges, leaf soluble protein and chlorophyll content of Sardari Wheat ecotypes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 43(4), pp.573-588. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2013.29414>
- Slafer, G.A. and Savin, R., 1994. Sink-source relationships and grain mass at different positions within the spike in wheat. *Field Crops Research*, 37, pp.39-49. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90080-9)

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://cropscience.uoz.ac.ir/>

Research Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 157-178

The effect of nanosilicon and zinc nanooxide on the quantitative, qualitative, and water and zinc use efficiency of soybeans (*Glycine max* L.) under irrigation regimes

Heshmatollah Azizi ^a, Abbas Maleki ^{*b}, Mohammad Mirzaei Heydari ^c, Farzad Babaei ^b, Ali Hatami ^b

^a Ph.D Student, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Islamic Azad University of Ilam Branch, Ilam, Iran

^b Department of Agronomy and Plant Breeding, IL.C, Islamic Azad University, Ilam, Iran

^c Department of Agronomy and Plant Breeding, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

*Corresponding Author: maleki97@yahoo.com

Received: 10 December 2023

Accepted: 14 January 2024

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.429770.1383

How to cite this article:

Azizi, H., Maleki, A., Mirzaei Heydari, M., Babaei, F. and Hatami, A., 2025. The effect of nanosilicon and zinc nanooxide on the quantitative, qualitative and water and zinc use efficiency of soybeans (*Glycine max* L) under irrigation regimes. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 157-178. <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.429770.1383>

Abstract

Introduction: Soybean (*Glycine max* L.) is rich in nutrients and has vegetable proteins, dietary fiber, and minerals such as calcium, and its saturated fat content is also low. Soybean oil is one of the most important vegetable of the area arable land under cultivation in the world, among oil plants, soybean is in the first place. Recently, the use of nano-fertilizers in agriculture has expanded a lot in the world. On the other hand, it seems that the use of zinc nanosulfate or nanosilicon in arid and semi-arid climates like Iran can reduce the harmful effects of drought stress on plants.

Materials and Methods: Therefore, an experiment was carried out during two crop years in the form of a split-factorial design in the form of a basic randomized complete block design with 4 replications in Malekshahi city located in Ilam province (Iran) in crop years 2019-2020 and 2020-2021. The main factor included irrigation regimes in three levels without stress (control), irrigation based on 50% of the agricultural capacity of the field and irrigation based on 75% of the agricultural capacity of the field. The combination of nano zinc oxide treatments at three levels (zero (control), 0.75 and 1.5 g.L⁻¹) and nanosilicon at three levels (zero (control), 0.8 and 1.6 g.L⁻¹) in factorial form were placed in the secondary cards. Processing and classification of the extracted information was done using Excel software and data analysis was done using SAS version 9 software. Making comparisons with the Least Significant Difference (LSD) method at the 5% level. In this study, composite analysis method was used for analysis. To ensure the uniformity of the variances in order to integrate the data, Bartlett's test was performed, and the results indicated the absence of data and the necessary provision for integration.

Results and Discussion: The results regarding the mutual effect of drought stress and zinc sulfate showed that the highest seed yield was obtained in the treatment of no drought stress (100% crop capacity) and the consumption of 1.5 g.L⁻¹ nano zinc sulfate in the amount of 3452.2 kg.ha⁻¹. At



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

drought stress levels of 75 and 50% of the agricultural capacity, the consumption of zinc sulfate increased this index. With the use of 1.6 g.L^{-1} of nanosilicon, the grain yield was $3253.9 \text{ kg.ha}^{-1}$, which was 28% higher than the non-use treatment. Seed oil was used to treat the lack of drought stress, and consumption of 1.6 grams per liter of nano silicon was obtained in the amount of 58.6%. In the drought stress of 50% of the agricultural capacity, the use of nitrogen fertilizer and, especially 0.8 grams per liter of nano silicon increased this index. The results regarding the mutual effect of drought stress and zinc sulfate showed that the highest water use efficiency was achieved in the treatment of severe drought stress and the consumption of 1.5 g.L^{-1} nano zinc sulfate in the amount of 1.78 kg.m^{-3} . The lowest amount was obtained in the treatment of normal irrigation and no use of zinc sulfate. In the drought stress levels of 75 and 50% of the agricultural capacity, the consumption of zinc sulfate increased this index. The results regarding the mutual effect of nano silicon fertilizer and zinc sulfate showed that highest efficiency of irrigation water consumption was in the treatment of using 1.6 g.L^{-1} of nano silicon fertilizer. The lowest value was obtained in the treatment of not using nano silicon and zinc sulfate. With the increase in the use of nano silicon fertilizer, the response to zinc sulfate also increased.

Conclusion: In general, the results showed that by using nanosilicon and nanozinc oxide in soybeans, it is possible to effectively increase the grain yield and increase the amount of oil and protein. Probably, nanosilicon and zinc nanooxide increase the activity of enzymes effective in oil and protein synthesis in soybean plant. These nanomaterials activate hormonal regulators of plant growth and improve factors such as better absorption of nutrients and reduced water evaporation, all of which help increase seed yield and increase the amount of oil and protein in the soybean plant. In summary, the use of nanosilicon and zinc nanosulfate in soybeans brings a significant improvement in seed yield and increases the amount of oil and protein of this plant. These results can be used to improve the production and quality of soybean-based products.

Keywords: Dehydration, Nanotechnology, Protein, Seed oil, Seed yield

تأثیر مصرف نانوسیلیکون و نانوآکسید روی بر عملکرد کمی، کیفی و کارایی مصرف آب و روی در سویا (*Glycine max L*) تحت رژیم‌های آبیاری

حشمت اله عزیزی^۱، عباس ملکی^{۲*}، محمد میرزائی حیدری^۳، فرزاد بابایی^۲، علی حاتمی^۲

۱- دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام، ایلام، ایران

۲- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران

۳- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

* مسئول مکاتبه: maleki97@yahoo.com

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.429770.1383

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹

چکیده

به نظر می‌رسد بهره‌گیری از نانوکودها در اقلیم‌های خشک مانند ایران بتواند اثر مضر تنش خشکی بر گیاهان را کاهش دهد. لذا آزمایشی طی دو سال زراعی به صورت اسپلیت پلات- فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار در شهرستان ملکشاهی در استان ایلام در سال‌های زراعی ۹۹-۱۳۹۸ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا شد. عامل اصلی شامل رژیم‌های آبیاری در سه سطح بدون تنش (شاهد)، آبیاری بر اساس ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی مزرعه بود. ترکیب تیمارهای نانوآکسید روی در سه سطح (صفر (شاهد)، ۰/۷۵ و ۱/۵ گرم بر لیتر) و نانوسیلیکون نیز در سه سطح (صفر (شاهد)، ۰/۸ و ۱/۶ گرم بر لیتر) بصورت فاکتوریل به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد که به صورت محلول‌پاشی مصرف شدند. نتایج نشان داد که در سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، مصرف نانوآکسید روی موجب افزایش این عملکرد دانه به ترتیب به مقدار ۲۸ و ۲۲ درصدی نسبت به تیمار عدم مصرف شد. در خصوص اثر اصلی نانوسیلیکون؛ با مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانوسیلیکون، عملکرد دانه به مقدار ۳۲۵۳ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که نسبت به تیمار عدم مصرف معادل ۲۸ درصد افزایش داشت. بطور کلی نتایج نشان داد که با استفاده از ۱/۶ گرم در لیتر نانوسیلیکون یا مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانوآکسید روی در گیاه سویا، می‌توان به‌طور مؤثری عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. استفاده از نانوسیلیکون و نانوآکسید روی در گیاه سویا، همچنین افزایش مقدار روغن و پروتئین این گیاه را حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین، روغن دانه، عملکرد دانه، فناوری نانو، کم آبی

مقدمه

وجود دارد. تنش کم آبیاری علاوه بر اثر منفی بر عملکرد، باعث بروز یا تشدید سایر تنش‌ها مخصوصاً تنش کمبود عناصر غذایی در گیاه می‌شود (Maleki et al., 2020; Bahamin et al., 2019; Bahamin et al., 2021).

به‌کارگیری روش‌های مختلف در افزایش تحمل به تنش کم‌آبی در امر تولید و افزایش عملکرد کیفی و کمی محصولات حائز اهمیت است. برخی عوامل همچون عناصر غذایی و کوددهی بر تغییر وضعیت گیاه در حالت تنش خشکی موثر هستند که ریزمغذی‌ها از آن قبیل هستند (Coblentz et al., 2017). وسعت زیادی از خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌دلیل آهکی بودن (Dimkpa et al., 2019; Bahamin et al., 2019) دارای کمبود عناصر ریزمغذی، به‌ویژه روی می‌باشند (Candan et al., 2018). در صورتی که میزان روی خاک کمتر از ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد یا غلظت آن در

سویا (*Glycine max L.*) سرشار از مواد مغذی و دارای پروتئین‌های گیاهی، الیگوساکاریدها، فیبر خوراکی، ایزوفلاوون‌ها و مواد معدنی نظیر کلسیم می‌باشد و میزان چربی اشباع شده آن نیز پایین است. روغن سویا از مهم‌ترین روغن‌های نباتی خوراکی می‌باشد (Ji et al., 2023). از نظر سطح اراضی زراعی زیر کشت در دنیا، در بین گیاهان روغنی، سویا در مقام اول قرار دارد. به دلیل افزایش مصرف سویا در غذاهای صنعتی به‌ویژه در کشورهای توسعه یافته و مصرف شیر سویا به جای شیر مادر در تغذیه نوزادان، و همچنین به خاطر اهمیت آن در تغذیه دام، کشت این گیاه در بین سایر لگوم‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Shi et al., 2023). با توجه به واقع شدن ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و کمبود آب در این مناطق، احتمال وقوع تنش خشکی در تمامی مراحل رشدی گیاهان

تحقیقات نشان داده است که استفاده از نانوسیلیکون می‌تواند در کاهش اثر تنش خشکی در گیاهان نقش مؤثری ایفا کند. نانوسیلیکون، به عنوان یک فرم خاص از سیلیسیم، قادر است بهبود تحمل گیاهان در مواجهه با شرایط خشکی را تسهیل کند (Cao et al., 2020; Basu et al., 2021). نانوسیلیکون می‌تواند به عنوان یک جاذب رطوبت عمل کند و توانایی ذخیره آب در ساقه، برگ و ریشه گیاهان را افزایش دهد. این امر منجر به کاهش تبخیر آب از سطح برگ‌ها و در نتیجه حفظ رطوبت در گیاه می‌شود. علاوه بر این، نانوسیلیکون می‌تواند تأثیرات آب و عناصر معدنی در گیاهان را تعدیل کند و فعالیت آنزیم‌های مؤثر در فرایندهای فیزیولوژیکی را تحریک کند (Ashkiani et al., 2020). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نانوسیلیکون می‌تواند روند رشد گیاهان را تسریع کرده و عملکرد آن‌ها را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشد (Dimkpa et al., 2019). این نانوماده می‌تواند بهبود جذب و استفاده از عناصر غذایی در گیاهان را تسهیل کند و میزان فتوسنتز و تولید انرژی را افزایش دهد. همچنین، نانوسیلیکون می‌تواند روند فعال‌سازی ژن‌ها مرتبط با تحمل به تنش خشکی را تقویت کند و محتوای آنتی‌اکسیدان‌ها را در گیاهان افزایش دهد (Azarfam et al., 2020). از آن‌جا که روی و سیلیکون وظایف مهمی در سبزه و کار گیاهان دارند، بنابراین این تحقیق جهت تعیین اثرات این دو ماده بر عملکرد کمی، کیفی و کارایی مصرف آب در سویا تحت رژیم‌های آبیاری انجام گرفت. در تحقیق حاضر از این راهکار در جهت تولید مطلوب گیاه سویا به عنوان یک محصول روغنی و پروتئینی تحت شرایط تنش کم آبی استفاده می‌گردد که با توجه به وضعیت خشکی کشور ایران، این تحقیق می‌تواند گامی جدید در کشاورزی در مناطق خشک تلقی گردد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای طرح

این آزمایش طی دو سال زراعی در شهرستان ملکشاهی واقع در استان ایلام (ایرن) در سال‌های زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا شد. این شهرستان بین ۳۲ درجه و ۳۳ دقیقه و ۵۸ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۱۲ دقیقه و ۰۸ ثانیه عرض

گیاه سویا از ۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمتر باشد، گیاه دچار کمبود روی می‌شود (Azarfam et al., 2020). سیلیکون نیز دومین عنصر فراوان در خاک است اما در بسیاری از گیاهان به عنوان یک عنصر ضروری مطرح نیست. به تازگی مطالعات زیادی نشان داده است که افزودن سیلیکون به گیاهان تیمار شده می‌تواند به طور چشمگیری تنش‌های زیستی و غیر زیستی نظیر: تنش فلزات سنگین، نمک، خشکی، سرما و یخ‌زدگی را کاهش دهد و آثار مفیدی بر رشد و تولید گیاهان داشته باشد (Ashkiani et al., 2020; Candan et al., 2018). سیلیکون با افزایش فعالیت فتوسنتزی، بهبود وضعیت آب، تحریک سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش جذب سدیم یا افزایش وابسته به H^+ -ATPase پتاسیم در اندام هوایی، تحمل به تنش شوری را افزایش می‌دهد (Banerjee et al., 2021; Behera et al., 2015). همچنین نشان داده شده است که سیلیکون احتمالاً سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز را فعال اما غلظت مالون‌دی‌آلدئید را در گیاهان جو، گوجه‌فرنگی و ذرت کاهش داده است (Ahmed et al., 2021; Cao et al., 2020; Basu et al., 2021).

امروزه استفاده از نانوذرات توسط بسیاری از پژوهشگران کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است، هر چند سازوکار عملکرد آنها به درستی شناخته نشده است (Banerjee et al., 2021; Behera et al., 2015). نشان داده شده است که استفاده از نانو اکسید روی به عنوان یک ماده کاتالیزور در سویا، می‌تواند به طور مؤثر اثرات مضر تنش خشکی را کاهش دهد. با تأمین نیازهای روزانه آبی گیاه، نانو اکسید روی می‌تواند بهبود در مصرف آب و افزایش تحمل به خشکی در سویا را تسهیل کند (Cao et al., 2020). در تحقیقی تأثیر نانو اکسید روی بر عوامل مهمی مانند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تولید فتوسنتز و جذب عناصر غذایی در سویا مثبت ارزیابی شده است (Ji et al., 2023). نانو اکسید روی می‌تواند بهبود عملکرد سویا در شرایط تنش خشکی را تسهیل کرده و باعث افزایش محتوای کلروفیل و تولید انرژی در گیاه می‌شود (Fathi et al., 2022; Cao et al., 2020). که نانوذرات سیلیکون نیز سبب افزایش فعالیت نیترات ردوکتاز در سویا می‌شود (Cao et al., 2020; Basu et al., 2021).

شمالی و ۴۷ درجه و ۰۷ دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۰۴ دقیقه و ۰۹ ثانیه طول شرقی و ارتفاع ۱۶۹۰ متر از سطح دریا قرار دارد. شهرستان ملکشاهی دارای آب و هوای گرم و نیمه خشک و با میانگین بارندگی ۳۵۰ میلی‌متر است.

طرح آماری

آزمایش به صورت اسپلیت پلات- فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل رژیم‌های آبیاری در سه سطح بدون تنش (شاهد)، آبیاری بر اساس ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه و آبیاری بر اساس ۷۵ درصد ظرفیت زراعی مزرعه انجام شد. ترکیب تیمارهای نانو اکسید روی در سه سطح (صفر (شاهد)، ۰/۷۵ و ۱/۵ گرم بر لیتر) و نانو سیلیکون در سه سطح (صفر (شاهد)، ۰/۸ و ۱/۶ گرم بر لیتر) بصورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفتند که به صورت محلول پاشی در مرحله گلدهی مورد مصرف قرار گرفتند. بین تیمارهای محلول پاشی نانو سیلیکون و نانو اکسید روی دو روز فاصله در نظر گرفته شد.

عملیات زراعی

زمین محل آزمایش در بهار شخم و سپس دیسک زده شد.

فاصله بین کرت‌های فرعی نیم متر و برای کرت‌های اصلی یک متر در نظر گرفته شد. پیش از انجام آزمایش، آزمون خاک بر روی نمونه خاکی که از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه برداشت شد صورت گرفت. پس از تجزیه نمونه خاک مزرعه، کود سوپرفسفات تریپل با غلظت ۴۱ درصد فسفر خالص و مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار بصورت پیش از کاشت استفاده شد. زمین مورد نظر جهت حفظ بهتر رطوبت خاک با گاوآهن قلمی شخم زده شد، سپس برای تسطیح و خرد شدن کلوخه‌ها و نیز اختلاط کود با خاک، از دیسک استفاده شد. کشت بذور در تاریخ ۱۵ اردیبهشت انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت بذرها در تمام تیمارهای آبیاری اعمال شد. فاصله بذور روی هر خط ۵ سانتی‌متر و فاصله بین خطوط ۵۰ سانتی‌متر بود. هر کرت فرعی با ابعاد ۲/۵ × ۴ متر و شامل ۵ خط کاشت و تراکم بوته ۴۰ هزار بوته در هکتار بود. فاصله بلوک‌ها از هم ۲ متر و فاصله کرت‌های اصلی به میزان ۱ متر در نظر گرفته شد. بین کرت‌های فرعی یک خط نکاشت در نظر گرفته شد. آبیاری به صورت جوی و پشت‌های (نشستی) انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت بذور، انجام گرفت. گیاهان تا مرحله شش برگی به طور منظم و یکنواخت آبیاری شدند.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش (سال ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹)

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil where the experiment was carried out (years 2019 and 2020)								
عمق	بافت	اسیدیته	هدایت الکتریکی	کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	خصوصیات
Depth (cm)	Texture	pH	EC (ds.m ⁻²)	Organic C (%)	N (%)	Available P (ppm)	Available K (ppm)	specifications
0-30	لومی loam	7	0.9	0.85	0.045	8	144	سال اول Year 1
0-30	لومی loam	7.1	0.96	0.88	0.046	9	146	سال دوم Year2

و حجم آب مورد نیاز هر کرت توسط کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. عمق موثر ریشه سویا ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. چگالی ظاهری خاک ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. در ابتدای کار وزن گل اشباع پس از خروج آب اضافی از گلدان دارای منفذ محاسبه شد. سپس وزن خاک خشک شده در آن محاسبه شد و از تفاضل آن‌ها میزان ظرفیت زراعی خاک محاسبه شد. در نهایت مقدار آن به مزرعه تعمیم داده شد و بر اساس آن تیمار عدم تنش کم آبیاری، ۷۵ و ۵۰ درصد کمبود

برای به‌دست آوردن ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم از طریق به‌دست آوردن پتانسیل ماتریک توسط تانسیمتر فلزی استفاده شد. در این تحقیق برای ظرفیت زراعی از روش کمبود رطوبت خاک (روش وزنی) نسبت به FC (FC-θ) برای تعیین حجم آب مورد نیاز گیاه در هر دور آبیاری استفاده شد. با در نظر گرفتن ضریب گیاهی (Kc)، میزان تبخیر و تعرق بالقوه مشخص و بر اساس تخلیه رطوبتی و طبق تیمارهای مذکور تا رسیدن رطوبت خاک به حد FC، میزان آب مورد نیاز محاسبه

سطحی معادل ۲ مترمربع از نیمه میانی کرت برداشت شده و پس از خشک شدن دانه‌ها، میزان عملکرد دانه هر کرت محاسبه شد. جهت تعیین عملکرد بیولوژیک (کل ماده خشک اندام‌های بالای سطح خاک) در مرحله رسیدگی، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل گردید و در آن تهویه دار با درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. بعد از خشک شدن وزن آنها محاسبه شد.

برای محاسبه درصد پروتئین دانه با قراردادن نمونه‌ها در دستگاه کجلدال و افزودن سود (NaOH)، اسید بوریک (H3BO3) و آب مقطر مطابق پروتکل اندازه‌گیری نیتروژن و پروتئین انجام شد. محلول حاصل از تقطیر توسط اسید کلریدریک ۰/۱، تیتراسیون شد؛ تا رنگ محلول درون ارلن، به رنگ ارغوانی تغییر یافت. سپس عدد تتراسیون در فرمول قرار گرفت و درصد پروتئین محاسبه شد (Bradford, 1976). درصد روغن دانه به کمک دستگاه سوکسله و با استفاده از حلال هگزان انجام شد (Nelson and Sommers, 1983). به منظور تعیین میزان روی و فسفر، در پایان رشد، از هر کرت ۳ نمونه گیاهی برداشت و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. میزان فسفر نمونه‌ها به روش جذب اتمی (طیف سنج جذب اتمی AAS مدل GeminAA ساخت آلمان) اندازه‌گیری شد.

کارایی مصرف آب (1WUE) (کیلوگرم بر متر مکعب) بر اساس نسبت عملکرد تولید شده دانه (Y) (کیلوگرم در هکتار) و کل آب مصرفی (CW) (متر مکعب در هکتار) محاسبه شد. آنجا که در بررسی حاضر هدف محاسبه کارایی مصرف آب آبیاری بود لذا میزان بارندگی در محاسبات لحاظ نشد. راندمان مصرف روی (2ZUE) بر حسب عملکرد دانه (SY) (کیلوگرم) به مقدار ورودی کود به اضافه مقدار موجود در خاک (کیلوگرم) حسب واحد کیلوگرم بر کیلوگرم محاسبه شد (Bradford, 1976). قبل از این محاسبه ابتدا مصرف نانوآکسید روی به کیلوگرم در هکتار محاسبه و تعمیم داده شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح ۵ درصد انجام شد. در این بررسی از روش تجزیه

رطوبتی خاک محاسبه شد. عمق آب در هر آبیاری (I) بر حسب سانتی‌متر بر اساس رابطه‌ی ۱ محاسبه شد (Yaniv et al., 1999):

$$dn = RAW = (\theta_{fc} - \theta_{PWP}) * \rho_b * Z * MAD \quad (1)$$

RAW = کل آب قابل تخلیه (میلی‌متر)

Z = عمق موثر ریشه (متر)

θ = رطوبت خاک قبل از آبیاری

ρ_b = وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه (واحد گرم بر

سانتی‌متر مکعب)

θ_{fc} = رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه

θ_{PWP} = رطوبت وزنی قبل از آبیاری کرت‌ها

MAD = تخلیه مجاز رطوبتی که در این تحقیق ۵۰ درصد

در نظر گرفته می‌گردد.

به‌وسیله رابطه‌ی ۲ حجم آب آبیاری مورد نیاز هر کرت

برآورد گردید:

$$V = I \times A \times 100 \quad (2)$$

V = حجم آب آبیاری استفاده شده در هر کرت (لیتر)

A = مساحت هر کرت (متر مربع)

I = ارتفاع آب آبیاری (میلی‌متر)

در دفعات بعدی آبیاری و پس از جوانه‌زنی و استقرار بوته‌ها، عمق خالص برای آبیاری بر حسب رطوبت از کاهش یافته‌ی خاک در محیط ریشه گیاه که توسط دستگاه رطوبت سنج T.D.R اندازه‌گیری شد. در زمان اعمال تیمارها با اندازه‌گیری کمبود رطوبتی خاک در منطقه ریشه، ارتفاع خالص آب مورد نیاز تعیین و با توجه به مساحت هر کرت برای تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی منظور شد.

نمونه‌برداری

در مرحله‌ی رسیدگی، نمونه‌برداری از هر کرت بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای انجام شد و صفات مورد نظر اندازه‌گیری شدند.

² Zinc use efficiency

¹ Water use efficiency

غلظت روی

بیشترین غلظت روی در تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۰/۰۸۲ درصد حاصل شد ولی بین این تیمار با تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی اختلاف معناداری وجود نداشت. کمترین مقدار نیز در تیمار تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی به دست آمد. با افزایش شدت تنش به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی موجب افزایش این شاخص شد.

عدم اعمال تنش بترتیب موجب افزایش ۳۶ و ۲۱ درصدی این شاخص نسبت به تیمار ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی شد (جدول ۳).

اثر متقابل نانوسیلیکون و نانو اکسید روی بر افزایش جذب عنصر روی در گیاهان به عنوان یک ترکیب نانوذرات ممکن است بهبود عملکرد جذب روی را تسهیل کند. ترکیب این دو نانوذره می‌تواند به عنوان یک روش نوین برای افزایش اثربخشی جذب عنصر روی از خاک و افزایش میزان روی در گیاهان عمل کند. نانوسیلیکون به عنوان یک ماده اصلاح‌کننده خاک و نانوذره فعال می‌تواند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشیده و باعث افزایش موجودی روی قابل دسترس در خاک شود و در نتیجه، جذب روی توسط گیاهان بهبود یابد. همچنین، نانوسیلیکون می‌تواند توانایی گیاهان در جذب روی از خاک را افزایش داده و عملکرد جذب روی را ارتقاء دهد (Ghorbanpour *et al.*, 2020; Bijanzadeh *et al.*, 2022).

با استفاده از نانو روی می‌توان میزان روی در محیط خاک را افزایش داد و تجمع روی در محیط ریشه‌های گیاهی را بهبود بخشیده و این ویژگی‌ها باعث می‌شود که گیاهان قادر به جذب بیشتر روی از خاک باشند و بتوانند بهبودی قابل توجه در عملکرد و توسعه خود نشان دهند (Ahmed *et al.*, 2021; Tondey *et al.*, 2021; Alamri *et al.*, 2020).

با ترکیب نانوسیلیکون و نانوروی، می‌توان عملکرد جذب روی را بهبود بخشید و به افزایش عملکرد و عملکرد دانه‌ها در گیاهان کمک کرد.

مرکب برای آنالیز استفاده شد. برای اطمینان از یکنواختی واریانس‌ها به منظور ادغام داده‌ها، آزمون بارتلت انجام شد که نتایج حاکی از عدم معنی‌داری داده‌ها و فراهمی لازم برای ادغام بودند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که علاوه بر اثرات اصلی، اثر متقابل تنش در نانوآکسید روی، تنش در نانوسیلیکون، نانوسیلیکون در نانو اکسید روی و اثر متقابل سه گانه تنش خشکی، کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی بر غلظت روی همگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. اثرات اصلی تیمارها، اثر متقابل تنش در نانو اکسید روی، نانو اکسید روی در نانوسیلیکون و اثر متقابل سه گانه و چهارگانه بر غلظت نیتروژن همگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود.

نتایج نشان داد که علاوه بر اثر اصلی نانوسیلیکون، نانوآکسید روی و تنش خشکی؛ اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی بر عملکرد دانه همگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. علاوه بر اثرات اصلی، اثرات متقابل دوگانه تنش در نانوسیلیکون، نانوسیلیکون و نانوآکسید روی (در سطح ۱ درصد) و تنش در نانوآکسید روی (در سطح ۵ درصد) بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود (جدول ۲).

نتایج نشان داد که اثرات اصلی تیمارها، اثر متقابل تنش در نانوسیلیکون و اثر نانو اکسید روی در نانوسیلیکون در سطح ۱ درصد و اثر متقابل سه گانه تنش خشکی، کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی در سطح ۵ درصد بر پروتئین معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که علاوه بر معنی‌داری اثرات اصلی تنش، نانوآکسید روی و نانوسیلیکون؛ اثر متقابل تنش و نانوسیلیکون نیز بر درصد روغن دانه در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. علاوه بر معنی‌دار شدن اثرات اصلی تنش، اثر متقابل نانو سیلیکون و نانوآکسید روی؛ اثر متقابل نانو سیلیکون و روی (در سطح ۱ درصد) و اثر متقابل تنش و نانوآکسید روی (در سطح ۵ درصد) بر کارایی مصرف آب آبیاری در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

غلظت نیتروژن

در سال اول بیشترین غلظت نیتروژن در تیمار عدم تنش خشکی، مصرف ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۰/۷۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۱/۲۱ درصد حاصل شد ولی بین این تیمار با تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۰/۷۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی اختلاف

معنی داری وجود نداشت. کمترین مقدار نیز در تیمار تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی به دست آمد. با افزایش شدت تنش به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی موجب افزایش این شاخص شد (جدول ۳).

جدول ۲- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس اثر عوامل آزمایشی بر صفات جذب عناصر و عملکرد

Table 2- The mean square obtained from the analysis of variance of the effect of experimental factors on the characteristics of absorption of elements and yield

منابع تغییرات	درجه آزادی	غلظت روی	غلظت نیتروژن	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک
SOV	df	Zinc concentration	Nitrogen concentration	Seed yield	Biologic yield
سال	1	0.00004 ^{ns}	0.005 ^{ns}	5465.4 ^{ns}	2719224.1 ^{ns}
Year (Y)					
سال × تکرار	6	0.000064	0.006	103546.3	2086921.9
Y×Rep					
تنش	2	0.0011 ^{**}	0.096 ^{**}	12125365 ^{**}	234216404.9 ^{**}
Stress (A)					
سال × تنش	2	0.00001 ^{ns}	0.005 ^{ns}	125245.5 ^{ns}	6104906.0 ^{**}
Y×A					
خطای کرت اصلی	12	0.000031	0.005	89256.5	133616.7
Residual a					
نانو سیلیکون	2	0.00062 ^{**}	1.287 ^{**}	95149354 ^{**}	118149755.8 ^{**}
Nano-silicon (B)					
نانو اکسید روی	2	0.0014 ^{**}	0.326 ^{**}	9992502.5 ^{**}	32892608.0 ^{**}
Nano Zinc (C)					
سال × نانو سیلیکون	2	0.000004 ^{ns}	0.008 ^{ns}	237961.3 ^{ns}	2717963.0 ^{**}
Y×B					
سال × نانو اکسید روی	2	0.0000001 ^{ns}	0.026 [*]	880341.3 [*]	1690331.1 [*]
Y×C					
تنش × نانو سیلیکون	4	0.00013 ^{**}	0.015 ^{ns}	1019584.2 ^{**}	3009533.9 ^{**}
A×B					
تنش × نانو اکسید روی	4	0.00004 ^{ns}	0.102 ^{**}	1166656 ^{**}	1286326.3 [*]
A×C					
سال × تنش × نانو سیلیکون	4	0.000004 ^{ns}	0.005 ^{ns}	76283.4 ^{ns}	695289.8 ^{ns}
Y×A×B					
سال × تنش × روی	4	0.0000001 ^{ns}	0.027 ^{**}	185082.4 ^{ns}	592089.6 ^{ns}
Y×A×C					
نانو سیلیکون × نانو اکسید روی	4	0.00024 ^{**}	0.007 ^{ns}	219522.2 ^{ns}	2349568.0 ^{**}
B×C					
سال × نانو سیلیکون × نانو اکسید روی	4	0.0000001 ^{ns}	0.024 ^{**}	5421.3 ^{ns}	46501.3 ^{ns}
Y×B×C					
تنش × نانو سیلیکون × نانو اکسید روی	8	0.000101 ^{**}	0.042 ^{**}	88142.4 ^{ns}	206152.0 ^{ns}
A×B×C					
سال × تنش × نانو سیلیکون × نانو اکسید روی	8	0.0000001 ^{ns}	0.023 ^{**}	95426.3 ^{ns}	648406.0 ^{ns}
Y×A×B×C					
خطای آزمایش	144	0.00002	0.006	96474.2	388484.4
Residual					
ضریب تغییرات (CV %)	-	6.9	7.3	7.3	6.3

ns: معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و عدم تفاوت معنادار

*,** and ns: significance at the probability level of 5%, 1% and no significant difference

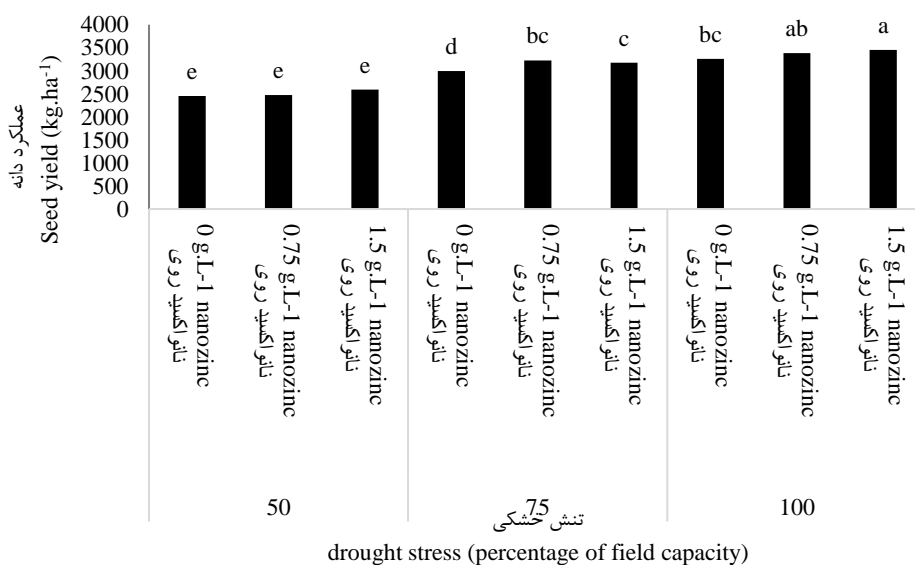
شیمیایی خاک را بهبود داده و میزان نیتروژن در دسترس را افزایش دهد (Banerjee et al., 2021; Tondey et al., 2021). در این رابطه محقان (Raeisi Sadati et al., 2020) نیز گزارش نمود که کمبود شدید آب در خاک موجب محدود شدن توانایی گیاه جهت جذب نیتروژن از خاک می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در شرایط کمبود آب در خاک که جذب عناصر غذایی به خصوص نیتروژن تحت تأثیر قرار می‌گیرد، لزوم برقراری تناسب میان نیتروژن مصرفی و فراهمی رطوبت در خاک ضروریست.

عملکرد دانه

نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در تیمار عدم تنش خشکی (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۳۴۵۲ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف نانو اکسید روی به دست آمد. در سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، مصرف نانو اکسید روی موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۱). با مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو اکسید روی، عملکرد دانه به مقدار ۳۲۵۳ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که نسبت به تیمار عدم مصرف معادل ۲۸ درصد افزایش داشت (شکل ۲).

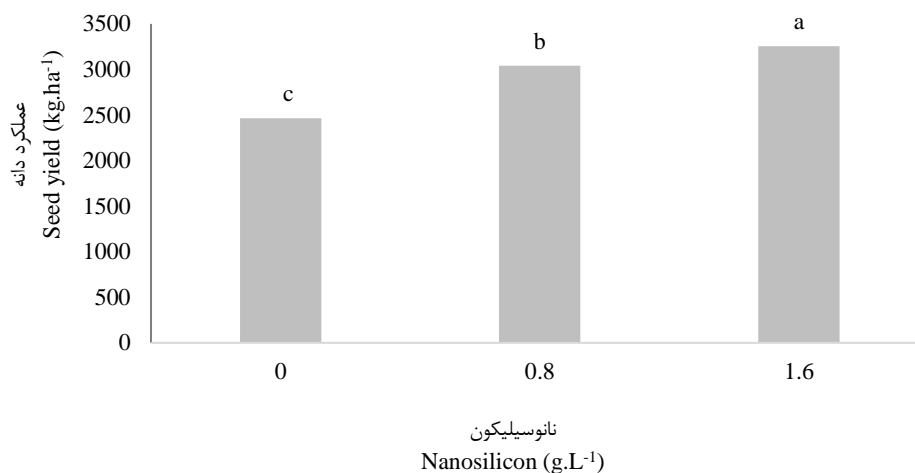
دلیل تأثیر نانوسیلیکون بر افزایش جذب نیتروژن در دانه به دلیل ویژگی‌های خاص این نانوذره است. نانوسیلیکون باعث افزایش سطح مخازن آب و مواد مغذی در خاک می‌شود، همچنین می‌تواند فرایندهای فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که گیاهان بتوانند نیتروژن موجود در خاک را به طور بهتری جذب کنند و از آن استفاده کنند. به علاوه، نانوسیلیکون می‌تواند تأثیرات مثبتی بر روی رشد ریشه‌ها داشته باشد که این مسئله نیز می‌تواند به افزایش جذب نیتروژن توسط گیاه کمک کند (Kareem et al., 2022; Raeisi Sadati et al., 2022). ریشه‌های بهتر و پوشش دهی شده با نانوسیلیکون می‌توانند نیتروژن موجود در عمق‌های بیشتر خاک را بهتر به دست آورده و به گیاهان مهیا کنند (Abdelaal et al., 2020; Banerjee et al., 2021; Tondey et al., 2021).

دلیل تأثیر مثبت نانو اکسید روی بر افزایش جذب نیتروژن در گیاهان ممکن است به دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌ها، تنظیم هورمون‌ها و اصلاح خصوصیات خاک باشد. نانو اکسید روی می‌تواند فعالیت آنزیم‌های مرتبط با جذب نیتروژن در گیاه را افزایش دهد، که بهبود فرایند هضم و جذب نیتروژن توسط گیاه را تسهیل می‌کند. نانو اکسید روی می‌تواند به عنوان یک سیگنال‌دهنده هورمونی عمل کند و فرایندهای جذب نیتروژن را بهبود بخشد. نانو اکسید روی می‌تواند خصوصیات فیزیکی و



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی بر عملکرد دانه

Figure 1- Comparison of the average interaction effect of drought stress and nanozinc oxide on seed yield



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر اصلی نانوسیلیکون بر عملکرد دانه

Figure 2- Comparison of the average main effect of nanosilicon on seed yield

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه تنش خشکی، نانوسیلیکون و نانوزنک بر جذب برخی عناصر در سویا

Table 3- Comparison of the average triple interaction effect of drought stress, nanosilicon and nanozinc on the absorption of some elements in soybeans

تنش خشکی	نانوسیلیکون	نانوآکسید روی	نیتروژن جذب شده در سال اول	نیتروژن جذب شده در سال دوم	روی جذب شده	
Drought stress (percentage of field capacity)	Nanosilicon (g.L ⁻¹)	Nano zinc oxide (g.L ⁻¹)	Nitrogen absorbed in first year (%)	Nitrogen absorbed in second year (%)	Adsorbed zinc (%)	
50	0	0	0.78 ^k	0.78 ^k	0.054 ^k	
		0.75	0.83 ^{ijk}	0.83 ^{ijk}	0.068 ^{c-j}	
		1.5	0.92 ^{f-j}	0.92 ^{f-j}	0.066 ^{e-j}	
		0	0.98 ^{c-g}	0.98 ^{c-g}	0.060 ^{jk}	
		0.8	0.75	0.92 ^{f-j}	0.92 ^{f-j}	0.065 ^{f-j}
		1.5	1.13 ^{ab}	1.13 ^{ab}	0.067 ^{d-j}	
	1.6	0	0.93 ^{e-i}	0.93 ^{e-i}	0.060 ^{jk}	
		0.75	1.02 ^{b-f}	1.02 ^{b-f}	0.063 ^{h-k}	
		1.5	1.11 ^{ab}	1.11 ^{ab}	0.072 ^{b-h}	
		0	0.79 ^{jk}	0.79 ^{jk}	0.061 ^{ijk}	
		0.75	0.84 ^{h-k}	0.84 ^{h-k}	0.070 ^{b-i}	
		1.5	0.92 ^{f-j}	0.92 ^{f-j}	0.069 ^{bc-j}	
75	0	0	0.96 ^{c-h}	0.96 ^{c-h}	0.060 ^{jk}	
		0.75	1.00 ^{b-f}	1.00 ^{b-f}	0.068 ^{c-j}	
		1.5	1.12 ^{ab}	1.12 ^{ab}	0.077 ^{abc}	
		0	1.06 ^{b-e}	1.06 ^{b-e}	0.074 ^{a-f}	
		0.8	0.75	0.98 ^{c-g}	0.98 ^{c-g}	0.065 ^{f-j}
		1.5	1.20 ^a	1.20 ^a	0.077 ^{a-d}	
	1.6	0	0.77 ^k	0.77 ^k	0.061 ^{ijk}	
		0.75	0.86 ^{g-k}	0.86 ^{g-k}	0.064 ^{g-j}	
		1.5	0.95 ^{d-i}	0.95 ^{d-i}	0.071 ^{b-h}	
		0	1.05 ^{b-f}	1.05 ^{b-f}	0.066 ^{e-j}	
		0.8	0.75	1.21 ^a	1.21 ^a	0.072 ^{b-g}
		1.5	1.02 ^{b-f}	1.02 ^{b-f}	0.082 ^a	
100	1.6	0	1.06 ^{bcd}	1.06 ^{bcd}	0.078 ^{ab}	
		0.75	1.20 ^a	1.20 ^a	0.075 ^{a-e}	
		1.5	1.09 ^{abc}	1.09 ^{abc}	0.078 ^{ab}	

ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف آماری معناداری توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند

Columns with common letters do not have a statistically significant difference by LSD test at the level of 5%.

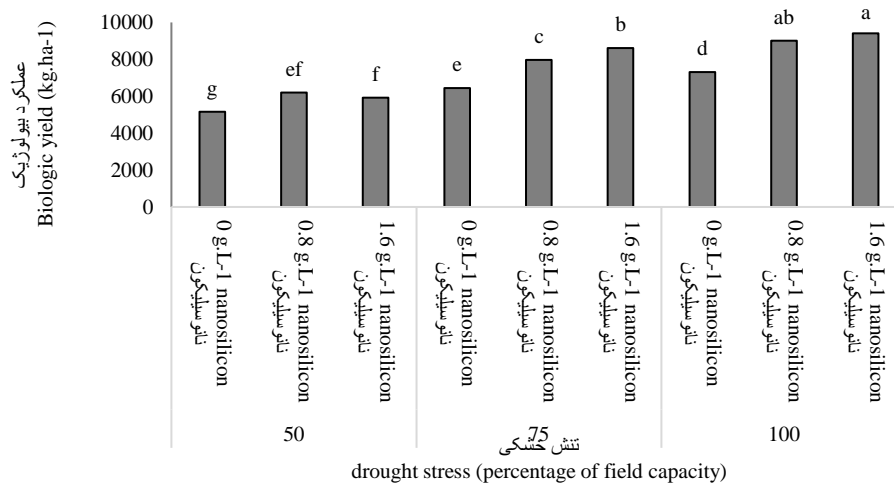
عملکرد بیولوژیک

نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و کود نانو سیلیکون نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار عدم تنش خشکی (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو سیلیکون به مقدار ۹۴۰۰ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون به دست آمد. در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نیتروژن و به خصوص ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۳). نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار عدم تنش خشکی (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۱۱۹۸۷ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف نانو اکسید روی به دست آمد. در سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف نانو اکسید روی و موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۴). نتایج در خصوص اثر متقابل کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار مصرف ۱/۶ گرم در لیتر کود نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۹۲۹۳ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. با افزایش مصرف کود نانو سیلیکون پاسخ به نانو اکسید روی نیز افزایش یافت (شکل ۵). علت افزایش عملکرد را می‌توان به افزایش بیوسنتز اکسین در حضور عنصر روی دانست. روی به عنوان جزء ساختمانی بعضی از آنزیم‌ها بوده و در فعالیت‌های آنزیمی گوناگون شرکت دارد و با کاهش واکنش اسیدی خاک قابلیت جذب بیشتری پیدا می‌کند (Umair Hassan et al., 2020). نانوسیلیکون، به عنوان یک نانوماده، توانایی افزایش عملکرد بیولوژیک گیاهان را به دلایل گوناگون دارد. استفاده از نانوسیلیکون یا نانو اکسید روی باعث افزایش جذب و استفاده بهینه از عناصر غذایی در گیاهان می‌شود که منتج به افزایش عملکرد می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که نانوسیلیکون باعث افزایش جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر عناصر مورد نیاز گیاهان می‌شود، که در نتیجه منجر به افزایش عملکرد بیولوژیک گیاهان می‌شود (Benslima et al., 2021).

نانوسیلیکون می‌تواند در کاهش تبخیر آب از برگ‌ها و افزایش تجمع آب در گیاهان کمک کند، که در نتیجه می‌تواند تأثیر مثبتی بر عملکرد دانه در شرایط خشکی داشته باشد. یکی از مکانیسم‌های اثرگذار نانوآکسید روی بر افزایش وزن صد دانه، افزایش جذب آب و عناصر غذایی در گیاهان است (Candan et al., 2017). نانوآکسید روی با افزایش هدایت روزنه‌ای در منطقه ریشه، موجب افزایش قدرت جذب و انتقال آب و عناصر غذایی به بخش‌های مختلف گیاه می‌شود. این بهبود در جذب و تأمین منابع غذایی، به طور مستقیم منجر به افزایش وزن دانه می‌شود (Aqaei et al., 2020). علاوه بر این، نانوآکسید روی توانایی تنظیم فعالیت آنزیم‌ها و مسیره‌های متابولیکی در گیاه را داراست. این تنظیمات متابولیکی بهبود عملکرد فیزیولوژیکی گیاه را تحت تنش خشکی ارتقا می‌دهد و در نتیجه منجر به افزایش وزن دانه می‌گردد (Chattha et al., 2017).

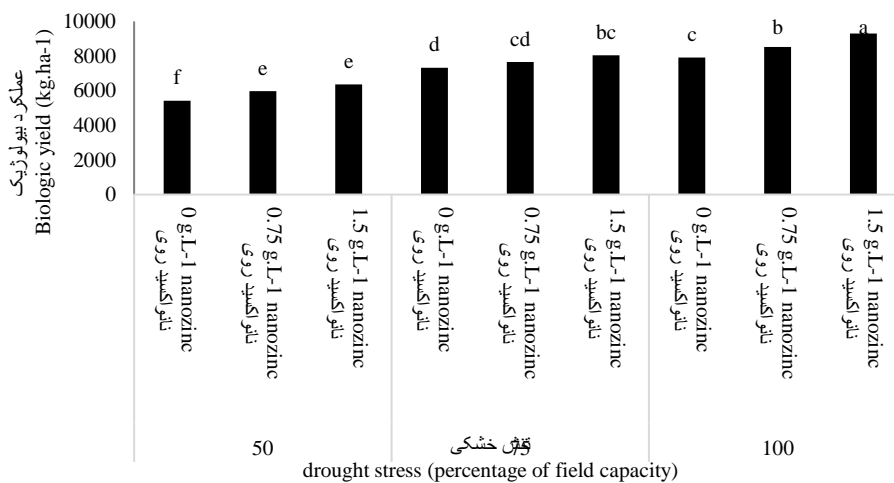
تنش خشکی می‌تواند به عملکرد دانه‌ها در سویا تأثیرات منفی بگذارد. در زیر سه دلیل کاهش عملکرد دانه در اثر تنش خشکی برای گیاهان سویا آورده شده است. تنش خشکی باعث کاهش قابل توجه در فتوسنتز گیاه می‌شود (Fathi et al., 2022; Ghadimezhad Shiade et al., 2021; Arif et al., 2021). در شرایط خشکی، گیاهان کمترین توانایی در جذب دی اکسید کربن (CO₂) دارند و عملکرد کلروفیل در سلول‌های برگ کاهش می‌یابد. این کاهش فتوسنتز منجر به کمبود انرژی و مواد غذایی برای ساخت دانه‌ها می‌شود (Taheri et al., 2022).

تنش خشکی باعث اختلال در فرآیندهای رشد و توسعه دانه‌ها می‌شود. کاهش آب در خاک و استوماهای بسته، باعث کاهش انتقال عناصر غذایی و مواد مغذی به دانه‌ها می‌شود. این امر موجب کاهش اندازه و وزن دانه‌ها و در نهایت کاهش عملکرد دانه می‌شود (Bhardwaj et al., 2021). تنش خشکی باعث تغییرات فیزیولوژیکی در گیاهان سویا می‌شود. این تغییرات شامل افزایش تولید مواد متابولیکی محافظ مانند پروتئین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها می‌شود. این مواد متابولیکی علاوه بر حفاظت در برابر تنش خشکی، منجر به تخلیص انرژی و مواد غذایی از بخش‌های دیگر گیاه می‌شوند که به کاهش عملکرد دانه تأثیر می‌گذارد (Cao et al., 2020; Bhardwaj et al., 2021).



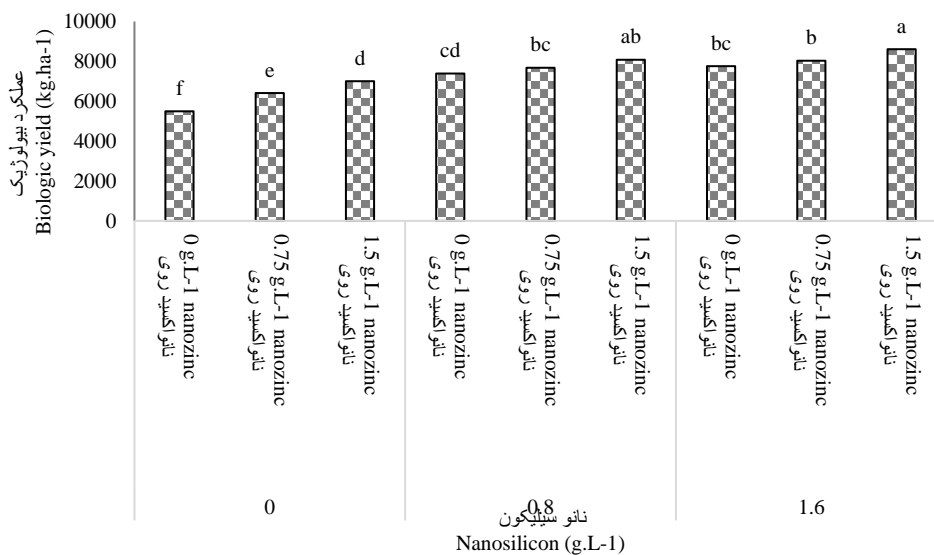
شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانوسیلیکون بر عملکرد بیولوژیک

Figure 3- Comparison of the average interaction effect of drought stress and nanosilicon on biologic yield



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی بر عملکرد بیولوژیک

Figure 4- Comparison of the average interaction effect of drought stress and nanozinc oxide on biologic yield



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوسیلیکون و نانو اکسید روی بر عملکرد بیولوژیک

Figure 5- Comparison of the average interaction effect of nanosilicon and nanozinc oxide on biologic yield

جدول ۴- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس اثر عوامل آزمایشی بر صفات کیفی و کارایی مصرف آب و روی

Table 4- The mean square obtained from the analysis of variance of the effect of experimental factors on the quality traits and efficiency of water and zinc consumption

منابع تغییرات	درجه آزادی	درصد پروتئین دانه	درصد روغن دانه	کارایی مصرف آب	کارایی مصرف روی
SOV	df	Seed protein	Seed oil	WUE	ZUE
سال	1	21.5**	0.00066*	2.68**	2719224.1 ^{ns}
Year (Y)					
سال × تکرار	6	0.193	0.00011	0.11	2086921.9
Y×Rep					
تنش	2	52.62**	0.0105**	159.2**	234216404.9**
Stress (A)					
سال × تنش	2	4.979 ^{ns}	0.00084**	34.20**	6104906.0**
Y×A					
خطای کرت اصلی	12	1.921	0.00007	0.05	133616.7
Residual a					
نانو سیلیکون	2	7.928**	0.0112**	4.02**	118149755.8**
Nano-silicon (B)					
نانو اکسید روی	2	8.532**	0.0018**	1.04**	32892608.0**
Nano Zinc (C)					
سال × نانو سیلیکون	2	3.695**	0.00025*	0.27 ^{ns}	2717963.0**
Y×B					
سال × نانوآکسید روی	2	0.002 ^{ns}	0.0007**	0.21 ^{ns}	1690331.1*
Y×C					
تنش × نانو سیلیکون	4	0.939**	0.00043**	1.99**	3009533.9**
A×B					
تنش × نانو اکسید روی	4	0.343 ^{ns}	0.00151**	11.00**	1286326.3*
A×C					
سال × تنش × نانو سیلیکون	4	0.448 ^{ns}	0.00017 ^{ns}	0.32*	695289.8 ^{ns}
Y×A×B					
سال × تنش × روی	4	0.000 ^{ns}	0.00004 ^{ns}	0.62**	592089.6 ^{ns}
Y×A×C					
نانو سیلیکون × نانو اکسید روی	4	3.037**	0.00008 ^{ns}	7.70**	2349568.0**
B×C					
سال × نانو سیلیکون × نانو اکسید روی	4	0.010 ^{ns}	0.00007 ^{ns}	0.26 ^{ns}	46501.3 ^{ns}
Y×B×C					
تنش × نانو سیلیکون × نانو اکسید روی	8	0.056*	0.00006 ^{ns}	0.035 ^{ns}	206152.0 ^{ns}
A×B×C					
سال × تنش × نانو سیلیکون × نانو اکسید روی	8	0.015 ^{ns}	0.00005 ^{ns}	0.08 ^{ns}	648406.0 ^{ns}
Y×A×B×C					
خطای آزمایش	144	0.221	0.00007	0.124	388484.4
Residual					
ضریب تغییرات	-	9.2	8.1	7.7	6.3
CV (%)					

*، **، ns: معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و عدم تفاوت معنادار

*، **، ns: significance at the probability level of 5%, 1% and no significant difference

سخت‌تر مواجه شوند (Sultana et al., 2016). استفاده از نانوسیلیکون یا نانو اکسید روی منجر به تنظیم فعالیت فیزیولوژیکی گیاهان می‌شوند که می‌تواند مقاومت به تنش خشکی را افزایش دهد. این نانو ماده باعث افزایش سیستم‌های

نانوسیلیکون یا نانو اکسید روی می‌توانند تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی، مانند تنش خشکی، شوری، سرما و گرما را بهبود بخشد. این نانوماده باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان می‌شود و به آنها کمک می‌کند تا با تنش‌های محیطی

درصد پروتئین

بیشترین درصد پروتئین دانه در تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۰/۷۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۸/۲ درصد حاصل شد ولی بین این تیمار با تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی اختلاف معناداری وجود نداشت. کمترین مقدار نیز در تیمار تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی به دست آمد. با افزایش شدت تنش به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی موجب افزایش این شاخص شد (جدول ۵).

آنتی استرس در گیاهان می شود و فعالیت آنزیمها را بهبود می بخشد. این تغییرات فیزیولوژیکی بهبود عملکرد بیولوژیک گیاهان را تحت شرایط استرس بهبود می دهد (Zabet *et al.*, 2015; Sultana *et al.*, 2016). با توجه به مطالب فوق، نانوسیلیکون می تواند بهبودهای قابل توجهی در عملکرد بیولوژیک گیاهان داشته باشد و در تحقق اهداف کشاورزی و افزایش عملکرد محصولات گیاهی مؤثر باشد. استفاده از نانو اکسید روی باعث افزایش رشد و توسعه گیاهان می شود. این نانوماده موجب افزایش فعالیت هورمون های رشد و تنظیم کننده های جهش ژنتیکی در گیاهان می شود، که در نتیجه باعث افزایش عملکرد بیولوژیک آنها می شود (Ma *et al.*, 2017; Dimkpa *et al.*, 2019).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه تنش خشکی، نانوسیلیکون و نانوزنک بر پروتئین دانه و کارایی مصرف روی در سویا

Table 5- Comparison of the average triple interaction effect of drought stress, nanosilicon and nanozinc on seed protein and ZUE in soybeans

تنش خشکی Drought stress (percentage of field capacity)	نانوسیلیکون Nanosilicon (g.L ⁻¹)	نانو اکسید روی Nano zinc oxide (g.L ⁻¹)	پروتئین دانه Protein (%)	کارایی مصرف روی ZUE (kg.kg ⁻¹)	
50	0	0	7.03 ^e	492.8 ^e	
		0.75	8.63 ^{a-d}	168.6 ^{i-m}	
		1.5	7.73 ^{cde}	105.8 ^m	
	0.8	0	0	7.71 ^{cde}	646.4 ^d
			0.75	8.07 ^{a-e}	196.6 ^{h-k}
			1.5	8.24 ^{a-e}	121.8 ^{lm}
		1.6	0	7.71 ^{cde}	667.7 ^{cd}
			0.75	8.06 ^{a-e}	203.1 ^{g-j}
			1.5	8.24 ^{a-e}	125.7 ^{lm}
75	0	0	7.57 ^{cde}	626.6 ^d	
		0.75	8.50 ^{a-d}	210.6 ^{g-j}	
		1.5	7.63 ^{cde}	131.1 ^{klm}	
	0.8	0	0	8.27 ^{a-e}	870.9 ^b
			0.75	8.06 ^{a-e}	251.8 ^{fgh}
			1.5	8.72 ^{a-d}	150.2 ^{j-m}
		1.6	0	8.28 ^{a-e}	943.7 ^a
			0.75	8.07 ^{a-e}	266.6 ^{fg}
			1.5	8.72 ^{a-d}	165.7 ^{i-m}
100	0	0	7.45 ^{de}	713.5 ^c	
		0.75	7.67 ^{cde}	231.8 ^{f-i}	
		1.5	7.85 ^{cde}	152.1 ^{j-m}	
	0.8	0	0	8.02 ^{b-e}	948.7 ^a
			0.75	8.65 ^{a-d}	283.2 ^f
			1.5	9.36 ^{ab}	177.3 ^{ijkl}
		1.6	0	9.44 ^{cde}	976.2 ^a
			0.75	8.94 ^{abc}	296.1 ^f
			1.5	8.42 ^{a-e}	186.8 ^{h-l}

ستون های دارای حروف مشترک اختلاف آماری معناداری توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند

Columns with common letters do not have a statistically significant difference by LSD test at the level of 5%.

ساخت و ترکیب پروتئین‌ها در گیاه دارند. با افزایش فعالیت آنزیم‌ها، تولید پروتئین در گیاهان افزایش می‌یابد و مقدار پروتئین دانه نیز افزایش می‌یابد (Seyed Sharifi *et al.*, 2020; Kareem *et al.*, 2023).

درصد روغن

نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و کود نانو سیلیکون نشان داد که بیشترین درصد روغن دانه در تیمار عدم تنش خشکی (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو سیلیکون به مقدار ۵۸/۶ درصد حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون به دست آمد. در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نیتروژن و به خصوص ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که با مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانوآکسید روی، روغن دانه به مقدار ۵۹/۷ درصد حاصل شد که ۱۸ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف بود (شکل ۷).

نانوسیلیکون می‌تواند تنظیم‌کننده‌های هورمونی رشد گیاهان را فعال کند و فعالیت آنها را افزایش دهد. هورمون‌های رشد گیاهان نقش مهمی در تنظیم فرآیندهای بیولوژیکی از جمله تولید و ذخیره روغن در دانه‌ها دارند. با افزایش فعالیت هورمون‌های رشد، تولید روغن در دانه‌ها افزایش می‌یابد (Dimkpa *et al.*, 2020; Ahmed *et al.*, 2021). نانوسیلیکون می‌تواند فعالیت آنزیم‌های مؤثر در سنتز روغن در گیاهان را افزایش دهد. این آنزیم‌ها نقش اساسی در تولید و ذخیره روغن دانه‌ها دارند. با افزایش فعالیت آنزیم‌ها، سنتز روغن در دانه‌ها افزایش می‌یابد و مقدار روغن در دانه‌ها افزایش می‌یابد (Seyed Sharifi *et al.*, 2020; Kareem *et al.*, 2023).

نانوسیلیکون می‌تواند باعث بهبود جذب عناصر غذایی، از جمله عناصر مورد نیاز برای سنتز روغن در گیاهان شود. این نانوماده می‌تواند عناصر غذایی را در دسترس گیاه قرار دهد و فرآیندهای متابولیکی مرتبط با سنتز روغن را تسهیل کند. با افزایش جذب عناصر غذایی، مقدار مواد مورد نیاز برای تولید روغن در گیاهان افزایش می‌یابد (Tondey *et al.*, 2021).

سنتز پروتئین یک فرایند متابولیکی اساسی است که موجب بهبود تحمل و سازگاری فیزیولوژیکی به خشکی در گیاه می‌شود (Ashkiani *et al.*, 2020; Ahanger *et al.*, 2020). میزان پروتئین کل که بسیاری از آنزیم‌های دفاعی را شامل می‌شود در هنگام وقوع تنش افزایش می‌یابد که نشانگر فعال شدن مکانیسم‌های تحمل است (Candan *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2020). تغییر در میزان غلظت پروتئین‌های کل گیاه در اثر تخریب و یا سنتز برخی از پروتئین‌های مخصوص مقابله با تنش و متابولیسم‌های دیگر انجام می‌شود (Raeisi Sadati *et al.*, 2022). افزایش غلظت پروتئین‌های کل، تغییرات بیان ژن‌ها و تغییر در ساختار بافت‌های گیاهی را نشان می‌دهد (Al Murad *et al.*, 2020). در مطالعات انجام شده افزایش محتوای پروتئین کل در پنبه تحت تنش شوری گزارش شد (Candan *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2020). می‌توان گفت افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تحت تنش کمبود آب، احتمالاً مانع از تجزیه پروتئین‌های گیاهی در تنش خشکی شده است (Al Murad *et al.*, 2020).

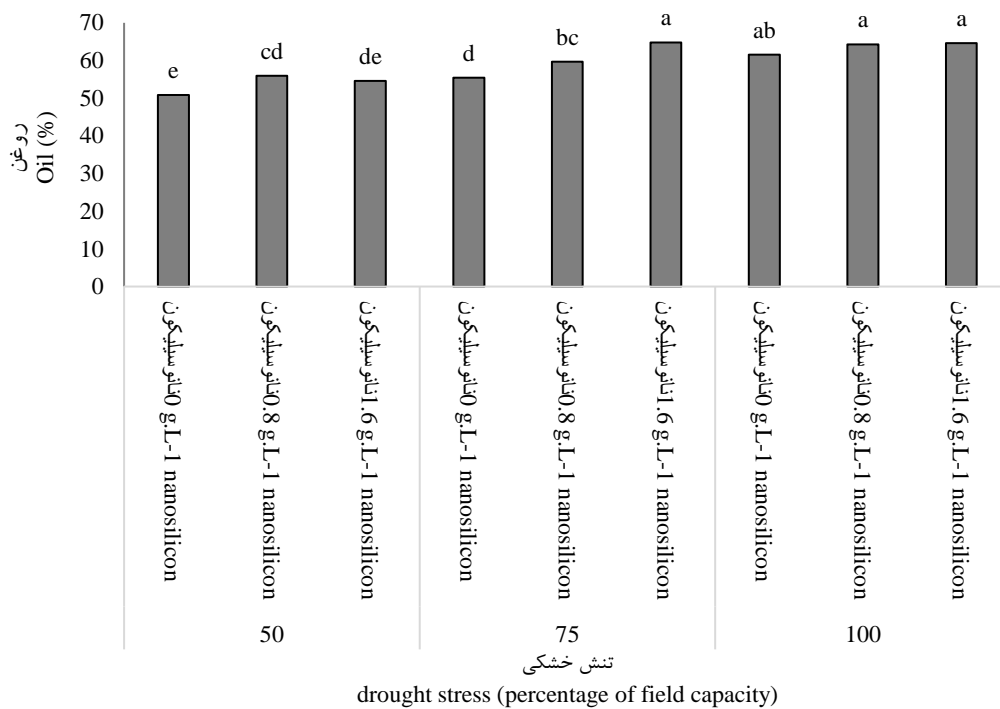
استفاده از نانوسیلیکون و نانوآکسید روی می‌تواند باعث افزایش جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه شود. این نانوموادها می‌توانند عناصر مغذی را در دسترس گیاه قرار دهند و ترکیباتی را فراهم کنند که باعث بهبود جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر عناصر غذایی توسط گیاه می‌شوند. این عناصر غذایی در ترکیبات پروتئینی نقش مهمی دارند و افزایش جذب آنها منجر به افزایش مقدار پروتئین در دانه‌ها می‌شود (Dimkpa *et al.*, 2020; Ahmed *et al.*, 2021).

نانوآکسید روی و نانوسیلیکون می‌توانند فعالیت هورمون‌های رشد گیاه را تنظیم کنند. این نانوموادها می‌توانند فعالیت هورمون‌های رشد را افزایش داده و تنظیم‌کننده‌های جهش ژنتیکی را فعال کنند. هورمون‌های رشد و تنظیم‌کننده‌های جهش ژنتیکی نقش مهمی در فرآیندهای بیولوژیکی گیاهان ایفا می‌کنند، از جمله تولید و سنتز پروتئین‌ها. بنابراین، با افزایش فعالیت هورمون‌های رشد و تنظیم‌کننده‌های جهش ژنتیکی، تولید پروتئین در گیاهان افزایش می‌یابد (Raeisi Sadati *et al.*, 2022). نانوآکسید روی و نانوسیلیکون می‌توانند منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های ترکیب‌کننده و تنظیم‌کننده تولید مواد مؤثر در گیاهان شود. آنزیم‌ها نقش مهمی در فرآیند

کارایی مصرف آب آبیاری

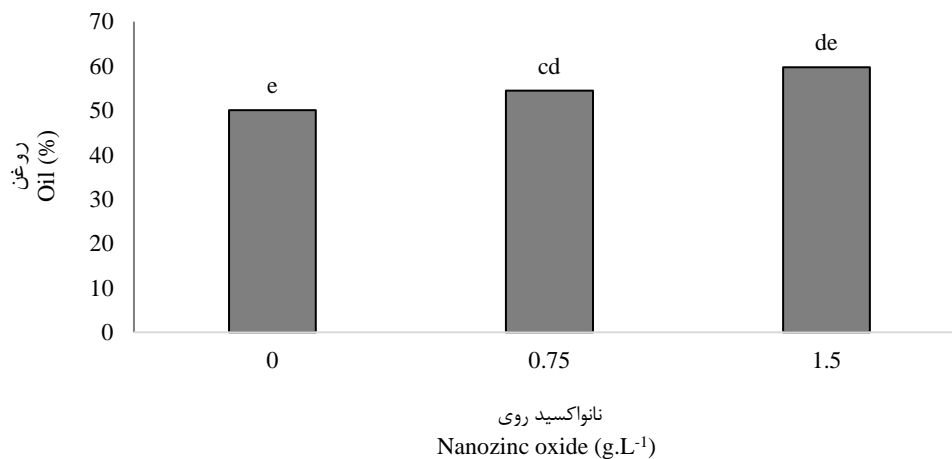
نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری در تیمار تنش خشکی شدید و مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۱/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری نرمال و عدم مصرف نانو اکسید روی به دست آمد. در سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف نانو اکسید روی و موجب افزایش این شاخص شد

(شکل ۸). نتایج در خصوص اثر متقابل کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری در تیمار مصرف ۱/۶ گرم در لیتر کود نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۱/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار عدم مصرف نانو سیلیکون و نانو اکسید روی به دست آمد. با افزایش مصرف کود نانو سیلیکون پاسخ به نانو اکسید روی نیز افزایش یافت (شکل ۹).



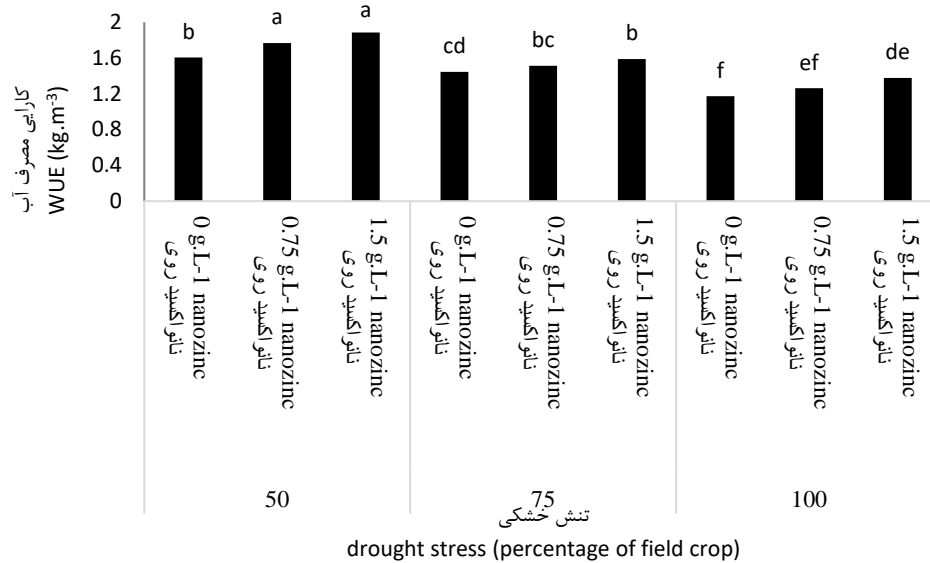
شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانو سیلیکون بر روغن

Figure 6- Comparison of the average interaction effect of nanosilicon and nanosilicon on oil



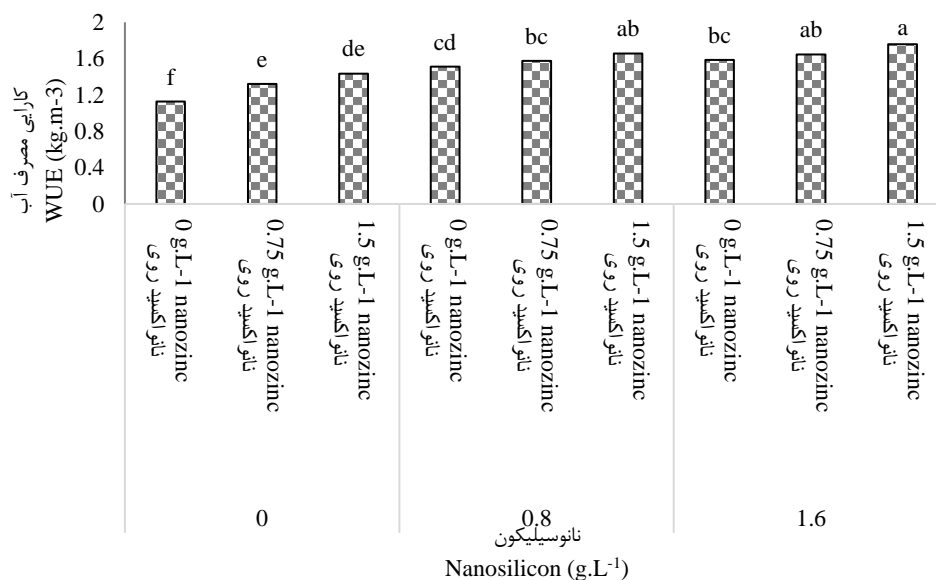
شکل ۷- مقایسه میانگین اثر اصلی نانو اکسید روی بر عملکرد روغن

Figure 7- Comparison of the average main effect of nano zinc oxide on oil



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانوآکسید روی بر کارایی مصرف آب

Figure 8- Comparison of the average interaction effect of drought stress and nanozinc oxide on WUE



شکل ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوسیلیکون و نانوآکسید روی بر کارایی مصرف آب

Figure 9- Comparison of the average interaction effect of nanosilicon and nanozinc oxide on WUE

(Azarfam *et al.*, 2021; Umair Hassan *et al.*, 2020; Seroka *et al.*, 2022). استفاده از نانوسیلیکون در گیاهان عدس می‌تواند بهبود قابل توجهی در کارایی مصرف آب داشت. نانوسیلیکون باعث افزایش محتوای رطوبتی خاک و مقاومت گیاه در برابر تبخیر آب می‌شود، همچنین تنظیم‌کننده‌های هورمونی رشد گیاهان را فعال کرده و باعث افزایش استفاده بهینه از آب توسط گیاه می‌شود. (Benslima *et al.*, 2021). یک مطالعه نشان داد که استفاده از نانوآکسید روی در

نانوسیلیکون باعث افزایش ترمیم سریع میزان ضریب تبخیر و تعرق گیاهان در شرایط خشکی شدید می‌شود، که در نتیجه به کاهش مصرف آب توسط گیاهان منجر می‌شود (Seroka *et al.*, 2022). استفاده از نانوسیلیکون در گیاهان ذرت توانست تأثیر مثبتی بر رشد و توسعه گیاهان تحت تنش خشکی داشته باشد. نانوسیلیکون باعث افزایش محتوای آبی در گیاهان، بهبود حفظ رطوبت خاک و کاهش تبخیر آب از سطح برگ‌ها می‌شود که باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاهان می‌شود

سویا، می‌توان به طور مؤثری عملکرد دانه را تحت شرایط تنش خشکی افزایش داد و مقادیر روغن و پروتئین را نیز افزایش داد. احتمالاً نانوسیلیکون و نانواکسید روی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در سنتز روغن و پروتئین در گیاه سویا می‌شوند. این نانومواد تنظیم‌کننده‌های هورمونی رشد گیاه را فعال می‌کنند و عواملی مانند جذب بهتر عناصر غذایی و کاهش تبخیر آب را بهبود می‌بخشند، که همگی به افزایش عملکرد دانه و افزایش مقدار روغن و پروتئین در گیاه سویا کمک می‌کنند. به طور خلاصه، استفاده از نانوسیلیکون و نانواکسید روی در گیاه سویا بهبود قابل توجهی در عملکرد دانه و افزایش مقادیر روغن و پروتئین این گیاه به ارمغان می‌آورد. این نتایج می‌توانند در بهبود تولید و کیفیت محصولات مبتنی بر گیاه سویا مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از سایر مقادیر نانوسیلیکون یا نانواکسید روی استفاده گردد تا بهترین مقدار را شناسایی کرد، همچنین از سایر نانومواد نیز استفاده شود تا اثر آن‌ها با نانوسیلیکون یا نانواکسید روی مقایسه گردد.

References

- Abdelaal, K.A., Mazrou, Y.S. and Hafez, Y.M., 2020. Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield. *Plants*, 9(6), 733. <https://doi.org/10.3390/plants9060733>
- Ahanger, M.A., Bhat, J.A., Siddiqui, M.H., Rinklebe, J. and Ahmad, P., 2020. Integration of silicon and secondary metabolites in plants: a significant association in stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 71, pp.6758–6774. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa291>
- Ahmed, T., Noman, M., Manzoor, N., Shahid, M., Abdullah, M. and Ali, L., 2021. Nanoparticle-based amelioration of drought stress and cadmium toxicity in rice via triggering the stress responsive genetic mechanisms and nutrient acquisition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209, 111829. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111829>
- Al Murad, M., Khan, A.L. and Muneer, S., 2020. Silicon in horticultural crops: cross-talk, signaling, and tolerance mechanism under salinity stress. *Plants*, 9(4), 460. <https://doi.org/10.3390/plants9040460>
- Alam, A., Hariyanto, B., Ullah, H., Salin, K.R. and Datta, A., 2021. Effects of silicon on growth, yield and fruit quality of cantaloupe under drought stress. *Silicon*, 13, pp.3153–3162. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00673-1>
- Alamri, S., Hu, Y., Mukherjee, S., Aftab, T., Fahad, S. and Raza, A., 2020. Silicon-induced postponement of leaf senescence is accompanied by modulation of antioxidative defense and ion homeostasis in mustard (*Brassica*

گیاهان گندم می‌تواند بهبود قابل توجهی در کارایی مصرف آب داشته باشد. نانواکسید روی باعث افزایش ترمیم سریع میزان ضریب تبخیر و تعرق گیاهان در شرایط خشکی می‌شود، که منجر به کاهش مصرف آب توسط گیاهان می‌شود و بهبود در مقاومت گیاهان به تنش خشکی را فراهم می‌کند (Tondey et al., 2020; Hassan et al., 2021). نانواکسید روی باعث افزایش محتوای رطوبتی خاک و مقاومت گیاه در برابر تبخیر آب می‌شود، که باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاهان تحت تنش خشکی می‌شود (Noohpisheh et al., 2021). نانواکسید روی باعث افزایش ترمیم سریع میزان ضریب تبخیر و تعرق گیاهان در شرایط خشکی می‌شود، که به کاهش مصرف آب توسط گیاهان و افزایش مقاومت آنها در مقابل تنش خشکی منجر می‌شود (Tondey et al., 2021; Hassan et al., 2020).

نتیجه‌گیری کلی

بطور کلی نتایج نشان داد که با استفاده از ۱/۶ گرم در لیتر نانوسیلیکون یا مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانواکسید روی در گیاه

- juncea*) seedlings exposed to salinity and drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 157, pp.47–59. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.038>
- Aqaei, P., Weisany, W., Diyanat, M., Razmi, J. and Struik, P.C., 2020. Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(8), pp.1205–1216. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727508>
- Arif, Y., Singh, P., Bajguz, A., Alam, P. and Hayat, S., 2021. Silicon mediated abiotic stress tolerance in plants using physio-biochemical, omic approach and cross-talk with phytohormones. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, pp.278–289. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.002>
- Ashkiani, A., Sayfzadeh, S., Shirani Rad, A.H., Valadabadi, A. and Hadidi Masouleh, E., 2020. Effects of foliar zinc application on yield and oil quality of rapeseed genotypes under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(11), pp.1594–1603. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1739299>
- Azarfam, S., Nadian, H., Moezzi, A. and Gholami, A., 2020. Effect of silicon on phytochemical and medicinal properties of aloe vera under cold stress. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(1), pp.561–575. https://doi.org/10.15666/aeer/1801_561575
- Bahamin, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Behashti, S., 2021. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on yield and nutrient efficiency indices in maize under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(3), pp.675–690. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.3095.1793>
- Bahamin, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Beheshti, S., 2019. Effect of biological and chemical fertilizers of nitrogen and phosphorus on quantitative and qualitative productivity of maize under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1), pp.123–139. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2018.1152.1235>
- Banerjee, A., Singh, A., Sudarshan, M. and Roychoudhury, A., 2021. Silicon nanoparticle-pulsing mitigates fluoride stress in rice by fine-tuning the ionic and metabolomic balance and refining agronomic traits. *Chemosphere*, 262, 127826. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127826>
- Basu, S. and Kumar, G., 2021. Exploring the significant contribution of silicon in regulation of cellular redox homeostasis for conferring stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, pp.393–404. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.005>
- Behera, S.K., Shukla, A.K., Singh, M.V., Wanjari, R.H. and Singh, P., 2015. Yield and zinc, copper, manganese and iron concentration in maize (*Zea mays* L.) grown on vertisol as influenced by zinc application from various zinc fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*, 38(10), pp.1544–1557. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.992537>
- Benslimam, W., Zorrig, W., Bagues, M., Abdelly, C. and Hafsi, C., 2021. Silicon mitigates potassium deficiency in *Hordeum vulgare* by improving growth and photosynthetic activity but not through polyphenol accumulation and the related antioxidant potential. *Soil and Plant Analysis*, 52(7), pp.689–706. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05188-1>

- Bhardwaj, S. and Kapoor, D., 2021. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, pp.1044–1053. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.027>
- Bijanzadeh, E., Barati, V. and Egan, T. P., 2022. Foliar application of sodium silicate mitigates drought stressed leaf structure in corn (*Zea mays* L.). *South African Journal of Botany*, 147, pp.8–17. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.032>
- Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), pp.248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Candan, N., Cakmak, I. and Ozturk, L., 2018. Zinc-biofortified seeds improved seedling growth under zinc deficiency and drought stress in durum wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(3), pp.388–395. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800014>
- Cao, B.L., Ma, Q. and Xu, K., 2020. Silicon restrains drought-induced ROS accumulation by promoting energy dissipation in leaves of tomato. *Protoplasma*, 257, pp.537–547. <https://doi.org/10.1007/s00709-019-01449-0>
- Chattha, M.U., Hassan, M.U., Khan, I., Chattha, M.B., Mahmood, A., Nawaz, M., Subhani, M.N., Kharal, M. and Khan, S., 2017. Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency. *Frontiers in Plant Science*, 8, 281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00281>
- Coblentz, W., Akins, M., Cavadini, J. and Jokela, W., 2017. Net effects of nitrogen fertilization on the nutritive value and digestibility of oat forages. *Journal of Dairy Science*, 100(3), pp.1739–1750. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12027>
- Dimkpa, C.O., Andrews, J., Fugice, J., Singh, U., Bindraban, P.S. and Elmer, W.H., 2020. Facile coating of urea with low-dose ZnO nanoparticles promotes wheat performance and enhances Zn uptake under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 11, 168. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00168>
- Dimkpa, C.O., Singh, U., Bindraban, P.S., Elmer, W.H., Gardea-Torresdey, J.L. and White, J.C., 2019. Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. *Science of the Total Environment*, 688, pp.926–934. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.392>
- Fathi, A., Maleki, A. and Naseri, R., 2022. A review of the effects of drought stress on plants and some effective strategies in crop management. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, pp.1–29. [In Persian]. <https://doi.org/10.30495/iper.2022.1944163.1744>
- Ghadirnezhad Shiade, S.R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E. and Pessarakli, M., 2023. Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—A review. *Journal of Plant Nutrition*, 46(9), pp.2198–2230. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720>
- Ghorbanpour, M., Mohammadi, H. and Kariman, K., 2020. Nanosilicon-based recovery of barley (*Hordeum vulgare*) plants subjected to drought stress. *Environmental Science: Nano*, 7(2), pp.443–461. <https://doi.org/10.1039/C9EN00973F>

- Hassan, A.Z., Mahmoud, A.W.M., Turkey, G.M. and Safwat, G., 2020. Rice husk derived biochar as smart material loading nano nutrients and microorganisms. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 26, pp.309–322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163968>
- Ji, Y., Yue, L., Cao, X., Chen, F., Li, J., Zhang, J. and Xing, B., 2023. Carbon dots promoted soybean photosynthesis and amino acid biosynthesis under drought stress: Reactive oxygen species scavenging and nitrogen metabolism. *Science of The Total Environment*, 856, 159125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159125>
- Kareem, H.A., Adeel, M., Azeem, M., Ahmad, M.A., Shakoor, N., Hassan, M.U. and Wang, Q., 2023. Antagonistic impact on cadmium stress in alfalfa supplemented with nano-zinc oxide and biochar via upregulating metal detoxification. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 130309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159125>
- Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y. and Guo, T., 2017. Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 8, 860. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00860>
- Maleki, A., Fathi, A. and Bahamin, S., 2020. The effect of gibberellin hormone on yield, growth indices, and biochemical traits of corn (*Zea mays* L.) under drought stress. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 15(59), pp.1–16. [In Persian]. <https://doi.org/10.1001.1.76712423.1399.15.59.1.8>
- Nelson, D. and Sommers, L.E., 1983. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties* (Vol. 9, pp.539–579). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Noohpisheh, Z., Amiri, H., Mohammadi, A. and Farhadi, S., 2021. Effect of the foliar application of zinc oxide nanoparticles on some biochemical and physiological parameters of *Trigonella foenum-graecum* under salinity stress. *Plant Biosystems*, 155, pp.267–280. <https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1739160>
- Raeisi Sadati, S.Y., Jahanbakhsh Godehkahriz, S., Ebadi, A. and Sedghi, M., 2022. Zinc oxide nanoparticles enhance drought tolerance in wheat via physio-biochemical changes and stress genes expression. *Iranian Journal of Biotechnology*, 20(1), 3027. [In Persian]. <https://doi.org/10.30498/ijb.2021.280711.3027>
- Seroka, N.S., Taziwa, R.T. and Khotseng, L., 2022. Extraction and synthesis of silicon nanoparticles (SiNPs) from sugarcane bagasse ash: A mini-review. *Applied Sciences*, 12(5), 2310. <https://doi.org/10.3390/app12052310>
- Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., Pirzad, A. and Anwar, S., 2020. Effects of biofertilizers and nano zinc-iron oxide on yield and physicochemical properties of wheat under water deficit conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(19), pp.2511–2524. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1845350>
- Shi, S., Xu, X., Feng, J., Ren, Y., Bai, X. and Xia, X., 2023. Preparation of NH₃- and H₂S-sensitive intelligent pH indicator film from sodium alginate/black soybean seed coat anthocyanins and its use in monitoring meat freshness. *Food Packaging and Shelf Life*, 35, 100994. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100994>

- Sultana, S., Naser, H.Á., Shil, N., Akhter, S. and Begum, R., 2016. Effect of foliar application of zinc on yield of wheat grown by avoiding irrigation at different growth stages. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 41(2), pp.323–334. <https://doi.org/10.3329/bjar.v41i2.28234>
- Taheri, F., Maleki, A. and Fathi, A., 2021. Study of different levels of nitrogen fertilizer and irrigation on quantitative and qualitative characteristics of quinoa grain yield. *Crop Physiology Journal*, 13(50), pp.135–149. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2023.353966.1261>
- Tondey, M., Kalia, A., Singh, A., Dheri, G.S., Taggar, M.S., Nepovimova, E. and Kuca, K., 2021. Seed priming and coating by nano-scale zinc oxide particles improved vegetative growth, yield and quality of fodder maize (*Zea mays*). *Agronomy*, 11(4), 729. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040729>
- Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., Nawaz, M., Rasheed, A., Afzal, A. and Liu, Y., 2020. The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, 10(9), 396. <https://doi.org/10.3390/antiox12040854>
- Yaniv, Z., Shabelsky, E. and Schafferman, D., 1999. Colocynth: potential arid land oilseed from an ancient cucurbit. In *Perspectives on New Crops and New Uses* (pp.257–261). ASHS Press. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040729>
- Zabet, M., Bahamin, S., Ghoreishi, S., Sadeghi, H. and Moosavi, S., 2015. Effect of deficit irrigation and nitrogen fertilizer on quantitative yield of aboveground part of forage pear millet (*Pennisetum glaucum*) in Birjand. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 7(2), pp.187–194. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/ESCS.2015.175>

Crop Science Research in Arid Regions

homepage: <https://crops.cscience.uoz.ac.ir/>

Review Article

Volume 7, Issue 1, 2025, P. 179-216

Chickpea (*Cicer arietinum* L.): Achievements and opportunities in response to abiotic stresses and its flexibility to changing weather conditions

Bahman Fazeli-Nasab ^{*a}, Saeedreza Vessal ^a, Abdolreza Bagheri ^a, Saeid Malekzadeh-Shafaroudi ^a

^a Department of Biotechnology and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*Corresponding Author: bfazelinasab@gmail.com

Received: 25 December 2023

Accepted: 26 June 2024

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.431689.1390

How to cite this article:

Fazeli-Nasab, B., Vessal, S., Bagheri, A. and Malekzadeh-Shafaroudi, S., 2025. Chickpea (*Cicer arietinum* L.): Achievements and opportunities in response to abiotic stresses and its flexibility to changing weather conditions. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 179-216. <https://doi.org/10.22034/csrar.2024.431689.1390>

Abstract

Introduction: Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is the second most important leguminous crop that is cultivated in 59 countries of the world with an area of 13.98 million hectares and a production of 13.73 million tons. Chickpeas are cultivated throughout the Mediterranean basin, Central Asia, East Africa, Europe, Australia and North and South America, but mainly in developing countries, where more than 90% of chickpea production is consumed locally. Annual chickpea varieties are obtained from interspecies crosses with cultivated chickpeas and are classified into three gene pools (primary, secondary and tertiary), which indicate their genetic distance from cultivated varieties. Chickpeas have two types of white and usually large Kabuli seeds and colored and usually small desi seeds. In addition to the importance of chickpeas as an important food source in human diet and animal fodder, this plant can have significant importance in soil fertility, especially in rainfed areas and in rotation with cereals. Chickpea is very valuable due to its nutritional quality and health benefits and its ability to improve soil fertility and sustainability of agricultural systems. Due to the fact that chickpeas are often cultivated in marginal lands in a dry land and completely dependent on the moisture stored in the soil and rainfall during the growing season, it is affected by various abiotic stresses during its life cycle. In most cases, such tensions have overlapped each other, resulting in a significant decrease in crop growth and productivity. Plants undergo abiotic stresses through a series of morphological, physiological, biochemical and molecular changes in an attempt to compensate for such adversities.

Materials and Methods: In this article, an attempt has been made to review the method of content analysis by searching the keywords of chickpea, drought stress, living stress, etc., proteomics, genomics, transcriptome analysis, RNA sequencing, hybridization, microarray, chain reaction. Polymerase chain reaction in related articles in Google scholar, Web of science, PubMed and Scopus websites.

Results and Discussion: The extracellular signals that pea plants respond to, such as inositol phosphate, sugars, reactive oxygen species (ROS), calcium ions (Ca²⁺), cyclic nucleotides (cAMP and cGMP), and nitric oxide (NO), are coupled to particular receptors in the plant's stress sensing system.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

As a result of these signals being sent to additional cells, the plant's reaction to stress expands. Chickpea plants have benefited greatly from the activation of crucial antioxidant enzymes by SA, which has helped to reduce oxidative damage brought on by stress. Simultaneously, the development of stress tolerance by SA has also been demonstrated to be significantly influenced by the management of stress effects, particularly in roots where proline and sugar buildup occurs. In chickpea, eight HSP genes—flowering time regulators (efl1, FLD, GI, Myb, SFH3, bZIP, bHLH, and SBP)—have been identified. These genes are critical for the plant's ability to withstand heat stress. QTLs that account for 22.6–48.5% of the phenotypic variations have been found in the genomic areas of LG4 that are related to salinity performance. A QTL responsible for 11.5 to 48.4% of the phenotypic variations in cold stress tolerance has been found in LG8. The primary detrimental impact of cold stress on pea plants is that it results in freezing during cold stress, which severely damages membranes owing to cellular dehydration.

Conclusion: To produce pea plants that can withstand harsh environmental conditions, various genetic improvement techniques must be integrated, and our understanding of the molecular, biochemical, and physiological mechanisms involved in abiotic stress response must be improved. With consideration for the effects of climate change, a more precise and efficient screening/selection of genotypes and/or genes/alleles may help boost grain yield with medium- and long-term implications on chickpea production.

Keywords: Chickpea breeding, Drought stress, Proline, Salicylic acid, Seed priming

نخود (*Cicer arietinum* L.): دستاوردها و فرصت‌ها در تحمل به تنش‌های غیرزنده و انعطاف‌پذیری در شرایط متغیر آب و هوایی

بهمن فاضلی نسب^{۱*}، سعیدرضا وصال^۱، عبدالرضا باقری^۱، سعید ملک زاده شفاوردی^۱

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

* مسئول مکاتبه: bfazelinasab@gmail.com

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.431689.1390

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴

چکیده

در مقاله حاضر، تلاش شده است تا مروری به شیوه تحلیل محتوا با جستجوی کلید واژه‌های نخود، تنش خشکی، تنش‌های زنده و غیره زنده، پروتئومیکس، ژنومیکس، تجزیه ترانسکریپتوم، توالی‌یابی RNA، هیبریداسیون و ریزآرایه در مقاله‌های مرتبط در پایگاه‌های اینترنتی PubMed، Web of science، Google scholar، Scopus و انجام شود. مکانیسم درک تنش در گیاه نخود، شامل، گیرنده‌های خاصی است که به سیگنال‌های برون سلولی خاص (مانند اینوزیتول فسفات، قندها، گونه‌های فعال اکسیژن (Reactive Oxygen Species)، یون‌های کلسیم (Ca^{2+})، نوکلئوتیدهای حلقوی (cAMP و cGMP) و اکسید نیتریک (Nitric oxide)) متصل می‌شوند و از طریق انتقال این سیگنال‌ها به سایر سلول‌ها، نیز پاسخ به تنش فراگیرتر خواهد شد. فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کلیدی توسط سالیسیلیک اسید (Salicylic acid) نقش مهمی در بهبود تنش اکسیداتیو ناشی از تنش در گیاهان نخود داشته است. به موازات آن، مدیریت اثرات تنش، به ویژه در ریشه‌ها با تجمع قندها و پرولین، نیز ثابت شده است که بخشی جدایی‌ناپذیر از توسعه تحمل به تنش توسط SA است. هشت ژن پروتئین‌های شوک حرارتی (Heat Shock Proteins)، تنظیم‌کننده زمان گلدهی (bHLH، bZIP، SFH3، Myb، GI، FLD، efl1) و SBP در نخود گزارش شده‌اند که نقش اساسی در تحمل تنش گرمایی دارند. QTL‌هایی در مناطق ژنومی LG4 و LG8 به ترتیب برای عملکرد در شرایط شوری و سرما، شناسایی شده‌اند که به ترتیب بین ۲۲/۶ تا ۴۸/۵ و ۱۱/۵ تا ۴۸/۴ درصد از تغییرات فنوتیپی را توجیه می‌نمایند. ادغام رویکردهای مختلف بهبود ژنتیکی، درک بهتر مکانیسم‌های مولکولی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی درگیر در پاسخ به تنش‌های غیرزیستی، تولید گیاه نخود متحمل به شرایط محیطی تنش‌زا را ممکن می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح نخود، پرایمینگ بذر، پرولین، تنش خشکی، سالیسیلیک اسید

مقدمه

زراعی، به دست آمده‌اند و به سه خزانه ژنی (نخست، دوم و سوم) دسته‌بندی می‌شوند که نشان‌دهنده فاصله ژنتیکی آن‌ها از گونه‌های کشت‌شده است (Croser et al., 2003). مخزن ژنی نخست، شامل نخود زراعی و نیز گونه‌های اولیه آن (C. reticulatum) است که به راحتی با یکدیگر قابل تلاقی است. نتایج آن‌ها به دلیل جفت شدن کروموزومی خوب کاملاً بارور هستند (Toker et al., 2021). بنابراین، به‌عنوان منبع بالقوه‌ای برای گسترش پایه ژنتیکی و افزایش اجزای عملکرد و صفات تحمل به تنش در خزانه ژنی کشت‌شده عمل می‌کند (Bajaj et al., 2015). مخزن ژن دوم، شامل C. echinospermum است که قابل تلاقی با گونه‌های زراعی است، اما با کاهش باروری هیبریدهای حاصل و نتایج مواجه می‌شوند. در نتیجه، این گونه‌ها اهداکنندگان بالقوه آلل‌های ارزشمند برای بهبود نخود هستند. مخزن ژن سوم شامل گونه‌های باقی‌مانده Cicer

نخود زراعی (*Cicer arietinum* L.)، گیاهی صد درصد خودگرد افشان، دیپلوئید (Fazeli-Nasab et al., 2025)، دارای $2n=2x=16$ کروموزوم و ژنوم نسبتاً کوچکی با حدود ۷۵۰ Mbp است که شامل ۴۹/۴۱ درصد ترانسپوزون و مناطق تکراری (با تکرارهای ۷۴، ۱۰۰ و ۱۶۳ بازی با بیشترین فراوانی به ترتیب با میزان ۱۳، ۳۰ و ۱۸ درصد) می‌باشد (Varshney et al., 2013b; et al., 2009a). خانواده بقولات، ۱۸۰۰۰ گونه و ۶۵۰ جنس دارد (Varshney et al., 2009a; Varshney et al., 2013b) که نخود زراعی، متعلق به جنس Cicer با ۱۰ گونه یک‌ساله و ۳۶ گونه چندساله است. در میان گونه‌های یک‌ساله، *C. arietinum* تنها گونه اهلی و کشت شده در سراسر جهان است (Toker et al., 2021). گونه‌های یک‌ساله نخود، از تلاقی‌های بین‌گونه‌ای با نخود

شامل گونه‌های یک‌ساله مانند *C. judaicum*، *C. bijugum* و *C. pinnatifidum* که نمی‌توان آن‌ها به راحتی با نخودهای زراعی از طریق روش‌های مرسوم تلاقی داد (Singh et al., 2021).

مجموعه جهانی ژرم پلاسسم نخود؛ شامل ۹۹۸۷۷ توده و ۱۴۷۶ نوع *Cicer* وحشی گزارش شده است که در ۱۲۰ بانک ژن پراکنده در ۶۴ کشور نگهداری می‌شوند (Raina et al., 2019).

در کل سه بانک اصلی ژرم پلاسسم نخود عبارت‌اند از: موسسه تحقیقات بین‌المللی محصولات زراعی برای مناطق استوایی نیمه‌خشک (ICRISAT)^۱ با ۱۸۹۶۳ توده در هند، دفتر ملی منابع ژنتیکی گیاهی (NBPGR)^۲ در هند با ۱۵۹۸۶ توده و مرکز بین‌المللی تحقیقات کشاورزی در مناطق خشک (ICARDA)^۳ در لبنان با ۱۳۰۶۵ توده (Waqas et al., 2019). این تعداد زیاد توده‌ها، منبع بزرگی از آلل‌های مطلوب هستند که می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی مربوط به عملکرد دانه و تحمل تنش غیر زیستی گنجانده شوند (Raina et al., 2019). در نخود، صدها رقم پر محصول متحمل به تنش‌های غیر زیستی، به‌طور عمده از طریق روش‌های اصلاحی مرسوم توسعه یافته‌اند (Chaturvedi et al., 2014). می‌توان به فهرستی منتشرشده از ژنوتیپ‌های نخود متحمل به خشکی، گرما، سرما، شوری و سایر تنش‌ها در کارهای قبلی (Jha et al., 2020; Rani et al., 2020) مراجعه کرد.

در ایران همانند سایر کشورهای در حال توسعه، نخود نقش مهمی در نظام کشت سنتی ایفا می‌کند (Kanooni and Malhotra, 2003). علاوه بر اهمیت نخود به‌عنوان یک منبع غذایی مهم در رژیم غذایی انسان و علوفه دام، این گیاه می‌تواند اهمیت چشمگیری در حاصلخیزی خاک به‌ویژه در مناطق دیم و در تناوب با غلات داشته باشد (Grabherr et al., 2011).

نخود در ۵۵ کشور دنیا و در سراسر حوزه مدیترانه، آسیای مرکزی، شرق آفریقا، اروپا، استرالیا و آمریکای شمالی و جنوبی اما عمدتاً در کشورهای در حال توسعه کشت می‌شود، جایی که بیش از ۹۰ درصد تولید نخود به‌صورت محلی مصرف می‌شود (Arriagada et al., 2022). طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶، تولید کلی نخود در جهان، با ۲۳ درصد افزایش در سطح و ۱۷ درصد افزایش در عملکرد، در کل ۴۴ درصد افزایش یافته است. در میان ۱۲ کشور برتر تولیدکننده نخود، افزایش قابل توجه تولید نخود در روسیه (۱۱۸۹٪)، استرالیا (۳۲۶٪)، تانزانیا

شامل گونه‌های یک‌ساله مانند *C. judaicum*، *C. bijugum* و *C. pinnatifidum* که نمی‌توان آن‌ها به راحتی با نخودهای زراعی از طریق روش‌های مرسوم تلاقی داد (Singh et al., 2021).

مجموعه جهانی ژرم پلاسسم نخود؛ شامل ۹۹۸۷۷ توده و ۱۴۷۶ نوع *Cicer* وحشی گزارش شده است که در ۱۲۰ بانک ژن پراکنده در ۶۴ کشور نگهداری می‌شوند (Raina et al., 2019). در کل سه بانک اصلی ژرم پلاسسم نخود عبارت‌اند از: موسسه تحقیقات بین‌المللی محصولات زراعی برای مناطق استوایی نیمه‌خشک (ICRISAT)^۱ با ۱۸۹۶۳ توده در هند، دفتر ملی منابع ژنتیکی گیاهی (NBPGR)^۲ در هند با ۱۵۹۸۶ توده و مرکز بین‌المللی تحقیقات کشاورزی در مناطق خشک (ICARDA)^۳ در لبنان با ۱۳۰۶۵ توده (Waqas et al., 2019). این تعداد زیاد توده‌ها، منبع بزرگی از آلل‌های مطلوب هستند که می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی مربوط به عملکرد دانه و تحمل تنش غیر زیستی گنجانده شوند (Raina et al., 2019). در نخود، صدها رقم پر محصول متحمل به تنش‌های غیر زیستی، به‌طور عمده از طریق روش‌های اصلاحی مرسوم توسعه یافته‌اند (Chaturvedi et al., 2014). می‌توان به فهرستی منتشرشده از ژنوتیپ‌های نخود متحمل به خشکی، گرما، سرما، شوری و سایر تنش‌ها در کارهای قبلی (Jha et al., 2020; Rani et al., 2020) مراجعه کرد.

واویلوف، هلال حاصلخیز (در حال حاضر جنوب شرقی ترکیه و سوریه، غرب ایران و شرق عراق؛ شکل ۱) و منطقه مدیترانه را به‌عنوان مراکز اولیه انتشار نخود پیشنهاد کرده است (Vavilov, 1926). در حالی که مراکز ثانویه انتشار آن، آسیای جنوبی و اقیانوس هند (Van der Maesen, 1987). مطالعه جامعی بر اساس توالی یابی مجدد کل ژنوم، از ۴۲۹ لاین نمونه‌برداری شده از ۴۵ کشور، نشان داده است که مسیر مهاجرت نخود از منطقه مدیترانه/ هلال حاصلخیز به جنوب آسیا (هند) و سپس به شرق آفریقا و آسیای مرکزی و به‌موازات اتفاق افتاده است. مهاجرت به آمریکا نیز از آسیای مرکزی یا شرق آفریقا به‌جای حوضه مدیترانه به‌تنهایی رخ داد

³ International Center for Agricultural Research in the Dry Areas

⁴ Kabuli

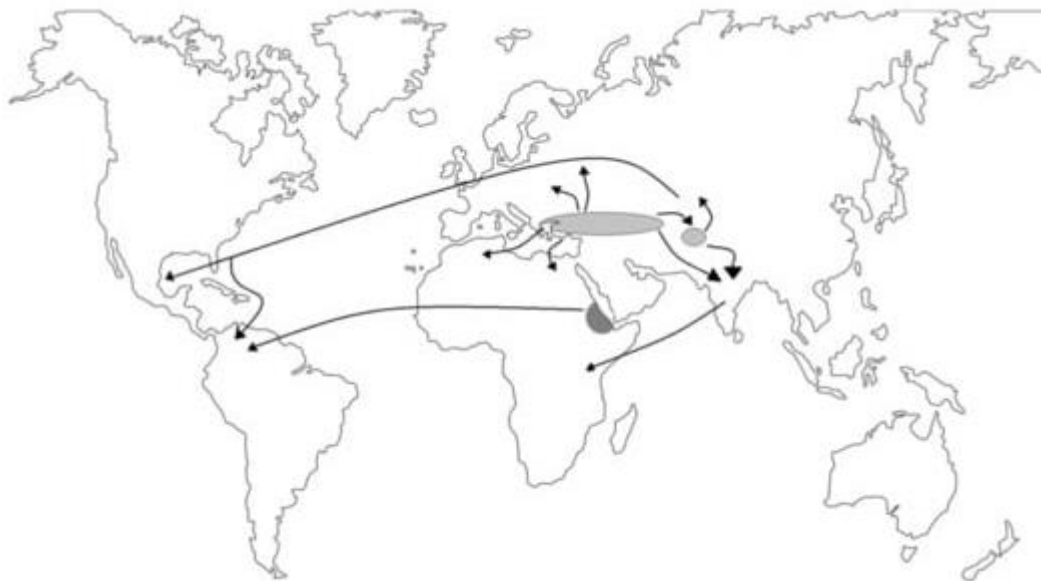
⁵ desi

¹ International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics

² National Bureau of Plant Genetic Resources

چشمگیری داشته‌اند. منطقه اصلی تولید و مصرف نخود، شبه‌قاره هند (هند، پاکستان، میانمار، بنگلادش و نپال) است که تقریباً ۷۰ درصد از تولید جهان را به خود اختصاص می‌دهد. علاوه بر این، ترکیه، استرالیا، اتیوپی، ایران، مکزیک، کلمبیا و آمریکا از دیگر کشورهایی هستند که تولید نخود بالایی دارند (شکل ۲ و ۳) (Arriagada et al., 2022).

(۲۲۲٪)، اتیوپی (۱۴۱٪)، ایالات متحده (۱۴۱٪)، میانمار (۱۰۶٪) و هند (۴۷٪) رخ داده است (Gaur et al., 2019). همچنین، برخی از این کشورها در عملکرد و بهره‌وری نخود مانند اتیوپی (۲ تن در هکتار)، کانادا (۱/۸ تن در هکتار)، مکزیک (۱/۷ تن در هکتار)، میانمار (۱/۵ تن در هکتار)، استرالیا (۱/۳ تن در هکتار) و ترکیه (۱/۲ تن در هکتار)، پیشرفت



شکل ۱- مبدأ نخود زراعی (*C. arietinum* L.) و انتشار بعدی آن در سراسر جهان (Croser et al., 2003). (○) مراکز اولیه انتشار بر اساس واولیوف (Vavilov, 1926)، (●) مرکز ثانویه انتشار بر اساس واولیوف (Vavilov, 1926)، (-) مسیرهای مهاجرت بر اساس مطالعات وارشنی و همکاران (Varshney et al., 2019b).

Figure 1- The origin of field pea (*C. arietinum* L.) and its subsequent distribution around the world (Croser et al., 2003), (○); primary centers of diffusion based on Vavilov (Vavilov, 1926), (●); secondary centers of diffusion based on Vavilov (Vavilov, 1926), (-); migration routes based on the studies of Varshani et al. (Varshney et al., 2019b).

زیر کشت نسبتاً بالا (۶۶۰ هزار هکتار)، عملکرد آن از میانگین جهانی بسیار پایین‌تر (متوسط عملکرد ۴۹۵ کیلوگرم در هکتار) است (FAO, 2023).

تنش، با برهم زدن تعادل بین تولید و حذف گونه‌های فعال اکسیژن (Reactive Oxygen Species (ROS)) که متابولیسم طبیعی گیاه نخود را از طریق آسیب غشا، پراکسیداسیون لیپیدی و دنا توره شدن پروتئین‌ها تغییر می‌دهد، هموستاز ردوکس را مختل می‌کند. برای کاهش این ROS، گیاهان آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی خود مانند سوپر اکسید دیسموتاز^۱ (SOD)، کاتالاز^۲ (CAT)، گوایاکول پراکسیداز^۳ (GPOX)،

نخود، با سطح زیر کشت جهانی ۱۴/۸۴ میلیون هکتار، تولید ۱۵/۰۸ میلیون تن و میانگین عملکرد ۱/۰۱ تن در هکتار در سال ۲۰۲۰، دومین محصول مهم حبوبات در سراسر جهان (در ۵۹ کشور تولیدکننده نخود) گزارش شده است (Roorkiwal et al., 2020). نخود در شرایط دیم (با وجود تنش‌های زیستی و غیر زیستی) با میانگین عملکرد حدود یک تن در هکتار، بسیار کمتر از پتانسیل آن (۶ تن در هکتار در شرایط بهینه) تولید می‌شود. اثرات منفی و ترکیبی خشکی، گرما، سرما و شوری بر بهره‌وری نخود تأثیر منفی می‌گذارد (Arriagada et al., 2022). در ایران نیز به‌رغم سطح

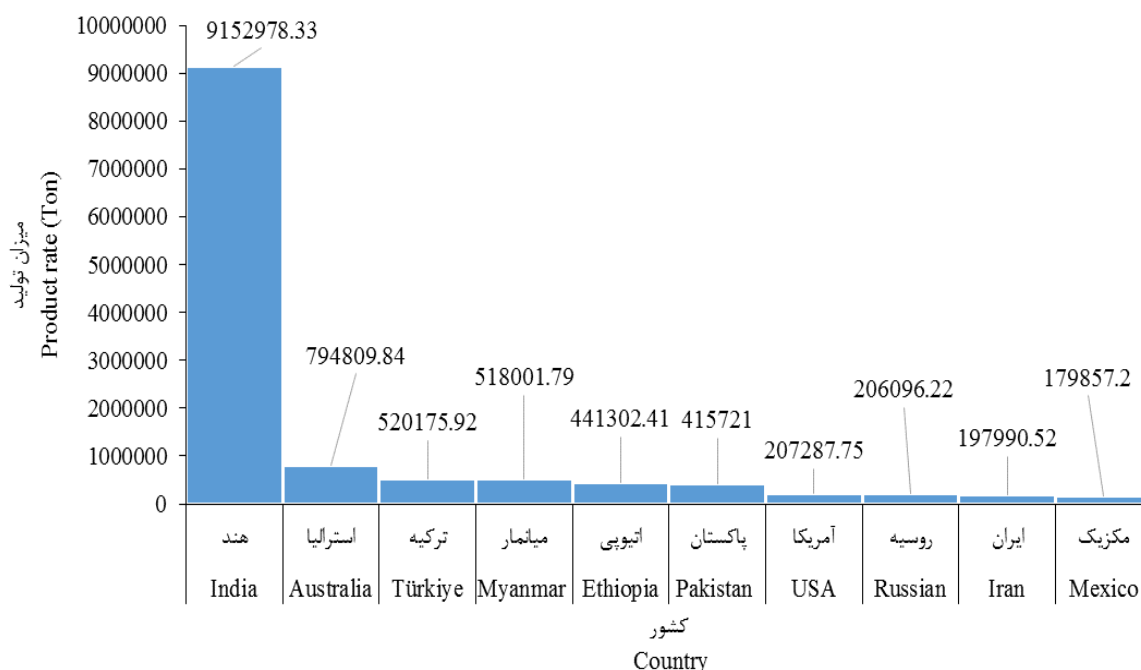
³ Guaiacol Peroxidase (GPOX)

¹ Superoxide Dismutase (SOD)

² Catalase (CAT)

ردوکتاز، MDHAR و دهیدروآسکوربات ردوکتاز؛ DHAR، آنتی‌اکسیدان‌ها (GSH و آسکوربات) و آمینواسیدهای پاسخگو به تنش (سیستئین و پرولین) را افزایش داده است (Kumar *et al.*, 2021). در تحقیقی، پرایمینگ بذر اسید سالیسیلیک (SA) و قارچ‌های میکوریزی آربوسکولار (AM) با حفظ تعادل ردوکس، تحمل تنش را در نخود ایجاد کرده است (Bharti *and Garg*, 2019). هر چند، مکانیسم‌های اساسی پشت پاسخ‌های دفاعی با واسطه SA تحت تنش غیرزیستی، به‌ویژه در نخود، نامشخص است (Kaur *et al.*, 2022). با این حال، پیش‌خیساندن (پرایمینگ) در SA باعث حفظ زیست‌توده، کارایی فتوسنتزی، توقف پیری گره و کاهش تنش اکسیداتیو از طریق مهار ROS شده و در نتیجه بهره‌وری را به شیوه‌ای وابسته به ژنوتیپ افزایش داده است. در کل، استفاده از پرایمینگ بذر با SA به‌عنوان یک رویکرد سازگار با محیط‌زیست برای بهبود تحمل به تنش غیرزیستی و تولید پایدار ژنوتیپ‌های نخود تأکید شده است (Kaur *et al.*, 2022).

آنزیم‌های چرخه آسکوربات-گلوتاتیون^۱ (ASA-GSH)، آسکوربات پراکسیداز^۲ (APOX)، مونودوکسیل آسکوربات^۳ (MDHAR)، دهیدروآسکوربات ردوکتاز^۴ (DHAR) و گلوتاتیون ردوکتاز^۵ (GR) را تولید می‌کنند (Bharti *and Garg*, 2019). گلوتاردوکسین‌ها (Grxs)، اکسیدوردوکتازهایی با واسطه گلوتاتیون (GSH) کوتاه و غنی از سیستئین هستند. در تحقیقی (Kumar *et al.*, 2021)، یک ژن گلوتاردوکسین [LOC101493651 (CaGrx)] نخود (*C. arietinum* L) بر اساس آزمایش‌های غربالگری با دو رقم متضاد نخود، PUSA-362 (محمل به خشکی) و ICC-1882 (حساس به خشکی) انتخاب شده است. در شرایط تنش خشکی، رقم متحمل، بیان ژن CaGrx بالاتری را در مقایسه با رقم حساس نشان داده است. بیان بیش‌ازحد CaGrx باعث افزایش فعالیت گلوتاردوکسین شده که آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (گلوتاتیون ردوکتاز، GR، گلوتاتیون پراکسیداز، GPX، کاتالاز، CAT، آسکوربات پراکسیداز، APX، گلوتاتیون-S-ترانسفراز، GST، مونوکسیداز، سوپراکسیداز، GR، گلوتاتیون پراکسیداز، کاتالاز،



شکل ۲- میانگین تولید نخود (تن) در طول سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ در کشورهای برتر تولیدکننده نخود (FAOSTAT, 2023)

Figure 2- Average chickpea production (tons) during the years 2010 to 2021 in the top chickpea producing countries (FAOSTAT, 2023)

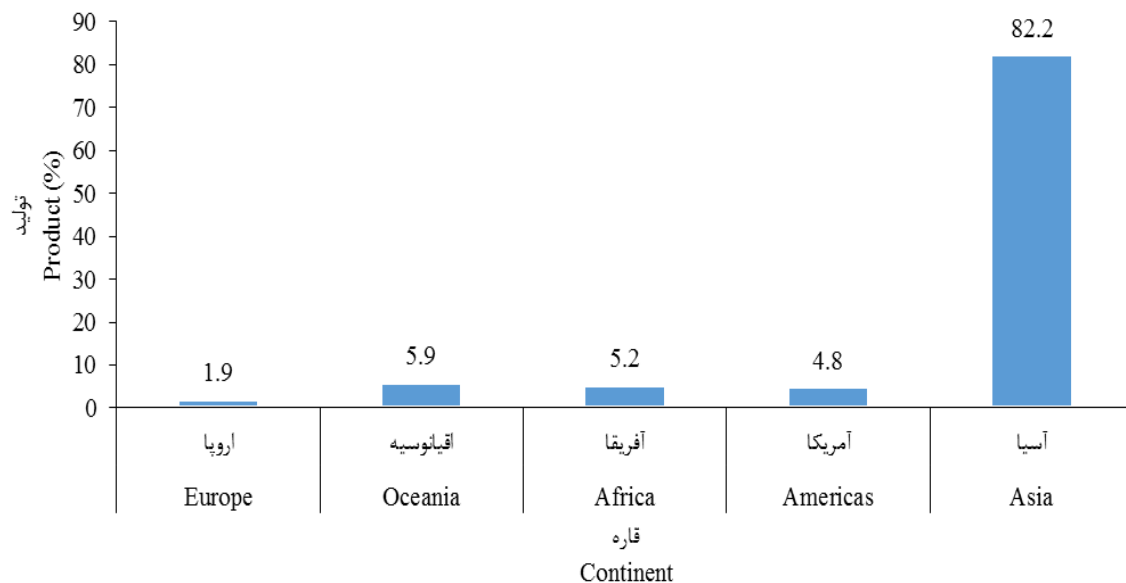
⁴ Dehydroascorbate Reductase (DHAR)

⁵ Glutamine Reductase (GR)

¹ Ascorbate–Glutathione (ASA-GSH)

² Ascorbate Peroxidase (APOX)

³ Monodehydroascorbate Reductase (MDHAR)



شکل ۳- میانگین تولید نخود در طول سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ در قاره‌های مختلف (FAOSTAT, 2023)

Figure 3- Average chickpea production during the years 2010 to 2021 in different continents (FAOSTAT, 2023)

سنگین و pH نامطلوب خاک و غیره) و یا زنده (بیمارگرها، آفات و علف‌ها) باشند (Raza et al., 2023; Soln and Koce, 2022). کشاورزی پایدار مدیریت و بهره‌برداری از تنوع زیستی، بهره‌وری و بازسازی اکوسیستم کشاورزی است به طوری که ظرفیت، قدرت و توانایی عملکرد آن به گونه‌ای حفظ شود که در شرایط فعلی و آتی در سطح زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در سطح محلی و جهانی به اکوسیستم و به دیگران آسیب وارد نشود. از جمله چالش‌هایی که در این راستا در سال‌های اخیر ایجاد شده، عبارت‌اند از: الف) رشد سریع جمعیت انسانی، ب) تغییر آب‌وهوای جهانی، ج) افزایش هزینه‌های غیرقابل احیاء منابع محیط‌زیست، و د) جهانی‌سازی. بنابراین مهم است که برای افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول، روش‌های جایگزینی بکار گرفته شوند که ضمن کنترل تنش‌های زنده و غیرزنده آسیبی به محیط‌زیست وارد نشود (Abbass et al., 2022; Wang et al., 2022).

تنش‌های محیطی و رشد نخود

گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی به دلیل وابستگی شدید انسان به منابع طبیعی بوده که این وابستگی، بهره‌وری محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارد و حتی ممکن است زمین‌های قابل کشت را تخریب کند و نهایت این امر،

بهره‌وری نخود در طول سال‌های مختلف (از سال ۱۹۶۱ به بعد) به طور پیوسته افزایش یافته است، اما حساسیت آن به تنش‌های زیستی و غیر زیستی نیز افزایش یافته است که احتمالاً به دلیل استفاده تکراری و محدود از ژرم‌پلاسماها و والدین اهداکننده باشد (Upadhyaya et al., 2017). تنش‌های خشکی و گرمایی می‌توانند عملکرد نخود را تا ۷۰ درصد کاهش دهند (Varshney et al., 2014). نخود، همچنین به تنش‌های زیستی (مانند پوسیدگی ریشه، پوسیدگی طوقه، پژمردگی فوزاریوم، سوختگی آسکوشیتا، کپک خاکستری بوتریتیس، Helicoverpa و علف‌های هرز فصلی) حساس است (Li et al., 2015). در کل چالش‌های ناشی از تنش‌های مختلف زیستی و غیر زیستی باید به منظور افزایش بهره‌وری نخود مورد توجه قرار گیرد.

تنش

تنش به هرگونه تغییر فیزیکی و شیمیایی گفته می‌شود که به وسیله عوامل برهم زنده تعادل ایجاد می‌شود تا بین عملکرد بالقوه و واقعی تفاوت محسوسی مشاهده شود. عواملی که در کاهش عملکرد سهیم هستند به نام عوامل تنش‌ی خوانده می‌شوند. ماهیت این عوامل می‌تواند غیرزنده (خشکی، شوری، دمای بالا، سرما، یخ‌زدگی، کمبود مواد مغذی، آلودگی فلزات

پروتئین در بافت‌های مختلف گیاهی تحت شرایط تنش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پروتئین‌ها، محصول عملکردی یک ژن هستند و مطالعه در سطح پروتئین برای درک مکانیسم و یافتن پروتئین و ژن مناسب برای بهبود بیشتر محصول مفید است (Keerthi Sree et al., 2023).

در حالت کلی، گیاهان در شرایط مزرعه با ترکیبی از تنش‌های غیر زیستی مختلف مواجه می‌شوند که برای رشد و تولید گیاه مضر است. وقوع هم‌زمان تنش‌های سرما و خشکی در گیاهان به دلیل تغییرات شدید و سریع آب و هوای جهانی، می‌تواند واکنش‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و مولکولی را تغییر دهد. این دو تنش به دلیل آسیب‌های فیزیکی، اختلالات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی و تغییرات مولکولی بر رشد و عملکرد گیاه تأثیر منفی می‌گذارند. به‌طور کلی وقوع هم‌زمان سرما و خشکی، شرایط را برای تولید محصول وخیم‌تر می‌نماید. گیاهان به رویکردهای حفاظتی فیزیولوژیکی و مولکولی متداول و متفاوتی برای تحمل به تنش‌های سرما و خشکی روی می‌آورند. با این وجود، واکنش‌های گیاه به ترکیبی از تنش‌های سرما و خشکی نسبت به هر یک از آن‌ها به تنهایی متفاوت است (Hussain et al., 2018).

بسیاری از محققان تنش را حاصل شرایطی در نظر می‌گیرند که برای رشد گیاه از شرایط مطلوب به‌طور قابل توجهی فاصله دارد و این تغییرات، واکنش‌هایی را در فعالیت‌های زیستی آن ایجاد می‌کند که در شرایط مناسب محیط، برگشت‌پذیر هستند ولی ممکن است بعداً برگشت‌ناپذیر شوند. شرایط تنش‌زای طولانی‌مدت، بازیابی و قابلیت زیست گیاه را کاهش می‌دهد (Raza et al., 2023; Wijerathna-Yapa and Hiti-
Bandaralage, 2023). تنش‌های محیطی مهم‌ترین عوامل در کاهش عملکرد گیاهان زراعی به شمار می‌آیند و معمولاً باعث می‌شوند متوسط عملکرد گیاهان زراعی فقط ۲۰-۱۰ درصد عملکرد پتانسیل آن‌ها باشد (Basra, 1997). تنش‌های غیرزنده نظیر تنش شوری، تولید و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را القاء می‌کنند که در غلظت‌های بالا برای سلول زیان‌آور هستند. تولید این ترکیبات باعث پراکسیداسیون چربی‌ها، غیرفعال شدن آنزیم‌ها، خسارت به اسیدهای نوکلئیک و تخریب غشاهای سلول می‌شود. نتایج حاصل از پراکسیداسیون لیپید شامل از دست دادن اسیدهای چرب غیراشباع، کاهش

چالش بزرگی برای انسان ایجاد می‌کند (Gaur et al., 2013). تنش‌های محیطی مانند خشکی، دمای بالا، سرما، شوری، قلیایی‌ات، اشعه ماوراءبنفش و عوامل بیماری‌زای گیاهان، باعث ایجاد اثرات جدی مختلف، بر روی گیاهان می‌شود و این تنش‌ها عامل اصلی تلفات محصول در سراسر جهان به میزان بیش از ۵۰ درصد می‌باشند (Bulgari et al., 2019). در بسیاری از مناطق، تنش خشکی یا کمبود آب مانع زیست‌محیطی قابل توجهی برای عملکرد بسیاری از محصولات غذایی مهم اقتصادی است (Gupta et al., 2020). میزان تأثیر واقعی تنش خشکی نامشخص است زیرا به عوامل متعددی از جمله میزان بارندگی و میزان تیخیر بستگی دارد (Keerthi Sree et al., 2023). کمبود آب در گیاهان، با ایجاد اختلال در روابط آبی، رشد منظم گیاهان را مختل کرده و بر میزان مصرف آب گیاهان تأثیر می‌گذارد. عوامل محدودکننده آب، منجر به اختلال در طول رشد سلول می‌شوند که عمدتاً به دلیل جریان ضعیف آب از آوند چوبی به سلول‌های مجاور است (Fahad et al., 2017). شرایط کمبود آب با جلوگیری از رشد کمی و کیفی، الگوی رشد گیاه را تغییر می‌دهد (Keerthi Sree et al., 2023).

خشکی بر تمام مراحل رشد و نمو گیاه از مرحله جوانه‌زنی تا مراحل انتهایی آن تأثیر منفی داشته و در نهایت در عملکرد و کیفیت دانه با از دست دادن ۴۰ تا ۵۰ درصد در بهره‌وری محصول آشکار می‌شود. تخمین زده می‌شود که ۳۳ درصد از تولید نخود در جهان در نتیجه تنش خشکی از بین می‌رود (Varshney et al., 2009b). اثرات منفی این تنش بر رشد نخود توسط برخی محققان با پارامترهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی آشکار شده است (Rashid et al., 2021). گیاه نخود با برنامه‌ریزی مجدد پروتئین‌های خود، به تنش واکنش نشان می‌دهد تا از وضعیت پایدار فرآیندهای متابولیکی حیاتی اطمینان حاصل کنند. علی‌رغم توانایی گیاه نخود جهت رشد در شرایط تنش، نیاز به افزایش ویژگی‌های تحمل به خشکی نخود برای افزایش کارایی گیاه در کم‌آبی وجود دارد. اقداماتی که در مولکول‌های عملکردی مهم، مانند پروتئین‌ها انجام می‌شود باید به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات بیشتر برای درک مکانیسم‌های مولکولی تحمل به تنش کم‌آبی باشد. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلف مولکولی، به‌عنوان ابزاری قوی برای بررسی تغییرات تجمع

سیالیته و پتانسیل غشاء لیپیدی، تغییر در نفوذپذیری غشاء سلولی، تأثیر بر روی آنزیم‌های غشایی و رهاسازی مواد داخل سلول می‌باشد (*de Mendoza and Pilon, 2019; Li et al., 2020*).

پیامدهای تنش

تنش امری ناگزیر یا نوسان‌های شدید غیرقابل‌پیش‌بینی تحمیل شده بر روی الگوهای سوخت و سازی منظم است که سبب خسارت به محصول در اثر تنش یا ناهنجاری فیزیولوژیکی می‌شود. اصولاً تنش‌ها، عواملی هستند که به‌نوعی روند زندگی و زیستی گیاهان را دچار اختلال می‌کنند (*Shao et al., 2022; Zhu et al., 2023*).

برای غلبه بر تنش خشکی، گیاهان سه مکانیسم پاسخ به خشکی را توسعه داده‌اند: اجتناب از خشکی، تحمل به خشکی و فرار از خشکی (*Carraro and Di Iorio, 2022*). اجتناب از خشکی که عمدتاً در شرایط خشک‌سالی ملایم یا متوسط رخ می‌دهد، شامل واکنش‌های مختلف مربوط به حفظ سطح آب برای رشد پایه است. این پاسخ‌ها شامل بسته شدن روزنه، چرخاندن برگ، تجمع متابولیت‌های قابل نگهداری در آب، افزایش رشد ریشه و افزایش ظرفیت ذخیره آب است. از سوی دیگر، تحمل به خشکی توانایی گیاهان را برای حفظ سطح مشخصی از فعالیت فیزیولوژیکی تحت شرایط خشکی شدید با کاهش خسارات اکسیداتیو و اسمری ناشی از خشکی توصیف می‌کند. در نهایت، فرار از خشکی یک استراتژی است که در آن گیاهان چرخه زندگی خود را قبل از شروع تنش خشکی کامل می‌کنند. بر اساس خروجی فیزیولوژیکی، تمایز آوند چوبی ناشی از خشکی و افزایش محتوای لیگنین را می‌توان به‌عنوان مکانیسم‌های اجتناب از خشکی یا تحمل طبقه‌بندی کرد. گیاهان همچنین می‌توانند از بیش از یکی از این مکانیسم‌ها برای غلبه بر تنش خشکی بسته به مرحله رشد خود و شدت خشکی استفاده کنند.

بر خلاف سایر موجودات زنده که می‌توانند از طریق حرکت از شرایط تنش‌زا اجتناب کنند و از خود محافظت کنند، گیاهان مکانیسم‌های تحمل یا سازگاری متفاوتی را ایجاد کرده‌اند که به آن‌ها اجازه می‌دهد در برابر عوامل تنش‌زا از خود دفاع کنند و از رشد و نمو آن‌ها حمایت کنند (*Giordano et al., 2021*).

پاسخ‌های گیاه به تنش‌های غیر زیستی بر اساس گونه گیاهی متفاوت و ممکن است باعث تغییرات برگشت‌پذیر یا غیرقابل برگشت در فیزیولوژی و متابولیسم گیاه شود (*Bhattacharyya et al., 2020*). این پاسخ‌ها، همچنین می‌تواند به مرحله فنولوژیکی، شدت و مدت تنش و همچنین بافت یا اندام درگیر در مکانیسم پاسخ یا تحت تنش، وابسته باشد (*Seymen, 2021*).

پاسخ‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی محصولات زراعی به خشکی، درجه حرارت بالا و شوری ممکن است مسیرهای مشترک مقاومت در برابر تنش/تحمل را داشته باشند و علائم مشابهی را نشان دهند (*Forni et al., 2017*). تنش اسمری می‌تواند پیامد/واکنش رایج شوری، خشکی و تنش دمایی بالا باشد (*Forni et al., 2017*). مطالعات فیزیولوژیکی و مولکولی گیاه مدل و سایر گیاهان زراعی، پاسخ‌های مشابهی را در گیاهان تحت شرایط گرما، خشکی و تنش شوری مانند: کم‌آبی سلولی، عدم تعادل اسمری، مهار فعالیت فتوسنتز و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) نشان می‌دهد (*Forni et al., 2017*).

به لطف پیشرفت‌های علوم اومیکس (ترانسکریپتومیکس، پروتئومیکس و متابولومیکس) و استفاده از آرایه‌دوپسیس به‌عنوان یک گیاه مدل (*Razzaq et al., 2019*), برخی مکانیسم‌های دفاع از تنش، امکان شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل را در هر گونه ممکن ساخته‌اند. علاوه بر این، نشانگرهای مولکولی و مهندسی ژنتیک، ردیابی ژن‌های دخیل در پاسخ‌های گیاه به عوامل تنش‌زا را ممکن کرده‌اند (*Raza et al., 2019*).

برای غلبه بر تنش خشکی، گیاهان سه مکانیسم پاسخ به خشکی را توسعه داده‌اند: اجتناب از خشکی، تحمل به خشکی و فرار از خشکی (*Carraro and Di Iorio, 2022*). اجتناب از خشکی که عمدتاً در شرایط خشک‌سالی ملایم یا متوسط رخ می‌دهد، شامل واکنش‌های مختلف مربوط به حفظ سطح آب برای رشد پایه است. این پاسخ‌ها شامل بسته شدن روزنه، چرخاندن برگ، تجمع متابولیت‌های قابل نگهداری در آب، افزایش رشد ریشه و افزایش ظرفیت ذخیره آب است. از سوی دیگر، تحمل به خشکی توانایی گیاهان را برای حفظ سطح مشخصی از فعالیت فیزیولوژیکی تحت شرایط خشکی شدید با کاهش خسارات اکسیداتیو و اسمری ناشی از خشکی توصیف می‌کند. در نهایت، فرار از خشکی یک استراتژی است که در آن گیاهان چرخه زندگی خود را قبل از شروع تنش خشکی کامل می‌کنند. بر اساس خروجی فیزیولوژیکی، تمایز آوند چوبی ناشی از خشکی و افزایش محتوای لیگنین را می‌توان به‌عنوان مکانیسم‌های اجتناب از خشکی یا تحمل طبقه‌بندی کرد. گیاهان همچنین می‌توانند از بیش از یکی از این مکانیسم‌ها برای غلبه بر تنش خشکی بسته به مرحله رشد خود و شدت خشکی استفاده کنند.

سازوکارهای دفاعی نخود در برابر تنش

پاسخ‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی محصولات زراعی به خشکی، درجه حرارت بالا و شوری ممکن است مسیرهای مشترک مقاومت در برابر تنش/تحمل را داشته باشند و علائم مشابهی را نشان دهند (*Forni et al., 2017*). تنش اسمری می‌تواند پیامد/واکنش رایج شوری، خشکی و تنش دمایی بالا باشد (*Forni et al., 2017*). مطالعات فیزیولوژیکی و مولکولی گیاه مدل و سایر گیاهان زراعی، پاسخ‌های مشابهی را در گیاهان تحت شرایط گرما، خشکی و تنش شوری مانند: کم‌آبی سلولی، عدم تعادل اسمری، مهار فعالیت فتوسنتز و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) نشان می‌دهد (*Forni et al., 2017*).

برای غلبه بر تنش خشکی، گیاهان سه مکانیسم پاسخ به خشکی را توسعه داده‌اند: اجتناب از خشکی، تحمل به خشکی و فرار از خشکی (*Carraro and Di Iorio, 2022*). اجتناب از خشکی که عمدتاً در شرایط خشک‌سالی ملایم یا متوسط رخ می‌دهد، شامل واکنش‌های مختلف مربوط به حفظ سطح آب برای رشد پایه است. این پاسخ‌ها شامل بسته شدن روزنه، چرخاندن برگ، تجمع متابولیت‌های قابل نگهداری در آب، افزایش رشد ریشه و افزایش ظرفیت ذخیره آب است. از سوی دیگر، تحمل به خشکی توانایی گیاهان را برای حفظ سطح مشخصی از فعالیت فیزیولوژیکی تحت شرایط خشکی شدید با کاهش خسارات اکسیداتیو و اسمری ناشی از خشکی توصیف می‌کند. در نهایت، فرار از خشکی یک استراتژی است که در آن گیاهان چرخه زندگی خود را قبل از شروع تنش خشکی کامل می‌کنند. بر اساس خروجی فیزیولوژیکی، تمایز آوند چوبی ناشی از خشکی و افزایش محتوای لیگنین را می‌توان به‌عنوان مکانیسم‌های اجتناب از خشکی یا تحمل طبقه‌بندی کرد. گیاهان همچنین می‌توانند از بیش از یکی از این مکانیسم‌ها برای غلبه بر تنش خشکی بسته به مرحله رشد خود و شدت خشکی استفاده کنند.

از ریشه‌ها با لیگنیکاسیون، نیز ثابت شده است که بخشی جدایی‌ناپذیر از توسعه تحمل به تنش توسط SA است. ژنوتیپ نخود همراه با سویه ریزوبی میزان گره‌زایی را تعیین می‌کند، بنابراین فعل‌وانفعالات نخود و ریزوبیا باید در شرایط تنش ارزیابی شود و مطلوب‌ترین ترکیب انتخاب شود (Kaur et al., 2022).

ROS به‌طور مداوم در سطوح پایه تحت شرایط مساعد تولید می‌شود و به دلیل عملکرد مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی مختلف موجود در نخود نمی‌تواند باعث آسیب شود. از طرفی، کاروتنوئیدها نقش مهمی در فتوسنتز دارند و همچنین در مکانیسم‌های دفاعی در هنگام تنش اکسیداتیو شرکت می‌کنند. مکانیسم CaGrx⁶ در پاسخ‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در برابر تنش خشکی و شوری در نخود به‌خوبی شناخته نشده است، اما بر اساس تحقیقات قبلی، فرضیه‌ای برای عملکردهای احتمالی CaGrx مطرح شده و به‌عنوان یک مکانیسم محافظتی ممکن، CaGrx تولید بیش‌ازحد ROS را محدود می‌کند، در سیگنال‌دهی ردوکس شرکت می‌کند و سیستم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی مستقیم یا غیرمستقیم را تقویت می‌کند (Kumar et al., 2021). با این وجود، ROS همچنین می‌تواند به‌عنوان مولکول‌های سیگنال در غلظت کم عمل کند و مکانیسم‌های تحمل در گیاه نخود را واسطه کند. واکنش نخود به تنش‌های غیرزنده چندوجهی است و زمانی که گیاه نخود تنش را تجربه می‌کند، تولید بیش‌ازحد ROS در شرایط تنش، گیاه نخود آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی خود مانند SOD، CAT، پراکسیداز⁷ (POX) و غیره را تسریع می‌کند. بنابراین، تجمع این مواد محافظت‌کننده اسمزی یک مکانیسم دفاعی مهم در گیاه نخود است که می‌تواند در تنظیم متابولیسم طبیعی سلولی کمک کند (Kaur et al., 2022).

قرار گرفتن در معرض تنش، باعث تجمع اسمزی‌های سازگار، مانند قندهای محلول کل⁸ (TSS) و پرولین در اندام‌های مختلف هر دو ژنوتیپ نخود شده است. تجمع

خاص (مانند اینوزیتول فسفات، قندها، گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، یون‌های کلسیم (Ca²⁺)، نوکلئوتیدهای حلقوی (cAMP و cGMP¹) و اکسید نیتریک² (NO) متصل می‌شوند و از طریق انتقال این سیگنال‌ها به سایر سلول‌ها، نیز پاسخ به تنش فراگیرتر خواهد شد (Novaković et al., 2018). پس از انتقال، سیگنال‌ها مسیرهای خاصی را فعال می‌کنند که بیشتر پاسخ‌های گیاه را تعیین می‌کند (Newton et al., 2016). علاوه بر این، پروتئین کینازها، فسفاتازها، پروتئین کینازهای فعال شده با میتوز⁴ (MAPKs) و پروتئین کینازهای وابسته به کلسیم⁵ (CDPKs)، اغلب در این مسیرها دخیل هستند (Rayapuram et al., 2018) ضمناً عامل‌های رونویسی، ژن‌های خاص تنش را فسفریله یا دفسفریله می‌کنند، بنابراین یا فعال می‌شوند و یا رونویسی آن‌ها مهار می‌گردد (Zandalinas et al., 2018). برخی از عوامل رونویسی برای محصولات مختلف شناسایی شده است. به‌عنوان مثال، برای گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) bZIP یک فاکتور رونویسی است که ژن *SibZIP1* را در مسیری که باعث تحمل گیاه به تنش شوری و خشکی می‌شود، فعال می‌کند (Zhu et al., 2018).

اگرچه، برخی ادبیات در مورد تأثیر تیمارهای SA/AM در مبارزه با تنش اکسیداتیو در نخود موجود است، اما تا به امروز هیچ تحقیقی در مورد تأثیرات نسبی و ترکیبی تلقیح SA و AM در حیوانات ذکر نشده است. از این‌رو، آشکار کردن نقش سیگنال مولکول SA در ترکیب با تلقیح AM یک گام حیاتی است که ممکن است مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی را تقویت کند و تحمل تنش‌های غیرزنده را در نخود ایجاد کند. تیمارهای ترکیبی تلقیح SA و AM مکمل عملکردی را از طریق توانایی‌های تجمعی خود برای تعدیل مکانیسم‌های دفاعی مختلف تحت تنش غیرزنده فراهم کرده‌اند (Bharti and Garg, 2019). فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کلیدی توسط SA نقش مهمی در بهبود تنش اکسیداتیو ناشی از تنش در گیاهان نخود داشته است. به‌موازات آن، مدیریت اثرات تنش، به‌ویژه در ریشه‌ها با تجمع قندها و پرولین یا افزایش محافظت

⁶ Chickpea glutaredoxin (CaGrx)

⁷ peroxidase (POX)

⁸ total soluble solid (TSS)

¹ cyclic AMP (cAMP)

² cyclic GMP (cGMP)

³ Nitric oxide (NO)

⁴ Mitogen-activated protein kinases (MAPKs)

⁵ calcium-dependent protein kinases (CDPKs)

درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای بهینه رشد (۳۰ درجه سانتی‌گراد) تخمین زده شده است (Upadhyaya *et al.*, 2011).

تنش خشکی

سناریوی تغییرات آب و هوایی، مانند افزایش دما و کاهش بارندگی، شرایط خشکی را افزایش داده است (Trenberth *et al.*, 2014). خشکی، عامل ۸۳ درصد از کل ضررهای اقتصادی کشاورزی است که حدود ۲۹ میلیارد دلار هزینه دارد (Gupta *et al.*, 2020). گزارش شده است که تا پایان قرن بیست و یکم، محصولات متعددی مانند برنج (۱۸/۱ تا ۱۹/۴ درصد)، ذرت (۳/۶ تا ۵/۳ درصد)، گندم (۹ تا ۱۲ درصد) و سویا (۱۵/۱ تا ۱۶/۱ درصد) با خطر کاهش عملکرد، مواجه خواهند شد (Leng and Hall, 2019). تنش خشکی یا کمبود آب یک محدودیت عمده محیطی برای بهره‌وری کشاورزی بسیاری از محصولات غذایی مهم اقتصادی در چندین منطقه است (Farooq *et al.*, 2017).

خشکی، به عوامل متعددی از جمله فراوانی بارندگی، سطح تبخیر و قابلیت حفظ رطوبت خاک بستگی دارد (Bodner *et al.*, 2015) و تغییرات فیزیولوژیکی و مولکولی از جمله از دست دادن فشار تورژسانس، کاهش فتوسنتز، تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، آسیب اسید نوکلئیک و تغییرات در بیان ژن/پروتئین، در گیاهان ایجاد می‌کند (Tiwari *et al.*, 2016). گیاهان برای محافظت از خود در برابر چنین شرایط نامطلوبی، تغییراتی در مورفولوژی، فیزیولوژی و متابولیسم خود ایجاد کرده‌اند که فرآیند پیچیده‌ای، شامل تجمع املاح سازگار، افزایش غلظت آنتی‌اکسیدان‌ها، تولید پروتئین‌های تنش‌ی، فعال‌سازی/غیرفعال‌سازی رونویسی ژن‌های خاص می‌باشد (Hussain *et al.*, 2018).

نخود، عمدتاً در نواحی خشک و نیمه‌خشک کشت می‌شود و به دلیل معماری ریشه‌اش می‌تواند تنش خشکی را تا حدی تحمل کند، درحالی‌که عملکرد کل به دلیل تنش خشکی متوسط تا شدید ۴۰ تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (Sinha *et al.*, 2016). به دلیل تماس مستقیم ریشه‌ها با ذرات خاک، آن‌ها به‌عنوان اولین مبدل سیگنال تنش خشکی عمل می‌کنند (Agrawal *et al.*, 2016). ریشه در شرایط رشد طبیعی، آب و

اسمولیت‌ها در شرایط بدون تنش و همچنین شرایط تنش، به‌طور قابل توجهی در مهار ROS، تنظیم اسمزی، تثبیت غشاء و چندین عملکرد حیاتی دیگر در گیاهان نخود تحت تنش‌های غیر زنده ایفا می‌کند. تحمل به تنش یک مکانیسم پیچیده به دلیل پاسخ‌های متفاوت در سطوح فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه است (Kaur *et al.*, 2022).

تأثیر تنش‌های غیرزنده

نخود عمدتاً در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک در اراضی حاشیه‌ای و با کیفیت کشاورزی ضعیف کشت می‌شود. در این مناطق، تنش‌های غیر زیستی، مانند دماهای شدید و خشکی در مراحل مختلف رشد در طول فصل تولید، از عوامل محیطی نامطلوب عمده‌ای هستند که تولید آن را محدود می‌کنند. در واقع، خشکی و دمای شدید به ترتیب تا ۵۰٪ و ۲۰٪ از کاهش عملکرد نخود را در جهان تشکیل می‌دهند. تحت این سناریو، شناسایی و/یا توسعه ژنوتیپ‌های نخود با تولید بالا توسط اصلاح‌کنندگان - از طریق ترکیبی از رویکردهای اصلاحی - بسیار ضروری است. این ارقام جدید نخود، باید نسبت به تغییرات آب و هوایی انعطاف‌پذیر، دارای تنوع ژنتیکی، کارآمد و به‌طور گسترده‌ای سازگار با طیف وسیعی از محیط‌ها، برای حفظ امنیت غذایی در آینده نزدیک و میان‌مدت باشند (Arriagada *et al.*, 2022).

خشکی و شوری جزو تنش‌های مهم غیر زیستی هستند که بیشترین کاهش تولید سالانه محصولات را موجب می‌شوند. نخود نیز به‌عنوان یکی از محصولات مهم زراعی، اغلب از خشکی آخر فصل رنج می‌برد که این عامل سبب تأخیر گلدهی می‌شود و تخمین زده شده است که عملکرد آن تا ۵۰٪ کاهش می‌دهد (جدول ۱) (Sachdeva *et al.*, 2018).

میانگین دمای کره زمین تقریباً ۱۴ درجه سانتی‌گراد است و طبق گزارش‌های به‌دست‌آمده، در مورد تغییرات آب و هوایی، میانگین دمای جهانی در طول قرن آینده بین ۱/۸ تا ۴ درجه افزایش خواهد یافت (IPCC, 2013). این افزایش دما، باعث تغییر فصول می‌شود که به‌طور قابل توجهی، بر تولید نخود تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، دماهای بهینه برای رشد نخود بین ۱۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ درجه سانتی‌گراد است (Gaur *et al.*, 2014)، و کاهش عملکرد بین ۱۰ تا ۱۵ درصد برای هر یک

مواد مغذی را از خاک مهار کرده و به کل گیاه می‌رساند و نقش اساسی در حفظ هموستازی دارد. اما در شرایط خشکی، این هموستازی تغییر کرده و منجر به اصلاح ساختاری و عملکردی می‌شود (Ghosh and Xu, 2014). علاوه بر این، تجزیه و تحلیل ترانسکریپتومیک و نقشه برداری مکان‌های کنترل‌کننده صفات کمی^۱ (QTL) نشان داده است که صفات مرتبط با ریشه در تحمل به خشکی نقش بسزایی دارند (Sahebi et al., 2018). چندین مطالعه بر روی بیان افتراقی ژن‌ها، برای ریشه و شاخساره نخود، تحت تنش خشکی انجام شده است (Garg et al., 2020).

جدول ۱- پاسخ نخود (*C. arietinum* L.) به تنش‌های غیرزیستی و انعطاف‌پذیری آن در برابر شرایط آب و هوایی متغیر

Table 1- The response of chickpea (*C. arietinum* L.) to abiotic stresses and its flexibility to changing weather conditions

تنش‌های غیر زنده	تاثیر بر نخود	انعطاف پذیری و سازگاری	استراتژی‌های اصلاحی
Abiotic stress	Impact on chickpea	Flexibility and adaptation	Breeding strategies
خشکی Drought	بازده را ۴۰ تا ۴۵ درصد کاهش می‌دهد Reduces yields by 40-45%	شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و اصلاح برای تحمل به خشکی Tolerant genotypes identified; breeding for drought tolerance	تنوع ژنتیکی، انتخاب ژنومی، نشانگرهای مولکولی و ابزارهای بیوتکنولوژیکی Genetic variability, genomic selection, molecular markers, and biotechnological tools
گرما Heat	دمای بالا در مراحل تولید مثل و پر شدن غلاف باعث کاهش قابل توجه محصول می‌شود High temperatures during reproductive and pod filling stages cause significant yield losses	شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و اصلاح برای تحمل به گرما Tolerant genotypes identified; breeding for heat tolerance	تنوع ژنتیکی، انتخاب ژنومی، نشانگرهای مولکولی و ابزارهای بیوتکنولوژیکی Genetic variability, genomic selection, molecular markers, and biotechnological tools
سرما Cold	دمای پایین در مرحله تولید مثل باعث از بین رفتن قابل توجه گل‌ها و غلاف‌ها می‌شود Low temperatures during reproductive stage cause substantial loss of flowers and pods	شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و اصلاح برای تحمل به سرما Tolerant genotypes identified; breeding for cold tolerance	تنوع ژنتیکی، انتخاب ژنومی، نشانگرهای مولکولی و ابزارهای بیوتکنولوژیکی Genetic variability, genomic selection, molecular markers, and biotechnological tools
کمبود نور Low Light	پارتیشن بندی زیست توده را مختل می‌کند و بر رشد ریشه و ساقه تأثیر می‌گذارد Disrupts biomass partitioning, affecting root and shoot development	شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و اصلاح برای تحمل به کمبود نور Tolerant genotypes identified; breeding for low light tolerance	تنوع ژنتیکی، انعطاف پذیری فنولوژیکی و پرورش برای تحمل به خشکی Genetic diversity, phenological plasticity, and breeding for drought tolerance
ترکیبی از استرهای مختلف Combination of Stresses	ارقام نخود باید توسعه یابند که بتوانند محیط‌های تنش متعدد را تحمل کنند Chickpea cultivars need to be developed that can tolerate multiple stress environments	اصلاح برای تحمل به استرهای مختلف Breeding for multiple stress tolerance	تنوع ژنتیکی، انتخاب ژنومی، نشانگرهای مولکولی و ابزارهای بیوتکنولوژیکی Genetic variability, genomic selection, molecular markers, and biotechnological tools

آبی ممکن است توسعه محصول را به تأخیر بی‌اندازد یا تحریک کند، اما به نظر می‌رسد سطح متوسط تنش آبی تأثیر مستقیمی بر توسعه ندارد. لازم به ذکر است، دوره نوری بحرانی در نخود باید بیشتر از ۱۵ ساعت باشد. سرعت رشد به سمت گلدهی

کمبود آب یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محدودکننده تولید در محصولات زراعی است. این کمبود در بسیاری از اشکال مانند خشکی، شوری و درجه حرارت شدید معمول است که وضعیت آب را تغییر می‌دهند (Romo et al., 2001). تنش

¹ Quantitative trait locus (QTL)

در محافظت از عملکرد سلولی، از آسیب غلظت یون بالا است. نتایج حاضر با نقش فرضی گروه سوم LEA در جداسازی یون‌ها، در نتیجه اثرات سمی NaCl را تسکین می‌دهد. وجود LEAs در بافت‌های رویشی که به خوبی آبیاری شده‌اند، عملکرد جدیدی را برای این پروتئین‌ها نشان می‌دهد. سایر cDNA هایی که گلیوکسالازها، پروتئین‌های غنی از پرولین و سنتازهای رافینوز را کد می‌کنند نیز به عنوان عوامل ناشی از تنش آب شناسایی شده‌اند (Romo *et al.*, 2001).

علاوه بر اصلاح سنتی، به نظر می‌رسد رویکردهای ژنومی برای بهبود تحمل به تنش گیاه، بسیار مهم است. طیف گسترده‌ای از روش‌ها و استراتژی‌های مهندسی ژنتیک، امکان شناسایی ژن‌های دخیل در پاسخ به تنش مولکولی را فراهم کرده است (Cushman and Bohnert, 2000). در واقع، مطالعات بر روی پاسخ‌های مولکولی به کمبود آب، تغییراتی را در بیان ژن نشان داده و تعداد زیادی از ژن‌های ناشی از خشکی شناسایی شده‌اند (Shinozaki and Yamaguchi, 1996). بسیاری از این ژن‌ها نیز در اثر کاربرد اگزوزن ABA القا می‌شوند. شباهت بین پیامدهای کمبود آب و کاربرد ABA نشان می‌دهد که پاسخ‌های گیاه می‌تواند، حداقل تا حدی، با تغییرات در سطوح ABA درون‌زا باشد (Shinozaki and Yamaguchi-Shinozaki, 1997). ژن‌های ناشی از تنش خشکی، پروتئین‌هایی را کدگذاری می‌کنند که قرار است نقش مهمی در پاسخ به تنش آبی ایفا کنند. آن‌ها تحمل خشک شدن را ایجاد می‌کنند، از ساختارهای سلولی محافظت می‌کنند، یا در مسیر انتقال سیگنال که منجر به القای ژن در این شرایط می‌شود، درگیر می‌شوند. باین حال، عملکرد چندین پروتئین ناشی از القا ABA، مانند LEAs، LTPs، RABs هنوز ناشناخته باقی مانده‌اند (Bajaj *et al.*, 1999).

برای مقابله نخود با تنش خشکی، چندین استراتژی می‌تواند به کار گرفت، از جمله توسعه واریته‌های مقاوم به خشکی، استفاده از اسموپرایمینگ و بهینه‌سازی شیوه‌های زراعی. توسعه واریته‌های نخود مقاوم به خشکی را می‌توان از طریق شناسایی و استفاده از ژن‌های مرتبط با تحمل به خشکی به دست آورد. این ژن‌ها را می‌توان از طریق برنامه‌های اصلاحی به ارقام نخبه

به‌عنوان تابعی از میانگین دما و دوره نوری توصیف شده است، اگرچه گزارش شده است که محیط‌هایی با حداکثر دمای روزانه ۳۸ درجه سانتی‌گراد منجر به تأخیر قابل‌توجهی در گلدهی می‌شوند. در کل، رشد خطی نخود به سمت گلدهی در محدوده دمایی ۱۱ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد و محدوده دوره نوری بین ۱۱ تا ۱۶ ساعت روشنایی در روز می‌باشد (Soltani *et al.*, 2006). نخود، در مرحله زایشی خود به تنش آبی حساس است و در شرایط تنش آبی، گل‌ها و غلاف‌ها را سقط می‌کند و در نتیجه پتانسیل عملکرد را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که نخود دارای دو نوع کابلی (دانه بزرگ، قوچ شکل و قهوه‌ای روشن) و دسی (دانه‌ریز، زاویه‌ای و قهوه‌ای تیره) بوده که به‌طور نسبی، نوع "کابلی" نسبت به "دسی" حساس‌تر به تنش آبی گزارش شده است اما مکانیسم‌های اساسی مرتبط با حساسیت متضاد به تنش آب، در سطح متابولیک به خوبی شناخته نشده است. لذا فرض شده است که یکی از دلایل متضاد حساسیت به تنش آبی، در دو نوع نخود، ممکن است تغییر در آسیب اکسیداتیو باشد (Nayyar *et al.*, 2006).

تنش آبی باعث ایجاد واکنش‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی مانند مهار رشد، در گیاهان می‌شود. تعدادی از ژن‌هایی که به تنش خشکی در نخود، پاسخ می‌دهند توصیف شده و الگوهای بیان آن‌ها به‌منظور ارائه رویکردی از عملکرد آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. به نظر می‌رسد ژن‌های کدکننده پروتئین‌های انتقال چربی^۱ (LTP) و پروتئین‌های بیان شده در اواخر مرحله جنین‌زایی^۲ (LEA) در پاسخ به تنش آبی نخود، مهم باشند. القای این ژن‌ها، منحصر به تنش اسمزی ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول نیست، زیرا آن‌ها همچنین در پاسخ به تنش شوری بالا واکنش نشان می‌دهند. CapLTP^۳ عمدتاً در بافت‌های جوان بیان می‌شود زیرا پیام‌رسان‌ها در نهال‌ها نسبت به گیاهان بالغ، فراوان‌تر هستند و سطح رونوشت، به تدریج با افزایش سن اپیکوتیل‌ها کاهش می‌یابد. از این نظر، LTPها در مراحل اولیه رشد، در سنتز کوتیکول نقش دارند. CapLEA-1 و CapLEA-2 به‌طور قابل‌توجهی توسط تیمار NaCl در هر بخش گیاه تنظیم می‌شوند. پاسخ این ژن‌ها به شوری بالا، نشان‌دهنده نقش آن‌ها

³ Cap lipid transfer protein (CapLTP)

¹ lipid-transfer protein (LTP)

² Late embryogenesis abundant (LEA)

رویدادهای تولیدمثلی، به‌ویژه در هنگام لقاح، تشکیل غلاف و پر شدن غلاف در نخود شود (Jha *et al.*, 2021b). در کل، حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد تولید جهانی نخود، در اثر تنش‌های زیستی و غیر زیستی از بین می‌رود (Varshney *et al.*, 2009a) که در صورت شناسایی ارقام نخود متحمل به تنش‌های زیستی و غیر زیستی، تولید جهانی به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد.

یکی از پیامدهای اصلی تنش گرمایی، تولید بیش‌ازحد ROS است که منجر به تنش اکسیداتیو می‌شود (Hasanuzzaman *et al.*, 2013). مکانیسم‌های مختلفی برای به حداقل رساندن آسیب تنش گرمایی در طول گلدهی در گیاهان شناسایی شده است، مانند: الف) فرار از گرما؛ جایی که شروع گل و بلوغ گیاه، زود و سریع اتفاق می‌افتد به طوری که گیاهان قبل از شروع دماهای بالا بالغ می‌شوند. ب) اجتناب از گرما؛ از طریق خنک‌سازی تدریجی، بازتاب برگ و جهت‌گیری، برای جلوگیری از تأثیر مستقیم خورشید و ج) تحمل گرما؛ از طریق فرآیندهای تولیدمثلی و تولید گیاهان مقاوم یا متحمل (Prasad *et al.*, 2017). گیاهان جهت پاسخ به تنش گرمایی، مکانیسم تحمل گرما، پروتئین‌ها و ساختارهای سلولی را سازمان‌دهی می‌کنند، فشار تورژسانس سلولی را با تنظیم اسمزی حفظ نموده و سیستم آنتی‌اکسیدانی را برای برقراری مجدد تعادل اکسیداسیون و کاهش سلولی و هموستاز اصلاح می‌کنند (Hasanuzzaman *et al.*, 2013). اخیراً به تفصیل مکانیسم‌های پاسخ نخود، به تنش گرمایی پرداخته شده و تأکید شده است که بیشتر مطالعات بر روی بهبود تحمل گرما در کشت زود هنگام نخود متمرکز شده‌اند تا از تنش جلوگیری شود. با این حال، با تغییر سریع شرایط محیطی، تلاش بیشتری برای دستیابی به تحمل حرارت واقعی به جای اجتناب لازم است (Jeffrey *et al.*, 2021). در مقابل، نخود زمانی که با سرما (۳ تا ۸ درجه سانتی‌گراد) یا حتی دمای انجماد مواجه می‌شود، نیز از تنش سرما رنج می‌برد که منجر به توقف فرآیند جوانه‌زنی و تأثیر منفی بر بنیه گیاهچه در طول استقرار اولیه رشد می‌شود (Jha *et al.*, 2020).

قرار گرفتن در معرض تنش گرمایی (بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد) در طول رشد تولیدمثلی، به‌طور چشمگیری باعث کاهش محصول شده و در نتیجه به دلیل تأثیر منفی، عملکرد بافت تولیدمثل نر (گرده و بساک) تا ۳۹ درصد از دست خواهد

وارد کرد و منجر به توسعه وارپته‌هایی با تحمل به خشکی بهتر شد (Sachdeva *et al.*, 2022). اسموپرایمینگ تکنیکی است که شامل استفاده از عوامل اسمزی مانند مانیتول برای پیش تیمار بذرها قبل از کاشت است. نشان داده شده است که این روش عملکرد جوانه‌زنی بذر را بهبود می‌بخشد و به خشکی و مقاومت گرمایی گیاهان رشد یافته کمک می‌کند (Karalija *et al.*, 2022). پرایمینگ بذر با استفاده از اسید جیبرلیک می‌تواند به تحمل بهتر خشکی در نخود کمک کند. این امر با بهبود رویش و رشد از طریق افزایش فعالیت α -آمیلاز حاصل می‌شود که منجر به بنیه گیاهچه و تحمل بهتر تنش خشکی می‌شود (Karalija *et al.*, 2022). بهینه‌سازی شیوه‌های زراعی، مانند زمان و میزان آبیاری، می‌تواند به کاهش اثرات تنش خشکی بر گیاهان نخود کمک کند. به عنوان مثال، استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای می‌تواند به صرفه‌جویی در آب و کاهش تبخیر کمک کند، که منجر به بهبود راندمان مصرف آب و کاهش تنش خشکی می‌شود (Peter *et al.*, 2019). ادغام صفات زراعی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند منجر به افزایش نرخ بهره ژنتیکی و توسعه وارپته‌هایی با بهبود تحمل به خشکی شود. این را می‌توان از طریق شناسایی و اعتبارسنجی نشانگرهای مولکولی مرتبط با ژن‌های کنترل‌کننده صفات مختلف تحت تنش به دست آورد که می‌تواند کارایی برنامه‌های اصلاحی را افزایش دهد (Peter *et al.*, 2019). شناسایی و استفاده از QTL‌ها برای صفات تحمل به خشکی می‌تواند به بهبود بهره‌وری نخود تحت تنش خشکی کمک کند. این را می‌توان از طریق استفاده از تکنیک‌های اصلاح مولکولی، مانند انتخاب به کمک نشانگر، برای هدف قرار دادن QTL‌های مرتبط با تحمل به خشکی به دست آورد.

تنش گرمایی

خشکی و گرما به‌عنوان دو عامل مهم محیطی می‌توانند بیش از ۷۰ درصد کاهش عملکرد را در نخود ایجاد کنند (Varshney *et al.*, 2019b). به‌طور سنتی، نخود برای رشد و کشت بهتر، به زمستان‌های ملایم نیاز دارد. افزایش دمای هوای محیط (≥ 35 درجه سانتی‌گراد) که هم‌زمان با فرآیندهای تولیدمثلی باشد، می‌تواند منجر به ناهنجاری‌های مختلف در

پاسخ به خشکی و تنش گرمایی در نهال‌های سویا نقش دارند (Liu *et al.*, 2019). خانواده‌های ژن HSP90 در اکثر حبوبات و در نخود در مواجهه با تنش خشکی و گرما قبلاً گزارش شده است (Agarwal *et al.*, 2016). علاوه بر این، هشت ژن تنظیم‌کننده زمان گلدهی (SFH3, Myb, GI, FLD, efl1, bZIP, bHLH, و SBP) در نخود گزارش شد (Upadhyaya *et al.*, 2015). ژن‌های *extensin-like* شماره یک، در مناطق QTL که دارای تکرارهای غنی از لوسین بوده و خاص گرده است، شناسایی شده و گزارش شد که به‌طور هم‌افزایی، یکپارچگی دیواره سلول‌ی لوله گرده را حفظ می‌کنند. بنابراین، آن‌ها نقش مهمی در جوانه‌زنی گرده و رشد لوله گرده دارند (Wang *et al.*, 2018). طی سال‌های گذشته، کلون کردن SHY (یک پروتئین ۳۸/۴ کیلو دالتون را با یک توالی N ترمینال آبگریز ۲۱ اسید آمینه و ۱۰ تکرار غنی از لوسین^۲ (LRR) پشت سر هم، را کد می‌کند) در گوجه‌فرنگی، به‌عنوان یک ژن اختصاصی گرده که پروتئین LRR را کد می‌کند، نقش خود را در مسیر انتقال سیگنال واسطه رشد لوله گرده نشان داده است (Guyon *et al.*, 2004).

تحولات ژنومی، طی دو دهه گذشته، درک پاسخ‌های پیچیده به تنش‌های زنده و غیرزنده را در چندین گیاه زراعی ساده کرده است (Roorkiwal *et al.*, 2020). توالی‌یابی ژنوم نخود و ارزیابی تغییرات گسترده ژنومی در بین ژنوم‌های مختلف در سطح توالی (Varshney *et al.*, 2019b)، منجر به توسعه انواع نخود مقاوم به تغییرات مختلف آب‌وهوایی شده است (Bharadwaj *et al.*, 2021). روش ژنوتیپ‌سنجی به کمک توالی‌یابی (GBS) به‌طور گسترده برای کشف و نقشه‌برداری صفات چندشکلی تک نوکلئوتیدی^۳ (SNP) در چندین محصول برای تحقیقات ژنتیکی و کاربردهای اصلاحی (Chung *et al.*, 2017)، از جمله نخود (Jaganathan *et al.*, 2015) استفاده شده است. علاوه بر رویکردهای پروتئومی و متابولومیکی برای درک مکانیسم مولکولی تحمل گرما (Parankusam *et al.*, 2017)، تلاش‌هایی برای نقشه‌برداری QTL ها و نشانگرهای مرتبط با تحمل گرما در نخود انجام شده است (Thudi *et al.*, 2014).

رفت (Devasirvatham *et al.*, 2012). تنش گرمایی بر مراحل مختلف رشد، از جوانه‌زنی تا عملکرد دانه تأثیر می‌گذارد (Jha *et al.*, 2014). علاوه بر این، انواع فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تنفس، تعرق، پایداری حرارتی غشا و تنظیم اسمزی تحت تأثیر تنش گرمایی قرار می‌گیرند (Zhao *et al.*, 2020).

مکانیسم ژنتیکی تنش گرمایی در گیاهان زراعی مختلف به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (Janni *et al.*, 2020). به‌طور کلی، تأثیر تنش گرمایی به‌شدت، مدت‌زمان در معرض قرار گرفتن و درجه حرارت بالا بستگی دارد. در مورد حبوباتی مانند نخود، تنش گرمایی اثرات مضر بر مورفولوژی، فیزیولوژی و رشد تولیدمثلی دارد (Sita *et al.*, 2017). اثرات تنش گرمایی بر رشد بافت‌های مختلف نر و ماده در گونه‌های مختلف حبوبات اخیراً بررسی شده است (Liu *et al.*, 2019). در مورد محصولات حبوبات، تأثیر پروتئین‌های شوک حرارتی^۱، خانواده‌های ژن HSP و متابولیت‌های مختلف برای کنترل پاسخ تنش گرمایی گزارش شده‌اند (Janni *et al.*, 2020). تنش گرمایی بر زنده ماندن گرده و نمو بذر تأثیر منفی می‌گذارد که در نتیجه منجر به کاهش شاخص برداشت می‌شود و این رویدادها به‌شدت بر عملکرد نخود تأثیر می‌گذارد. در فصل سرد، حبوباتی مانند نخود، عدس و باقلا، دمای بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش عملکرد می‌شود (Bhandari *et al.*, 2017). از آنجایی که تنش گرمایی یک صفت پیچیده است که توسط بسیاری از ژن‌ها/QTL ها کنترل می‌شود، بهبود رشد و تولید، با ایجاد تحمل تنش گرمایی در نخود همچنان چالش برانگیز است (Devasirvatham *et al.*, 2013)؛ بنابراین، درک اثرات تنش گرمایی بر رشد، نمو و عملکرد نخود با مشاهده صفات زراعی برای توسعه ارقام متحمل به دمای بالا مهم است. ژن‌های HSP نقش اساسی در تحمل تنش گرمایی دارند. در تحقیقی (Jha *et al.*, 2021b)، ۳۲ ژن در نواحی QTL‌های CaLG01، CaLG02، CaLG04 و CaLG07 شناسایی شده‌اند. همچنین به‌طور مشابه، در مورد سویا، ۳۸ عدد Hsfs شناسایی شده که روی ۱۵ کروموزوم سویا قرار گرفته‌اند (Li *et al.*, 2014). گزارش شده است که خانواده‌های ژنی HSP

³ Single nucleotide polymorphisms (SNPs)

¹ Heat Shock Proteins (HSP)

² Leucine-Rich Repeat (LRR)

حرارت، استفاده از اسموپرایمینگ و بهینه‌سازی شیوه‌های زراعی. توسعه واریته‌های نخود مقاوم به گرما را می‌توان از طریق شناسایی و استفاده از ژن‌های مرتبط با تحمل گرما به دست آورد. این ژن‌ها را می‌توان از طریق برنامه‌های اصلاحی به ارقام نخبه وارد کرد که منجر به توسعه واریته‌هایی با تحمل گرما بهبود یافته می‌شود (Peter et al., 2019). پرایمینگ بذر با استفاده از اسید جیبرلیک می‌تواند به تحمل بهتر گرما در نخود کمک کند. این امر با بهبود ظهور و رشد از طریق افزایش فعالیت α -آمیلاز حاصل می‌شود که منجر به بنیه بهتر گیاهچه و تحمل تنش گرمایی می‌شود (Ray et al., 2022). استفاده از پرولین: پرولین، یک اسید آمینه، اثر محافظتی بر روی گیاهان نخود تحت تنش گرمایی نشان داده است. کاربرد پرولین خارجی ممکن است تحمل در برابر تنش گرمایی را بهبود بخشد و گیاهان تیمار شده با پرولین کاهش آسیب اکسیداتیو، سطوح بالای آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی و بهبود فعالیت آنزیم‌های متابولیسم کربن را تحت تنش گرمایی نشان داده‌اند (Kaushal et al., 2011). استفاده از نشانگرهای ژنتیکی مرتبط با QTL‌های مرتبط با صفات تحمل گرما می‌تولند به بهبود بهره‌وری نخود تحت تنش گرمایی کمک کند. این را می‌توان از طریق استفاده از تکنیک‌های اصلاح مولکولی، مانند انتخاب به کمک نشانگر، برای هدف قرار دادن QTL‌های مرتبط با تحمل گرما به دست آورد (Peter et al., 2019).

تنش سرما

اثرات فنوتیپی، مانند جوانه‌زنی ضعیف، کاهش رشد گیاهچه‌ها، زرد شدن برگ‌ها (کلروز)، کاهش انبساط و پژمردگی برگ و مرگ بافت (نکروز)، از علائم قرار گرفتن گیاه نخود، در معرض تنش سرما هستند (Yadav, 2010). در مرحله زایشی، سقط گل و ممانعت از رشد لوله‌گرده نیز از اثرات تنش سرما است (Nayyar et al., 2005). باین‌حال، اصلی‌ترین اثر منفی تنش سرما بر گیاه نخود، این است که باعث آسیب شدید غشاء به دلیل کم‌آبی سلولی، همراه با یخ‌زدگی در طول تنش سرما می‌شود (Yadav, 2010). بنابراین جلوگیری از تشکیل بلورهای یخ درون سلولی، برای گیاهان برای تحمل تنش سرما از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی، اولین شاخص‌هایی که تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرند، رشد و فتوسنتز بوده و برای

با توجه به اینکه نخود عمدتاً با تکیه بر رطوبت باقیمانده خاک در محیط‌های حاشیه‌ای کشت می‌شود (Gaur et al., 2014)، بنابراین، درک ماهیت، تأثیر و مکانیسم‌های مولکولی تحمل تنش گرمایی به طراحی استراتژی‌هایی برای غلبه بر تلفات تولید کمک می‌کند. در مورد نخود، قبلاً، مطالعات بسیار کمی بر درک ماهیت، تأثیر و تنوع موجود در ژرم‌پلاسما و همچنین شناسایی مناطق ژنومی مسئول تا حدی متمرکز بوده است. در مطالعه‌ای، QTL‌های اصلی و ژن‌های جدید در این مناطق ژنومی گزارش شده است که مسئول تحمل تنش گرمایی هستند (جهت مطالعه بیشتر (Jha et al., 2021b)).

تنش گرمایی در طول مراحل تولیدمثل می‌تواند به شدت بر عملکرد دانه نخود تأثیر بگذارد (Jha et al., 2019a). از این نظر، شناسایی و ورود (اینترگرسیون) QTL‌های مرتبط با تحمل گرما می‌تولند روند اصلاحی را تسریع کند و ترکیب صفات مختلف مورد نظر را در یک ژنوتیپ واحد تسهیل کند. اصلاح ژنتیکی تحمل تنش گرمایی، به‌طور گسترده در نخود مورد مطالعه قرار گرفته است (Jha et al., 2021a). چهار QTL کنترل‌کننده صفات عملکرد غلاف و دانه نخود، تحت تنش گرمایی بر روی LG6 و LG5 شناسایی شده‌اند که بیش از ۵۰ درصد از تغییرات فنوتیپی این صفات را شامل می‌شوند (Paul et al., 2018). علاوه بر این، یک QTL مرتبط با محتوای کلروفیل در LG6 نخود در فاصله ۱۰۰ سانتی‌مورگانی، گزارش شده است (Jha et al., 2021a) که ۱۷/۲ درصد از تغییرات فنوتیپی را تحت تنش گرمایی شامل می‌شود. در مجموع ۳۷ QTL اصلی در سراسر ژنوم برای ۱۲ صفت مختلف مربوط به تحمل گرما شناسایی شده‌اند (Jha et al., 2021a). سرانجام ۱۳ QTL پایدار را برای ۷ صفت مختلف، از جمله روزهای تا گلدهی، نیز شناسایی شده‌اند (Kushwah et al., 2021). QTL‌های پایدار برای روز تا گلدهی می‌تواند یکی از عوامل اصلی برای ایجاد تحمل گرما باشد، زیرا گلدهی زودرس یک مکانیسم فرار است که اجازه می‌دهد بذرها در مقایسه با گیاهان با چرخه طولانی‌تر زودتر تولید شوند (Kushwah et al., 2021) که نشان‌دهنده سرعت و سهولت رشد اولیه در نخود است.

برای مقابله با تنش گرمایی نخود، چندین استراتژی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، از جمله توسعه انواع مقاوم به

مطالعه، QTL یکسانی در LG3 شناسایی شده که می‌تواند یک منطقه ژنومی مورد علاقه مرتبط با تحمل سرما و پاسخ بهاره‌سازی در نخود باشد.

مقابله نخود در برابر تنش سرما شامل چندین استراتژی است، از جمله استفاده از ژنوتیپ‌های مقاوم به سرما، اصلاح نژاد برای تحمل سرما و مکانیسم‌های سازگاری به سرما. ژنوتیپ‌های نخود از نظر حساسیت به تنش سرما متفاوت هستند. برخی از ژنوتیپ‌ها، مانند ژنوتیپ‌هایی که در خویشاوندان وحشی نخود یافت می‌شوند، نشان داده‌اند که در دمای ۸- و ۱۲- درجه سانتی‌گراد در مراحل اولیه رشد زنده می‌مانند. غربالگری این ژنوتیپ‌ها از نظر تحمل سرما و استفاده از آنها در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند به توسعه ارقام مقاوم به سرما کمک کند (Mir et al., 2021). برنامه‌های اصلاحی می‌توانند با انتخاب صفاتی مانند سازگاری به سرما، تغییرات غشایی، تجمع محافظت‌کننده اسمزی، افزایش تنظیم آنتی‌اکسیدانی و تغییر در بیان ژن این مسیرها، روی رشد ارقام با تحمل بهتر سرما تمرکز کنند (Rani et al., 2021). سازگاری با سرما فرآیندی است که طی آن گیاهان با تغییر فیزیولوژی و بیوشیمی خود با دمای سرد سازگار می‌شوند. این فرآیند شامل مکانیسم‌های مختلفی از جمله تغییرات غشایی، انباشته شدن محافظ اسمزی، تنظیم بالای آنتی‌اکسیدانی و تغییر در بیان ژن این مسیرها می‌شود. سازگاری با سرما می‌تواند به گیاهان نخود کمک کند تا در دماهای خیلی سرد با اصلاح ساختار فتوسنتزی خود، قادر باشند سرمای شدید را تحمل کنند و زنده بمانند (Rani et al., 2021). پرایمینگ سرد، فرآیندی است که بذر نخود را قبل از کاشت در معرض تنش خفیف سرما قرار می‌دهد و نشان داده شده است که این فرآیند تحمل سرمای زایشی را به گیاهان نخود منتقل می‌کند و در نتیجه باعث از بین رفتن قابل توجه غلاف‌های بالقوه می‌شود (Thakur et al., 2020). همچنین استفاده از خویشاوندان وحشی نخود مانند *C. reticulatum* و *C. echinospermum* باعث مقاومت نسبی نسبت به سرما شده و قابل تلاقی با ژنوتیپ‌هایی هستند که آنها را به منابعی ایده‌آل برای تحمل به سرما تبدیل می‌کند (Mir et al., 2021). از طرفی، شیوه‌های مدیریتی مانند کشت پاییزه می‌تواند زمان

به حداقل رساندن این تأثیرات و تلفات عملکرد بایستی مهم‌ترین پارامترهای رشد از جمله شاخص کلروفیل، ارتفاع گیاه، محتوای نسبی آب^۱ (RWC)، شاخص پایداری غشاء^۲ (MSI)، زیست‌توده، وزن صد دانه و عملکرد گیاه ارزیابی و همچنین درک بهتری از شاخص‌های متنوع مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی مرتبط با عملکرد به دست آید (Sachdeva et al., 2018). بر این اساس، بایستی از طریق گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی فرآیند اصلاحی نهایی پیگیری شود. متوسط بهره‌وری از نخود بسیار کم است و دلیل مهم آن تنش‌های مختلف زیستی و غیر زیستی و تنوع کم در بین ارقام زراعی است (Sachdeva et al., 2018). از طرفی تنوع ژنتیکی کم نخود زراعی، باعث دشواری فرآیند اصلاحی شده است لذا تولید ارقام برتر با مقاومت بیشتر، به تنش‌های زیستی و غیر زیستی از طریق روش‌های متداول مقذور گردیده است (Lim et al., 2007). همچنین میانگین نسبتاً پایین (۱/۰۱) تن در هکتار در سال ۲۰۲۰ عملکرد دانه نخود (Arriagada et al., 2022)، نشان‌دهنده نیاز به بهبود ژنتیکی عملکرد و دستیابی به اهداف تولیدی مورد نظر توسط اصلاح‌گران است (Raina et al., 2019). آگاهی از سطح تنوع ژنتیکی در داخل و بین جمعیت نخود برای هر برنامه اصلاحی ضروری است. در واقع، تنوع ژنتیکی طبیعی، کلید پاسخگویی به اثرات تغییرات آب و هوایی بر عملکرد محصول است (Fischer et al., 2013).

با توجه به اینکه، منابع ژنومی محدودی برای تحمل سرما در نخود گزارش شده است؛ اما ذکر گردیده است که توده‌های نخود وحشی، وقتی در معرض دمای پایین قرار می‌گیرند باعث گلدهی زودرس می‌شوند (Abbo et al., 2002). یک QTL اصلی مرتبط با پاسخ بهاره‌سازی در LG3 شناسایی شده است که ۵۵ درصد از تنوع فنوتیپی این صفت را توضیح داد (Samineni et al., 2016). علاوه بر این، دو QTL قابل توجه و پایدار مرتبط با تحمل سرما را شناسایی شده است. یک QTL در LG3 در ۴۳/۸ سانتی‌مورگان شناسایی شد که ۷/۱۵ تا ۳۴/۶ درصد از واریانس فنوتیپی را توجیه می‌کند، در حالی که QTL دیگر در LG8 شناسایی شده و ۱۱/۵ تا ۴۸/۴ درصد از تغییرات را توضیح می‌دهد (Mugabe et al., 2019). در هر دو

² Membrane Stability Index (MSI)

¹ Relative Water Content (RWC)

(۷ میلی‌متر) در شوری محلول نسبتاً بالا (16.3 dS.m^{-1}) کوتاه‌تر (۳/۸ روز) از بذر بزرگ (۹ میلی‌متر؛ ۴/۷ روز) بوده است. هر سه ژنوتیپ، ۱۰۰ درصد جوانه‌زنی را در این غلظت از شوری نشان داده‌اند (Kaya et al., 2008)، در غیاب نمک، میانگین زمان جوانه زدن بذر کوچک نیز در ۲/۷ روز، کمی کوتاه‌تر از بذر بزرگ (۳/۳ روز) بوده است (Flowers et al., 2010).

آزمایش‌های جوانه‌زنی معمولاً با استفاده از NaCl یا به همراه Na_2SO_4 و گاهی اوقات در مخلوط‌های پیچیده‌تر با CaCl_2 و MgCl_2 انجام می‌شود. شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد Na_2SO_4 نسبت به NaCl، KCl یا K_2SO_4 برای جوانه‌زنی بازدارنده‌تر است، اگرچه تا آنجا که مشخص شده است، تأثیر همه این نمک‌های مختلف، تنها بر روی یک ژنوتیپ منفرد (C-214) مقایسه شده است (Sheoran and Garg, 1983). با نمک‌های مخلوط، مانند نمک‌های منفرد، تنوع ژنوتیپی زیادی در اثر غلظت روی جوانه‌زنی، چه در محلول و چه در خاک وجود دارد (Kathiria et al., 1997). برخی از ژنوتیپ‌ها قادر به جوانه زدن در 32 dS.m^{-1} هستند (مانند ILC-205 و ILC-206) (Zurayk et al., 1998)، درحالی‌که برای برخی ژنوتیپ‌های دیگر، سرعت و درصد جوانه‌زنی را می‌توان در EC فقط برابر با 4 dS.m^{-1} کاهش داد (شوری با افزودن مخلوطی از NaCl، Na_2SO_4 و CaCl_2 به نسبت ۲:۱:۱ تنظیم گردیده است) (Mer et al., 2000). سرعت جوانه‌زنی، همان‌طور که برای نمک‌های منفرد گزارش شده است، توسط نمک‌های مخلوط کند می‌شود (Yadav et al., 1989)، اگرچه درصد نهایی جوانه‌زنی همیشه کاهش نمی‌یابد (Dua, 1992). نشان داده شده است که جوانه‌زنی و سبز شدن از خاک شور شده (آبیاری شده با محلول شور) کندتر و با درصد نهایی کمتر، از جوانه‌زنی و سبز شدن در محلول‌هایی با شوری مشابه است (Esechie et al., 2002) که نشان می‌دهد رشد اولیه گیاهچه ممکن است نسبت به نمک حساس‌تر باشد.

تلاش‌های متعددی برای بررسی اساس ژنتیکی مرتبط با تحمل به شوری در نخود انجام شده است (Flowers et al., 2010). یک QTL برای عملکرد دانه در LG3 شناسایی شده است که ۱۹ درصد از تغییرات در شرایط شوری را توضیح

بیشتری را برای رشد گیاهان نخود فراهم کند و در نتیجه عملکرد بالاتر و تحمل بهتری نسبت به تنش یخ زدگی داشته باشد. با اجرای این راهکارها، نخودکاران می‌توانند تأثیر تنش سرما بر تولید نخود را کاهش دهند و بهره‌وری و انعطاف‌پذیری گیاه نخود را در برابر دمای سرد افزایش دهند (Nabati et al., 2023).

تنش شوری

شوری خاک حدود ۸۰ میلیون هکتار از زمین‌های قابل کشت در سراسر جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و این مناطق در حال گسترش هستند. تخمین کاهش عملکرد نخود، به دلیل شوری خاک در دسترس نیست. با این حال، با توجه به حساسیت آن و اینکه غلظت نمک در خاک با خشک شدن خاک در پایان فصل رشد افزایش می‌یابد، کاهش عملکرد سالانه نخود، ناشی از نمک بین ۸ تا ۱۰ درصد در سطح جهانی، برآورد شده است (Flowers et al., 2010).

شوری (به‌صورت NaCl)، سرعت و میزان جوانه‌زنی بذر نخود را کاهش می‌دهد، اما تنوع زیادی بین ژنوتیپ‌های گیاهی در پاسخ به آن وجود دارد. برای مثال، در تحقیقی، ژنوتیپ ILC-482 حدود ۸ روز طول کشیده تا در 120 dS.m^{-1} NaCl به ۷۰ درصد جوانه‌زنی برسد، درحالی‌که ژنوتیپ بومی بارکا^۱ پس از حدود ۱۰ روز در همان غلظت نمک، به ۴۰ درصد جوانه‌زنی رسیده است در صورت عدم وجود نمک، ILC-482 پس از ۶ روز به ۹۷ درصد جوانه‌زنی رسیده است، درحالی‌که بارکا حدود ۸ روز طول کشیده است تا به جوانه‌زنی ۹۶ درصد برسد (Esechie et al., 2002). برخی از ژنوتیپ‌ها در غلظت‌هایی از NaCl جولنه می‌زنند که EC آن‌ها حدود 32 dS.m^{-1} بوده است، درحالی‌که جوانه‌زنی سایر ژنوتیپ‌ها در نصف غلظت نمک، به ۱۵ درصد کاهش یافته است. اینکه آیا چنین تفاوت‌هایی می‌تواند مربوط به نوع بذر باشد (کابلی در مقابل دسی)، به‌طور دقیق آزمایش نشده است، اگرچه مقایسه بین یک ژنوتیپ کابلی و یک ژنوتیپ دسی (به ترتیب جام و کاکا) هیچ تفاوتی در اثرات شوری بر جوانه‌زنی نشان نداده‌اند (Soltani et al., 2002). در سه ژنوتیپ کابلی (AKN-97، Gokce و Uzunlu-99)، میانگین زمان جوانه‌زنی بذر کوچک

¹ Barka

کم و محدود ژنتیکی و ناتوانی جمعیت دو والدینی در برنامه‌های اصلاحی با صفات چندگانه، جمعیت‌های نخود چند والدینی با ترکیب و مشارکت‌های ژنتیکی متنوع با سطح بالایی از نوترکیبی ایجاد شده‌اند (Varshney *et al.*, 2019a). این جمعیت‌های چند والدینی، تنوع آلی را افزایش داده و گنجاندن نوترکیب‌های جدید را امکان‌پذیر ساخته‌اند (Huang *et al.*, 2012).

در عمل، استفاده از ابزارهای ژنومیک در برنامه‌های اصلاحی امکان توسعه ارقام جدید نخود را از طریق رویکردهایی مانند تلاقی برگشتی به کمک نشانگر^۱ (MABC)، انتخاب مکرر به کمک نشانگر^۲ (MARS) و انتخاب ژنومی^۳ (GS) با MABC فراهم کرده است. این رویکردی است که به‌طور گسترده برای توسعه ارقام بهبود یافته نخود با عملکرد بالاتر و تحمل به تنش‌های غیر زیستی در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است (Roorkiwal *et al.*, 2020). MABC به فرد اجازه می‌دهد تا ژن‌های اصلی/ QTL های مطلوب را از یک والد اهداکننده در یک رقم نخبه یا خط تولیدمثل (ولد مکرر) ادغام کند و تقریباً کل پس‌زمینه ژنتیکی ولد برگشتی (دوره‌ای) را حفظ کند (Gaur *et al.*, 2012). در این زمینه، منطقه "Hotspot QTL" به روش MABC به چندین رقم نخود وارد شده است. به‌عنوان مثال، ژن‌ها/ QTL ها از ICC 4958 با موفقیت در ارقام هندی نخبه مانند Pusa 362، Pusa 372، DCP 92-3 و JG 11 وارد شده‌اند (Kosgei *et al.*, 2017) که باعث بهبود تحمل به خشکی و افزایش عملکرد دانه تا ۱۶ درصد نسبت به شاهد تحت شرایط تنش خشکی شده‌اند (Jha *et al.*, 2019b). در واقع رقم Pusa Chickpea 10216 (برگرفته از Pusa 372) برای کشت تجاری در هند منتشر شده است (Jha *et al.*, 2019b). به‌طور مشابه، منطقه "Hotspot QTL" از ICC 4958 به ارقام کنیایی - Chania Desi II و LDT 068 و Chania Desi 1 و ICCV 92318، ICCV 10 و Saina K1 وارد شده - که باعث افزایش تحمل به خشکی و عملکرد ۲/۵ تن در هکتار شده است (Arriagada *et al.*, 2022). در اتیوپی، یک رقم نخود پر محصول و مقاوم به خشکی به نام Geletu از تلاقی بین ICC 4958 × JG 11 تولید و برای

می‌دهد. QTL دیگری برای زمان گلدهی در LG4 قرار داشته و ۱۸/۵ تا ۳۴/۴ درصد از تغییرات فنوتیپی را توجیه می‌کند. در نهایت، یک خوشه از QTL ها برای اجزای عملکرد دانه در LG6 شناسایی شده، از جمله یک QTL برای تعداد دانه که ۳۷٪ از تغییرات را توضیح می‌دهد (Vadez *et al.*, 2012). پس از آن، دو منطقه ژنومی مهم در LG5 در ۲۸/۶ سانتی‌متر و در LG7 در ۱۹/۴ سانتی‌متر حاوی QTL برای صفات مختلف مربوط به عملکرد تحت شوری ثبت شد که بین ۱۲ تا ۱۷ درصد از تنوع فنوتیپی را توضیح می‌دهد (Pushpavalli *et al.*, 2015). اخیراً، دو دسته QTL در LG3 و LG6 حاوی QTL های اصلی برای صفات عملکرد و اجزای عملکرد تحت تنش شوری شناسایی شده که از ۸/۸ تا ۲۸/۴ درصد از تغییرات واریانس فنوتیپی را برای این صفت توجیه می‌کند (Soren *et al.*, 2020). علاوه بر این، مناطق ژنومی در LG4 با QTL های اصلی برای عملکرد در شرایط شوری همراه بوده که بین ۲۲/۶ تا ۴۸/۵ درصد از تغییرات فنوتیپی را توجیه می‌نماید (Atieno *et al.*, 2021). همچنین گزارش شده است که این مناطق در LG4 با تحمل به خشکی در نخود مرتبط هستند (Kosgei *et al.*, 2017). بنابراین، آن‌ها برای برنامه‌های اصلاحی نخود از نظر انتخاب به کمک نشانگر جهت تولید ارقام بسیار پربار و مقاوم به تغییرات مختلف آب و هوایی دارای اهمیت زیادی می‌باشند.

رویکردهای اصلاحی در نخود

طی دهه‌های گذشته، جایگاه پایین مطالعات ژنومیک در تلاش‌های اصلاحی، چرخه‌های اصلاحی طولانی‌مدت، تأخیر در پذیرش فناوری‌های مدرن و سیستم‌های توزیع جزئی بذر، تحویل دستاوردهای ژنتیکی در مزارع کشاورزان را محدود کرده است (Varshney *et al.*, 2018). از طرفی، افزایش تنوع ژنتیکی، یک پیش‌نیاز برای پرداختن به چالش‌های پایدار تشریح کمی صفات است. به‌عنوان مثال، چندین QTL برای صفات مربوط به مورفولوژی، مقاومت به بیماری، عملکرد و اجزای آن با استفاده از یک جمعیت دو والدینی در نخود ترسیم شده است (Roorkiwal *et al.*, 2018). با توجه به مسائل مربوط به تنوع

³ Genomic Selection (GS)

¹ Marker-Assisted Back-crossing (MABC)

² Marker-assisted recurrent selection (MARS)

هم زمینه زیادی برای افزایش بهره‌وری وجود دارد. پیش‌بینی می‌شود که ادغام منابع ژنومی مدرن با تلاش‌های اصلاحی سنتی به تولید و تحویل واریته‌های نخود مقاوم به شرایط نامساعد زیستی و آب و هوایی، در زمان نسبتاً کوتاه‌تر کمک کند (Roorkiwal *et al.*, 2020).

محدودیت‌ها در برنامه‌های اصلاحی نخود

اطلاع از ساختار ژنتیکی صفات مورد علاقه، مانند میزان وراثت‌پذیری، تعاملات ژنتیکی و همبستگی ژنتیکی بین صفات، برای توسعه یک برنامه اصلاحی موفق مورد نیاز است (Priyadarshan, 2017). در نخود، وراثت‌پذیری متوسط تا کم، برای اکثر صفات مرتبط با عملکرد، مانند عملکرد دانه، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و ارتفاع بوته گزارش شده است (Joshi *et al.*, 2018; Tuba Bıçer and Şakar, 2008). علاوه بر این، وراثت‌پذیری متوسط تا کم، برای صفات مربوط به تحمل به تنش‌های غیر زیستی، مانند ساختار سیستم ریشه، هدایت روزنه‌ای و دمای تاج پوشش، در میان سایرین برآورد شده است (Li *et al.*, 2018; Sivasakthi *et al.*, 2018). در واقع، به‌طور گسترده‌ای مشخص شده است که صفات مربوط به اجزای عملکرد و تحمل به تنش‌های غیر زیستی، پیچیده هستند و شامل ژن‌های متعدد مرتبط با تنظیم آنها می‌شوند. بنابراین، بیان فنوتیپی صفات مورد نظر تا حد زیادی تحت تأثیر ژنوتیپ (G)، محیط (E) و برهمکنش آنها (G × E) قرار می‌گیرد (Krishnamurthy *et al.*, 2010). با وجود این، طی ۵۰ سال گذشته، بهبود قابل توجهی در عملکرد و تحمل به تنش‌های غیر زیستی در نخود مشاهده شده است (Gupta *et al.*, 2010; Rani *et al.*, 2020). این پیشرفت، عمدتاً با استفاده از رویکردهای اصلاحی مرسوم مانند معرفی گیاه، هیبریداسیون و جهش حاصل‌شده است که امکان ترکیب ژن‌ها و آلل‌های مرتبط با اجزای عملکرد و تحمل به تنش غیر زیستی را در ارقام نخود فراهم می‌کند (Acquaah, 2015). والد دهنده این ژن‌ها و آلل‌ها که برخی از صفات مورد نظر را اعطا می‌کنند، را می‌توان در بین ارقام، مجموعه ژرم پلاسسم، جهش‌یافته‌های خودبه‌خودی یا القاشده و یا خویشاوندان وحشی یافت (Gorafi

کشت آزاد شده است. این رقم دارای میانگین عملکرد ۱۵ درصد بیشتر از رقم شاهد تکنای بوده است (Varshney *et al.*, 2013a). توسعه ارقام نخود با استفاده از رویکرد MABC، به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است (Roorkiwal *et al.*, 2020). در نهایت، ابزارهای ژنومی برای شناسایی نواحی ژنومی (QTL) مرتبط با ژن‌های مرتبط با عملکرد دانه و تحمل غیر زیستی مفید هستند که می‌توانند در اصلاح ژنومی کمکی نخود استفاده شوند.

معرفی ابزارها و تکنیک‌های مدرن در اصلاح ژنتیکی محصولات برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده برای غذا و تغییرات شدید محیطی ضروری است. به‌طور سنتی، اصلاح نژاد و نقشه‌برداری ژنتیکی صفات مهم زراعی، به جمعیت‌های هاپلوئید دو والدینی و دوگانه وابسته است. با این حال، این نوع جمعیت‌ها تنوع آلی کم و وضوح مکان‌یابی محدودی^۱ را ارائه می‌دهند (Samantara *et al.*, 2021). برای نخود، مکان‌یابی ارتباطی آشیانه‌ای (متوالی) (NAM)^۲ و جمعیت‌های حاصل از تلاقی نسل پیشرفته چند والدینی (MAGIC)^۳ برای ایجاد الگوهای متنوعی از نوترکیب با ایجاد تلاقی بین لاین‌های متعدد (۴، ۸ یا ۱۶ والدین) با منشأ متنوع در حال توسعه هستند.

مبنای اعمال هر استراتژی بهبود ژنتیکی، استفاده از تنوع ژنتیکی موجود در گونه، برای صفات هدف و توسعه روش‌های اصلاحی با استفاده از اصول ژنتیکی مندلی و کمی برای انتخاب کارآمد است (Acquaah, 2015). روش‌های اصلاحی مبتنی بر روش‌های نوترکیبی (هیبریداسیون)، جهش و روش‌های تراریخته، باهدف ایجاد تنوع ژنتیکی جدید در محصولات و سپس معرفی ژن‌ها و آلل‌های مرتبط با صفات مورد علاقه در ارقام جدید بوده است (Gangashetty *et al.*, 2016)؛ بنابراین ایجاد تنوع ژنتیکی، انتخاب فنوتیپی افراد مورد نظر و ارزیابی بعدی لاین‌های انتخابی، سه مرحله اساسی یک برنامه اصلاحی است (Raina *et al.*, 2019).

انتظار می‌رود اجرای فناوری‌های اصلاحی جدید به بهبودهای قابل توجهی در بهره‌وری محصول نخود کمک کند. در حالی که روش‌های به نژادی مرسوم (سنتی)، منجر به توسعه بیش از ۲۰۰ گونه بهبودیافته نخود در گذشته شده است، هنوز

³ multi-parent advanced generation intercross

¹ limited mapping resolution

² nested association mapping

ضروری است.

هیبریداسیون و روش‌های مکمل اصلاحی نخود

تکنیک‌های هیبریداسیون درون‌گونه‌ای و گسترده عمدتاً برای بهبود نخود زراعی بکار گرفته شده است (Waqas *et al.*, 2019). لازم به ذکر است، چندین ژن از طریق هیبریداسیون به نخود زراعی وارد شده است. برای مثال، ژن‌هایی از گونه‌های *C. echinospermum* و *C. reticulatum* را به گونه *C. arietinum* وارد کرده و تا ۳۹ درصد، افزایش در عملکرد دانه مشاهده شده است (Singh and Ocampo, 1997).

ورود ژن‌هایی از گونه *C. reticulatum* به نخود زراعی باعث افزایش عملکرد دانه به میزان ۱۷-۶۱ درصد شده است (Croser *et al.*, 2003). با توجه به تحمل به تنش‌های غیر زیستی، سطح قابل توجهی از تحمل به خشکی در *C. pinnatifidum* و *C. reticulatum* یافت شده است (Canci and Toker, 2009). گزارش شده است که *C. reticulatum* و *C. pinnatifidum* تا دمای ۴۱/۸ درجه سانتی‌گراد در برابر تنش گرمایی مقاومت می‌کنند. به‌موازات آن، *C. bijugum*، *C. echinospermum*، *C. pinnatifidum* و *C. reticulatum* تحمل بالایی نسبت به دماهای پایین نشان داده‌اند (Singh *et al.*, 2007; Toker *et al.*, 1995). باین حال تا به امروز هیچ گزارشی برای توصیف ژن‌های مرتبط با تحمل سرما از نخود وحشی به نخود زراعی وجود ندارد (Arriagada *et al.*, 2022). به دلیل ناسازگاری ژنتیکی در نخود، استفاده از دو گونه وحشی *Cicer* (*C. echinospermum* و *C. reticulatum*)، جهت هیبریداسیون بین‌گونه‌ای محدود بوده است (Gaur *et al.*, 2009). گونه *C. reticulatum* به دلیل داشتن آلل‌های مقاومت به بیماری، خشکی و تنش گرمایی (Canci and Toker, 2009) و داشتن اجزای عملکرد مناسب (Croser *et al.*, 2003) به‌طور گسترده به‌عنوان والد اهدا کننده مورد استفاده قرار گرفته و به‌راحتی می‌تواند با نخود کشت شده *C. arietinum* تلاقی یابد.

رویکردهای جدیدتر برای هیبریداسیون، مانند توسعه جمعیت‌های متقاطع نسل پیشرفته چند والدینی (MAGIC)^۳،

(and Tsujimoto, 2016). ضمناً توجه به این نکته مهم است، که انتخاب والدین مناسب، کلید موفقیت در هر برنامه هیبریداسیون، از طریق آزمایش‌های نتاج است (Jeffrey *et al.*, 2021). اگرچه نخود یک‌گونه خودگردانه‌افشان است، اما میزان گرده‌افشانی متقاطع طبیعی بین ۱۰ تا ۵۰ درصد است (Raina *et al.*, 2019).

محدودیت اصلی در هر برنامه اصلاح نژاد نخود، پایه ژنتیکی آن است که تولید ارقام جدید نخود برتر با تحمل طولانی‌مدت به اکثر تنش‌های غیر زیستی را برای زارعین دشوار می‌کند (Jha *et al.*, 2018). جنس‌لرین، برای مؤثرتر کردن تلاش‌های اصلاحی، گسترش پایه ژنتیکی نخود بسیار مورد نیاز است (Raina *et al.*, 2019). در این زمینه، نشانگرهای مولکولی (از جمله SSRs^۱) یا ژن‌های مرتبط با مقاومت/تحمل به تنش‌های زیستی یا غیر زیستی (مانند استفاده از EST^۲ و SNPs) باید توسط تکنیک‌های مختلف از جمله انتخاب با کمک نشانگر شناسایی و مورد استفاده قرار گیرند (Lim *et al.*, 2007; Tuberosa and Salvi, 2004). از طرفی، از زمان شروع گزینش نخود برای بهبود ژنتیکی، انتخاب نژادهای بومی یا معرفی شده توسط پرورش‌دهندگان برای توسعه ارقام جدید نخود استفاده شده است، درحالی‌که جدیدترین ارقام از طریق هیبریداسیون توسعه یافته‌اند (Gaur *et al.*, 2012). باین حال، این پیشرفت‌ها، با استفاده از روش‌های اصلاحی مرسوم، هنوز برای تضمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد انسانی، رضایت‌بخش نیستند. اتخاذ فناوری‌های مدرن و استراتژی‌های مختلف اصلاحی می‌تواند نقش مهمی در افزایش نرخ بهره ژنتیکی برای صفات مربوط به عملکرد دانه در شرایط محیطی تنش‌زا ایفا کند (Maphosa *et al.*, 2020).

در این زمینه، توسعه منابع ژنتیکی و ژنومی برای نخود، مانند در دسترس بودن بسیاری از نشانگرهای مولکولی، نقشه‌های ژنتیکی متراکم، و شناسایی QTLها، همراه با فناوری‌های "omics"، بهبود عملکرد دانه و سازگاری نخود با تنش‌های غیر زیستی، لازم می‌باشد (Devasirvatham and Tan, 2018). بنابراین، ادغام بین تکنیک‌های اصلاحی مرسوم و مدرن برای تسریع دستاوردهای ژنتیکی برنامه‌های پرورش نخود

³ Multi-parent advanced generation intercross

¹ sequence repeat (SSR)

² expressed sequence tag (EST)

ژن‌های خاص کنترل‌کننده صفات مورد نظر، در حبوبات مورد استفاده قرار گیرد (Gangashetty *et al.*, 2016). بنابراین، ادغام بین این رویکردهای اصلاحی، کلید توسعه ارقام نخود پر محصول است که در برابر پیامدهای تغییرات آب و هوایی مقاوم هستند. انواع مختلف اومیکس، ملنند ژنومیکس، ترانس کریپتومیکس، پروتئومیکس، و متابولومیکس، برای توصیف پاسخ گیاه، در سطوح مولکولی مختلف، به شرایط محیطی تنش‌زا مانند خشکی استفاده شده است. از طرفی شناسایی ژن‌های القاشده در شرایط تنش خشکی نه تنها برای درک مکانیسم‌های مولکولی تحمل به خشکی ضروری است، بلکه در توسعه گیاهان متحمل اهمیت دارد.

تغییرات در الگوهای بارندگی و تنش گرمایی، احتمالاً عواملی هستند که بیشترین تأثیر را بر عملکرد و کیفیت نخود زراعی دارند. در این زمینه، یکی از چالش‌های اصلی به نژادگران گیاهی، تولید ارقام پر محصول است که بتوانند با سناریوهای تغییرات آب و هوایی مقابله کنند. از این نظر، پیش اصلاحی به دلیل وجود پایه ژنتیکی باریک گونه‌های زراعی، نقش اساسی در بهبود ژنتیکی نخود دارد. معرفی و ورود ژن‌ها و آلل‌های مطلوب از ژرم‌پلاسسم وحشی به نخود زراعی می‌تواند سطوح تحمل به تنش غیر زیستی و عملکرد آنها را بهبود بخشد که برای حفظ امنیت غذایی در سال‌های آینده مورد نیاز است. از این رو تلاش‌های زیادی برای توسعه ارقام نخود متحمل به تنش‌های غیر زیستی مختلف صورت گرفته است که از طریق ترکیب روش‌های اصلاحی مرسوم و مولکولی (اومیکس) حاصل شده است. باین‌حال، هنوز تلاش‌هایی وجود دارد که باید انجام شود. در آینده، انتخاب ارقام جدید باید بر اساس یک توصیف کامل فنوتیپی و ژنتیکی از مواد مورد استفاده به‌عنوان ماده والدین در برنامه‌های اصلاحی باشد. این می‌تواند بر اساس تکنیک‌های جدید فنوتیپ‌یابی با بازده بالا (Mir *et al.*, 2019)، مانند توصیف دمای تاج پوشش گیاه و معماری سیستم ریشه در آزمایش‌های گرما و تنش خشکی (Brunel-Saldias *et al.*, 2020) باشد.

روش‌های تعیین توالی DNA باید سریع‌تر، دقیق‌تر و ارزان‌تر باشد تا اطلاعات ژنتیکی گیاهان مورد استفاده در برنامه‌های اصلاحی به دست آید. علاوه بر این، با توجه به افزایش استفاده از داده‌های ژنومیک و محیطی، استفاده از

می‌تواند برای ترکیب آلل‌های مطلوب برای تحمل تنش‌های غیر زیستی و سایر صفات مورد نظر استفاده شود (Huang *et al.*, 2015). در نخود، یک جمعیت MAGIC در ICRISAT با استفاده از هشت رقم اصلاح‌شده و لاین‌های اصلاح‌شده به‌طور گسترده توسعه‌یافته است. چندین ژنوتیپ از جمعیت MAGIC، عملکرد و تحمل به تنش خشکی و گرمایی بالاتری را نسبت به بهترین نمونه نشان داده‌اند؛ بنابراین، این ژنوتیپ‌ها، منبع ژرم‌پلاسسم مفیدی را، با ترکیبات آلی متنوع، برای بهبود برنامه‌های جهانی اصلاح نخود فراهم می‌کنند (Samineni *et al.*, 2021).

روش‌های جهش‌زایی در شرایطی که محصولات دارای تنوع ژنتیکی محدود، گل‌های کوچک و زمانی که هیبریداسیون آنها بسیار دشوار است، مفید خواهد بود. برخی از این جهش‌یافته‌ها، مستقیماً به‌عنوان ارقام، آزاد می‌شوند یا به‌عنوان اهدا کننده، برای بهبود یک صفت خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند (Oladosu *et al.*, 2016). از جهش‌زایی، برای بهبود تحمل به تنش‌های غیر زنده، استفاده شده است. به‌عنوان مثال، ۱۰ گونه از گونه‌های Cicer تحت تابش اشعه گاما قرار گرفته تا تحمل به خشکی، گرما و تنش شوری را بهبود بخشند و بیشتر لاین‌های جهش‌یافته نسبت به والدین خود نسبت به تنش‌های مربوطه متحمل‌تر بوده‌اند (Toker, 2014). علاوه بر این، از اشعه گاما برای بهبود تحمل سرما در دو ژنوتیپ نخود (MCC495 و MCC741) استفاده شده است (Keykha-*et al.*, 2011). با آنکه، امروزه از روش‌های اصلاحی مرسوم، عملکرد و تحمل به تنش‌های غیر زیستی را افزایش داده‌اند؛ اما محدودیت اصلی این روش‌ها، این است که صرفاً برای صفاتی با وراثت‌پذیری بالا مناسب هستند (Maphosa *et al.*, 2020). صفات مرتبط با تحمل به تنش‌های غیر زیستی و عملکرد، چندژنی هستند و وراثت‌پذیری پایینی دارند و به‌شدت تحت تأثیر محیط قرار می‌گیرند (Dormatey *et al.*, 2020). اصلاح تضمینی برای رسیدن به سطح عملکرد دانه نخود مورد نیاز برای امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان، در محیط‌های شدید و پرتنش به دلیل تغییرات آب و هوایی به‌راحتی مقدور نیست (Maphosa *et al.*, 2020). در رسیدن به این مرحله، روش‌های اصلاحی مدرن (omics) می‌تواند به‌عنوان مکملی برای افزایش کارایی انتخاب، کاهش زمان پرورش، و شناسایی

به طور کل می‌توان نتیجه گرفت که فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کلیدی، توسط SA، نقش مهمی در بهبود تنش اکسیداتیو ناشی از تنش در گیاهان نخود داشته است. به موازات آن، مدیریت اثرات تنش، به ویژه در ریشه‌ها با تجمع قندها و پرولین، نیز ثابت شده است که بخشی جدایی‌ناپذیر از توسعه تحمل به تنش توسط SA است. هشت ژن HSP، تنظیم‌کننده زمان گلدهی (bHLH, bZIP, SFH3, Myb, GI, FLD, efl1) و SBP) در نخود گزارش شده‌اند که نقش اساسی در تحمل تنش گرمایی دارند. QTL‌هایی در مناطق ژنومی LG4 برای عملکرد در شرایط شوری همراه شناسایی شده که بین ۲۲/۶ تا ۴۸/۵ درصد از تغییرات فنوتیپی تحمل به تنش سرمایی را کنترل می‌کند. تنش‌های غیر زیستی بر رشد گیاه تأثیر منفی می‌گذارند و در نتیجه باعث کاهش قابل توجه بهره‌وری محصول می‌شوند. برای کاهش بازیابی اثرات مخرب چنین شرایط محیطی نامطلوب، گیاهان استراتژی‌های سازگاری مختلفی را در سطوح سلولی و متابولیک ایجاد کرده‌اند. ادغام رویکردهای مختلف بهبود ژنتیکی، درک بهتر مکانیسم‌های مولکولی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی درگیر در پاسخ، تولید گیاه نخود متحمل به شرایط محیطی تنش‌زا را ممکن می‌سازد. انتخاب/غربال دقیق‌تر و مؤثرتر ژنوتیپ‌ها و/یا ژن‌ها/آلل‌ها، با در نظر گرفتن اثرات تغییرات آب و هوایی می‌تواند با تأثیر میان‌مدت و بلندمدت بر تولید نخود، به افزایش عملکرد دانه کمک می‌کند...

رویکردهای محیطی که شامل استفاده از روش‌های محیطی برای توصیف عملکرد یک گیاه در گستره متنوعی از متغیرهای محیطی که گیاه در طول چرخه رشد خود در معرض آن‌ها قرار می‌گیرد مهم و کلیدی است (Resende et al., 2021).

با توجه به اینکه اثرات زیست‌محیطی گرمایش جهانی در مناطق مختلف جغرافیایی متغیر است، در برنامه‌های اصلاح نژاد مدرن بسیار مفید است. علاوه بر این، تلاش برای بهبود غلظت مواد مغذی در غلات، به‌ویژه ریزمغذی‌ها مانند آهن و روی نیز بلید مورد توجه و افزایش قرار گیرد. یک ابزار قدرتمند برای این منظور، انتخاب دانه‌ها با استفاده از روش‌های یونومیک است، به‌عنوان مثال، با استفاده از طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس میکرو می‌توان تعیین و نقشه‌برداری از غلظت عناصر غذایی و توزیع آنها در دانه‌ها را انجام داد (Ramos et al., 2016). هم‌زمان، داده‌کاوی باید سریع‌تر و کاربر پسندتر باشد، به‌طوری‌که پرورش‌دهندگان گیاه بتوانند مستقیماً اطلاعات را تجزیه و تحلیل و تفسیر کنند تا در طول فرآیند پیش انتخاب تصمیم بگیرند که کدام ماده گیاهی باید در مراحل بعدی اصلاح استفاده شود. استفاده از هوش مصنوعی برای پیوند دادن اطلاعات به‌دست‌آمده در مقیاس‌های مختلف نیز در حال پیشرفت است و باید یکی از اهداف دهه حاضر باشد (Harfouche et al., 2019). علاوه بر این، حفظ منابع ژنتیکی گیاهی باید در اولویت قرار گیرد زیرا استفاده از تنوع ژنتیکی برای مقابله با ناملایمات اقلیمی آینده دارای اهمیت وافر است.

نتیجه‌گیری کلی

References

- Abbass, K., Qasim, M.Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H. and Younis, I., 2022. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), pp.42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Abbo, S., Lev-Yadun, S. and Galwey, N., 2002. Vernalization response of wild chickpea. *New Phytologist*, 154(3), pp.695–701. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00405.x>
- Acquaah, G., 2015. Conventional plant breeding principles and techniques. In J. M. Al-Khayri, S. M. Jain, & D. V. Johnson (Eds.), *Advances in Plant Breeding Strategies: Breeding, Biotechnology and Molecular Tools* (pp.115–158). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22521-0_5
- Agarwal, G., Garg, V., Kudapa, H., Doddamani, D., Pazhamala, L.T., Khan, A.W., Thudi, M., Lee, S.H. and Varshney, R.K., 2016. Genome-wide dissection of AP2/ERF and HSP90 gene families in five legumes and

- expression profiles in chickpea and pigeonpea. *Plant Biotechnology Journal*, 14(7), pp.1563–1577. <https://doi.org/10.1111/pbi.12520>
- Agrawal, L., Gupta, S., Mishra, S.K., Pandey, G., Kumar, S., Chauhan, P.S., Chakrabarty, D. and Nautiyal, C.S., 2016. Elucidation of complex nature of PEG induced drought-stress response in rice root using comparative proteomics approach. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1466. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01466>
- Arriagada, O., Cacciuttolo, F., Cabeza, R.A., Carrasco, B. and Schwember, A.R., 2022. A comprehensive review on chickpea (*Cicer arietinum* L.) breeding for abiotic stress tolerance and climate change resilience. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(12), 6794. <https://doi.org/10.3390/ijms23126794>
- Atieno, J., Colmer, T.D., Taylor, J., Li, Y., Quealy, J., Kotula, L., Nicol, D., Nguyen, D.T., Brien, C. and Langridge, P., 2021. Novel salinity tolerance loci in chickpea identified in glasshouse and field environments. *Frontiers in Plant Science*, 12, 667910. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.667910>
- Bajaj, D., Das, S., Badoni, S., Kumar, V., Singh, M., Bansal, K.C., Tyagi, A.K. and Parida, S.K., 2015. Genome-wide high-throughput SNP discovery and genotyping for understanding natural (functional) allelic diversity and domestication patterns in wild chickpea. *Scientific Reports*, 5(1), 12468. <https://doi.org/10.1038/srep12468>
- Bajaj, S., Targolli, J., Liu, L.F., Ho, T.H.D. and Wu, R., 1999. Transgenic approaches to increase dehydration-stress tolerance in plants. *Molecular Breeding*, 5, pp.493–503. <https://doi.org/10.1023/a:1009660413133>
- Barua, P., Lande, N.V., Subba, P., Gayen, D., Pinto, S., Keshava Prasad, T., Chakraborty, S. and Chakraborty, N., 2019. Dehydration-responsive nuclear proteome landscape of chickpea (*Cicer arietinum* L.) reveals phosphorylation-mediated regulation of stress response. *Plant, Cell & Environment*, 42(1), pp.230–244. <https://doi.org/10.1111/pce.13334>
- Basra, A., 1997. *Mechanisms of environmental stress resistance in plants*. CRC Press.
- Bhandari, K., Sharma, K.D., Hanumantha Rao, B., Siddique, K.H., Gaur, P., Agrawal, S.K., Nair, R.M. and Nayyar, H., 2017. Temperature sensitivity of food legumes: A physiological insight. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39, 2361. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2361-5>
- Bharadwaj, C., Tripathi, S., Soren, K.R., Thudi, M., Singh, R.K., Sheoran, S., Roorkiwal, M., Patil, B.S., Chitkineni, A. and Palakurthi, R., 2021. Introgression of “QTL-hotspot” region enhances drought tolerance and grain yield in three elite chickpea cultivars. *Plant Genome*, 14(1), e20076. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20076>
- Bharti, A. and Garg, N., 2019. SA and AM symbiosis modulate antioxidant defense mechanisms and asada pathway in chickpea genotypes under salt stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 178, pp.66–78. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.025>
- Bhattacharyya, P., Pathak, H. and Pal, S., 2020. Impact of climate change on agriculture: Evidence and predictions. In P. Bhattacharyya, H. and Pathak, S. Pal (Eds.), *Climate smart agriculture: Concepts, challenges, and opportunities* (pp.17–32). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9132-7_2
- Bıçer, T. and Şakar, D., 2008. Heritability and gene effects for yield and yield components in chickpea. *Hereditas*, 145(5), pp.220–224. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.2008.02061.x>

- Bodner, G., Nakhforoosh, A. and Kaul, H.-P., 2015. Management of crop water under drought: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), pp.401–442. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0283-4>
- Brunel-Saldias, N., Ferrio, J.P., Elazab, A., Orellana, M. and Del Pozo, A., 2020. Root architecture and functional traits of spring wheat under contrasting water regimes. *Frontiers in Plant Science*, 11, 581140. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.581140>
- Bulgari, R., Franzoni, G. and Ferrante, A., 2019. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Canci, H. and Toker, C., 2009. Evaluation of yield criteria for drought and heat resistance in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(1), pp.47–54. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.2008.00345.x>
- Carraro, E. and Di Iorio, A., 2022. Eligible strategies of drought response to improve drought resistance in woody crops: A mini-review. *Plant Biotechnology Reports*, 16(3), pp.265–282. <https://doi.org/10.1007/s11816-021-00733-x>
- Chaturvedi, S., Singh, N., Gaur, P., Varshney, R. and Mishra, N., 2014. New challenges in breeding chickpea under changing climate. *Indian Society of Pulses Research and Development*, 102–113.
- Chung, Y.S., Choi, S.C., Jun, T.H. and Kim, C., 2017. Genotyping-by-sequencing: A promising tool for plant genetics research and breeding. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 58, pp.425–431. <https://doi.org/10.1007/s13580-017-0297-8>
- Croser, J., Clarke, H., Siddique, K. and Khan, T., 2003. Low-temperature stress: Implications for chickpea (*Cicer arietinum* L.) improvement. *CRC Critical Reviews in Plant Sciences*, 22(2), pp.185–219. <https://doi.org/10.1080/713610855>
- Cushman, J.C. and Bohnert, H.J., 2000. Genomic approaches to plant stress tolerance. *Current Opinion in Plant Biology*, 3(2), 117–124. [https://doi.org/10.1016/s1369-5266\(99\)00052-7](https://doi.org/10.1016/s1369-5266(99)00052-7)
- de Mendoza, D. and Pilon, M., 2019. Control of membrane lipid homeostasis by lipid-bilayer associated sensors: A mechanism conserved from bacteria to humans. *Progress in Lipid Research*, 76, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2019.100996>
- Devasirvatham, V. and Tan, D.K., 2018. Impact of high temperature and drought stresses on chickpea production. *Agronomy*, 8(8), 145. <https://doi.org/10.3390/agronomy8080145>
- Devasirvatham, V., Gaur, P.M., Mallikarjuna, N., Raju, T.N., Trethowan, R.M. and Tan, D.K., 2013. Reproductive biology of chickpea response to heat stress in the field is associated with the performance in controlled environments. *Field Crops Research*, 142, pp.9–19. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.011>
- Devasirvatham, V., Tan, D., Gaur, P., Raju, T. and Trethowan, R., 2012. High temperature tolerance in chickpea and its implications for plant improvement. *Crop and Pasture Science*, 63(5), pp.419–428. <https://doi.org/10.1071/cp11218>

- Dormatey, R., Sun, C., Ali, K., Coulter, J.A., Bi, Z. and Bai, J., 2020. Gene pyramiding for sustainable crop improvement against biotic and abiotic stresses. *Agronomy*, 10(9), 1255. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091255>
- Dua, R., 1992. Differential response of chickpea (*Cicer arietinum*) genotypes to salinity. *The Journal of Agricultural Science*, 119(3), pp.367–371. <https://doi.org/10.1017/s002185960001220x>
- Esechie, H., Al-Saidi, A. and Al-Khanjari, S., 2002. Effect of sodium chloride salinity on seedling emergence in chickpea. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 188(3), pp.155–160. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2002.00554.x>
- Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S. and Saud, S., 2017. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
- FAO., 2023. *Faostat*. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Farooq, M., Rizwan, M., Nawaz, A., Rehman, A. and Ahmad, R., 2017. Application of natural plant extracts improves the tolerance against combined terminal heat and drought stresses in bread wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(6), pp.528–538. <https://doi.org/10.1111/jac.12214>
- Fazeli-Nasab, B., Vessal, S., Bagheri, A. and Malekzadeh-Shafaroudi, S., 2025. Evaluation of drought-tolerant chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.) using morphophysiological and phytochemical traits. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1529177>
- Fischer, M.C., Rellstab, C., Tedder, A., Zoller, S., Gugerli, F., Shimizu, K.K., Holderegger, R. and Widmer, A., 2013. Population genomic footprints of selection and associations with climate in natural populations of *Arabidopsis halleri* from the Alps. *Molecular Ecology*, 22(22), pp.5594–5607. <https://doi.org/10.1111/mec.12521>
- Flowers, T.J., Gaur, P.M., Gowda, C.L., Krishnamurthy, L., Samineni, S., Siddique, K.H., Turner, N.C., Vadez, V., Varshney, R.K. and Colmer, T.D., 2010. Salt sensitivity in chickpea. *Plant, Cell & Environment*, 33(4), pp.490–509. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02051.x>
- Forni, C., Duca, D. and Glick, B.R., 2017. Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria. *Plant and Soil*, 410, pp.335–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3007-x>
- Gangashetty, P.I., Motagi, B.N., Pavan, R. and Roodagi, M.B., 2016. Breeding crop plants for improved human nutrition through biofortification: Progress and prospects. In J.M. Al-Khayri, S.M. Jain, & D.V. Johnson (Eds.), *Advances in plant breeding strategies: Agronomic, abiotic and biotic stress traits* (pp.35–76). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22518-0_2
- Garg, R., Shankar, R., Thakkar, B., Kudapa, H., Krishnamurthy, L., Mantri, N., Varshney, R.K., Bhatia, S. and Jain, M., 2016. Transcriptome analyses reveal genotype-and developmental stage-specific molecular responses to drought and salinity stresses in chickpea. *Scientific Reports*, 6(1), 19228. <https://doi.org/10.1038/srep19228>
- Gaur, P.M., Jukanti, A.K. and Varshney, R.K., 2012. Impact of genomic technologies on chickpea breeding strategies. *Agronomy*, 2(3), pp.199–221. <https://doi.org/10.3390/agronomy2030199>

- Gaur, P.M., Jukanti, A.K., Samineni, S., Chaturvedi, S.K., Basu, P.S., Babbar, A., Jayalakshmi, V., Nayyar, H., Devasirvatham, V. and Mallikarjuna, N., 2013. Climate change and heat stress tolerance in chickpea. In *Climate change and plant abiotic stress tolerance* (pp.837–856). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9783527675265.ch31>
- Gaur, P.M., Mallikarjuna, N., Knights, T., Beebe, S., Debouck, D., Mjía, A., Malhotra, R.S., Imtiaz, M., Sarker, A. and Tripathi, S., 2009. Gene introgression in grain legumes. In S. Gupta, M. Ali, & B. B. Singh (Eds.), *Grain legumes: Genetic improvement, management and trade* (pp.1–17). Indian Society of Pulses Research and Development (IIPR).
- Gaur, P.M., Samineni, S., Thudi, M., Tripathi, S., Sajja, S.B., Jayalakshmi, V., Mannur, D.M., Vijayakumar, A.G., Ganga Rao, N.V. and Ojiewo, C., 2019. Integrated breeding approaches for improving drought and heat adaptation in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant Breeding*, 138(4), pp.389–400. <https://doi.org/10.1111/pbr.12641>
- Gaur, P., Samineni, S. and Varshney, R., 2014. Drought and heat tolerance in chickpea. *Legume Perspectives*, 3, pp.15–17.
- Ghosh, D. and Xu, J., 2014. Abiotic stress responses in plant roots: A proteomics perspective. *Frontiers in Plant Science*, 5, 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00006>
- Giordano, M., Petropoulos, S.A. and Roupael, Y., 2021. Response and defence mechanisms of vegetable crops against drought, heat and salinity stress. *Agriculture*, 11(5), 463. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050463>
- Gorafi, Y.S.A. and Tsujimoto, H., 2016). *Leymus racemosus*: A potential species of gene pool enrichment for wheat improvement. In V. R. Rajpal, S. R. Rao, & S. N. Raina (Eds.), *Gene pool diversity and crop improvement: Volume 1* (pp.1–15). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27096-8_1
- Grabherr, M.G., Haas, B.J., Yassour, M., Levin, J.Z., Thompson, D.A., Amit, I., Adiconis, X., Fan, L., Raychowdhury, R. and Zeng, Q., 2011. Full-length transcriptome assembly from RNA-Seq data without a reference genome. *Nature Biotechnology*, 29(7), 644. <https://doi.org/10.1038/nbt.1883>
- Gupta, P., Kumar, J., Mir, R. and Kumar, A., 2010. Marker-assisted selection as a component of conventional plant breeding. In J. Janick (Ed.), *Plant breeding reviews* (pp.217–289). <https://doi.org/10.1002/9780470535486.ch4>
- Gupta, S., Mishra, S.K., Misra, S., Pandey, V., Agrawal, L., Nautiyal, C.S. and Chauhan, P.S., 2020. Revealing the complexity of protein abundance in chickpea root under drought-stress using a comparative proteomics approach. *Plant Physiology and Biochemistry*, 151, pp.88–102. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.03.005>
- Guyon, V., Tang, W.-h., Monti, M.M., Raiola, A., Lorenzo, G.D., McCormick, S. and Taylor, L.P., 2004. Antisense phenotypes reveal a role for SHY, a pollen-specific leucine-rich repeat protein, in pollen tube growth. *The Plant Journal*, 39(4), pp.643–654. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2004.02162.x>
- Harfouche, A.L., Jacobson, D.A., Kainer, D., Romero, J.C., Harfouche, A.H., Mugnozza, G.S., Moshelion, M., Tuskan, G.A., Keurentjes, J.J. and Altman, A., 2019. Accelerating climate resilient plant breeding by applying

- next-generation artificial intelligence. *Trends in Biotechnology*, 37(11), pp.1217–1235. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.05.007>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M.M., Roychowdhury, R. and Fujita, M., 2013. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), pp.9643–9684. <https://doi.org/10.3390/ijms14059643>
- Huang, B.E., George, A.W., Forrest, K.L., Kilian, A., Hayden, M.J., Morell, M.K. and Cavanagh, C.R., 2012. A multiparent advanced generation inter-cross population for genetic analysis in wheat. *Plant Biotechnology Journal*, 10(7), pp.826–839. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2012.00702.x>
- Huang, B.E., Verbyla, K.L., Verbyla, A.P., Raghavan, C., Singh, V.K., Gaur, P., Leung, H., Varshney, R.K. and Cavanagh, C.R., 2015. MAGIC populations in crops: Current status and future prospects. *Theoretical and Applied Genetics*, 128(6), pp.999–1017. <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2506-0>
- Hussain, H.A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S.A., Men, S. and Wang, L., 2018. Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in Plant Science*, 9, 393. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00393>
- IPCC., 2013). *Climate change 2013: The physical science basis* (Vol. 1535). Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat; Cambridge, UK: Cambridge University.
- Jaganathan, D., Thudi, M., Kale, S., Azam, S., Roorkiwal, M., Gaur, P.M., Kishor, P.K., Nguyen, H., Sutton, T. and Varshney, R.K., 2015. Genotyping-by-sequencing based intra-specific genetic map refines a "QTL-hotspot" region for drought tolerance in chickpea. *Molecular Genetics and Genomics*, 290, pp.559–571. <https://doi.org/10.1007/s00438-014-0932-3>
- Janni, M., Gullì, M., Maestri, E., Marmioli, M., Valliyodan, B., Nguyen, H.T. and Marmioli, N., 2020. Molecular and genetic bases of heat stress responses in crop plants and breeding for increased resilience and productivity. *Journal of Experimental Botany*, 71(13), pp.3780–3802. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa034>
- Jeffrey, C., Trethowan, R. and Kaiser, B., 2021. Chickpea tolerance to temperature stress: Status and opportunity for improvement. *Journal of Plant Physiology*, 267, 153555. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153555>
- Jha, U.C., 2018. Current advances in chickpea genomics: Applications and future perspectives. *Plant Cell Reports*, 37(7), pp.947–965. <https://doi.org/10.1007/s00299-018-2305-6>
- Jha, U.C., Bohra, A. and Singh, N.P., 2014. Heat stress in crop plants: its nature, impacts and integrated breeding strategies to improve heat tolerance. *Plant Breeding*, 133(6), pp.679–701. <https://doi.org/10.1111/pbr.12217>
- Jha, U.C., Bohra, A., Nayyar, H., Rani, A., Devi, P., Saabale, P.R. and Parida, S.K., 2019a. Breeding and genomics approaches for improving productivity gains in chickpea under changing climate. In C. Kole (Ed.), *Genomic designing of climate-smart pulse crops* (pp.135–164). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96932-9_3
- Jha, U.C., Kole, P.C. and Singh, N.P., 2019b. Nature of gene action and combining ability analysis of yield and yield related traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under heat stress. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89, pp.500–508. <https://doi.org/10.56093/ijas.v89i3.87596>

- Jha, U.C., Kole, P.C. and Singh, N.P., 2021a. QTL mapping for heat stress tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Legume Research - An International Journal*, 44, pp.382–387.
- Jha, U.C., Nayyar, H., Jha, R., Nath, C.P. and Datta, D., 2020. Chickpea breeding for abiotic stress: Breeding tools and 'omics' approaches for enhancing genetic gain. In S.S. Gosal & S.H. Wani (Eds.), *Accelerated plant breeding, Volume 3: Food legumes* (pp.211–234). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47306-8_8
- Jha, U.C., Nayyar, H., Palakurthi, R., Jha, R., Valluri, V., Bajaj, P., Chitikineni, A., Singh, N.P., Varshney, R.K. and Thudi, M., 2021b. Major QTLs and potential candidate genes for heat stress tolerance identified in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 12, 655103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.655103>
- Joshi, P., Yasin, M. and Sundaram, P., 2018. Genetic variability, heritability and genetic advance study for seed yield and yield component traits in a chickpea recombinant inbred line (RIL) population. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 6(2), pp.136–141. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.6231>
- Kanooni, H. and Malhotra, R., 2003. Genetic variation and relationships between traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.) lines under dryland conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 5(3), 185–194. [In Persian].
- Karalija, E., Vergata, C., Basso, M.F., Negussu, M., Zaccai, M., Grossi-de-Sa, M.F. and Martinelli, F., 2022. Chickpeas' tolerance of drought and heat: Current knowledge and next steps. *Agronomy*, 12(10), 2248. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102248>
- Kathiria, K., Nayagapara, D., Vaddoria, M. and Poshiya, V., 1997. Screening of chickpea genotypes for salinity tolerance during germination and early seedling growth. *Gujarat Agricultural University Research Journal*, 22, pp.28–32.
- Kaur, H., Hussain, S.J., Kaur, G., Poor, P., Alamri, S., Siddiqui, M.H. and Khan, M.I.R., 2022. Salicylic acid improves nitrogen fixation, growth, yield and antioxidant defence mechanisms in chickpea genotypes under salt stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(5), pp.2034–2047. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10592-7>
- Kaushal, N., Gupta, K., Bhandhari, K., Kumar, S., Thakur, P. and Nayyar, H., 2011. Proline induces heat tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) plants by protecting vital enzymes of carbon and antioxidative metabolism. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 17(3), pp.203–213. <https://doi.org/10.1007/s12298-011-0078-2>
- Kaya, M., Kaya, G., Kaya, M.D., Atak, M., Saglam, S., Khawar, K.M. and Ciftci, C.Y., 2008. Interaction between seed size and NaCl on germination and early seedling growth of some Turkish cultivars of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Zhejiang University Science B*, 9, pp.371–377. <https://doi.org/10.1631/jzus.b0720268>
- Keerthi Sree, Y., Lakra, N., Manorama, K., Ahlawat, Y., Zaid, A., Elansary, H.O., Sayed, S.R.M., Rashwan, M.A. and Mahmoud, E.A., 2023. Drought-induced morpho-physiological, biochemical, metabolite responses and protein profiling of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Agronomy*, 13(7), 1814. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071814>

- Keykha-Akhar, F., Bagheri, A., Moshtaghi, N. and Nezami, A., 2011. The effect of gamma radiation on freezing tolerance of chickpea (*Cicer arietinum* L.) at in vitro culture. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 5(14).
- Kosgei, A., Kimurto, P., Gaur, P., Yeboah, M., Offei, S., Danquah, E., Muriuki, R., Thudi, M. and Varshney, R., 2017. Introgression of drought tolerance traits into adapted Kenyan chickpea varieties using marker assisted backcrossing (MABC). *Inter Drought-V: Hyderabad, India*, 32.
- Krishnamurthy, L., Kashiwagi, J., Gaur, P.M., Upadhyaya, H.D. and Vadez, V., 2010. Sources of tolerance to terminal drought in the chickpea (*Cicer arietinum* L.) minicore germplasm. *Field Crops Research*, 119(2), pp.322–330. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.08.002>
- Kumar, A., Kumar, V., Dubey, A.K., Ansari, M.A., Narayan, S., Meenakshi, Kumar, S., Pandey, V., Pande, V. and Sanyal, I., 2021. Chickpea glutaredoxin (CaGrx) gene mitigates drought and salinity stress by modulating the physiological performance and antioxidant defense mechanisms. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(5), pp.923–944. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00999-z>
- Kushwah, A., Bhatia, D., Singh, I., Thudi, M., Singh, G., Bindra, S., Vij, S., Gill, B., Bharadwaj, C. and Singh, S., 2021. Identification of stable heat tolerance QTLs using inter-specific recombinant inbred line population derived from GPF 2 and ILWC 292. *Plos One*, 16(8), e0254957. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254957>
- Leng, G. and Hall, J., 2019. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future. *Science of the Total Environment*, 654, pp.811–821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.434>
- Li, H., Rodda, M., Gnanasambandam, A., Aftab, M., Redden, R., Hobson, K., Rosewarne, G., Materne, M., Kaur, S. and Slater, A.T., 2015. Breeding for biotic stress resistance in chickpea: progress and prospects. *Euphytica*, 204(2), pp.257–288. <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1462-8>
- Li, J., Liu, L.N., Meng, Q., Fan, H. and Sui, N., 2020. The roles of chloroplast membrane lipids in abiotic stress responses. *Plant Signaling & Behavior*, 15(11), 1807152. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1807152>
- Li, L., Wang, Y., Li, H., Jiang, W., Wang, T., Zhang, C.-C., Wang, F. and Garmestani, H., 2019. Effect of the Zener-Hollomon parameter on the dynamic recrystallization kinetics of Mg-Zn-Zr-Yb magnesium alloy. *Computational Materials Science*, 166, pp.221–229. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.05.015>
- Li, P.S., Yu, T.F., He, G.H., Chen, M., Zhou, Y.B., Chai, S.C., Xu, Z.S. and Ma, Y.Z., 2014. Genome-wide analysis of the Hsf family in soybean and functional identification of GmHsf-34 involvement in drought and heat stresses. *BMC Genomics*, 15(1), 1009. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-1009>
- Li, Y., Ruperao, P., Batley, J., Edwards, D., Khan, T., Colmer, T.D., Pang, J., Siddique, K.H. and Sutton, T., 2018. Investigating drought tolerance in chickpea using genome-wide association mapping and genomic selection based on whole-genome resequencing data. *Frontiers in Plant Science*, 9, 190. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00190>
- Lim, K.J., Junttila, S., Fey, V. and Rudd, S., 2007. Genomeless genomics in crop improvement. In *Genomics-Assisted Crop Improvement* (pp.151–176). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6295-7_7

- Liu, Y., Li, J., Zhu, Y., Jones, A., Rose, R.J. and Song, Y., 2019. Heat stress in legume seed setting: effects, causes, and future prospects. *Frontiers in Plant Science*, 10, 938. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00938>
- Mahdavi Mashaki, K., Garg, V., Nasrollahnezhad Ghomi, A.A., Kudapa, H., Chitikineni, A., Zaynali Nezhad, K., Yamchi, A., Soltanloo, H., Varshney, R.K. and Thudi, M., 2018. RNA-Seq analysis revealed genes associated with drought stress response in kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plos One*, 13(6), e0199774. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199774>
- Maphosa, L., Richards, M.F., Norton, S.L. and Nguyen, G.N., 2020. Breeding for abiotic stress adaptation in chickpea (*Cicer arietinum* L.): A comprehensive review. *Crop Breeding, Genetics and Genomics*, 4(3), pp.1–39. <https://doi.org/10.20900/cbagg20200015>
- Mer, R., Prajith, P., Pandya, D.H. and Pandey, A., 2000. Effect of salts on germination of seeds and growth of young plants of *Hordeum vulgare*, *Triticum aestivum*, *Cicer arietinum* and *Brassica juncea*. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 185(4), pp.209–217. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00423.x>
- Mir, A.H., Bhat, M.A., Dar, S.A., Sofi, P.A., Bhat, N.A. and Mir, R.R., 2021. Assessment of cold tolerance in chickpea (*Cicer* spp.) grown under cold/freezing weather conditions of North-Western Himalayas of Jammu and Kashmir, India. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(5), pp.1105–1118. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00997-1>
- Mir, R.R., Reynolds, M., Pinto, F., Khan, M.A. and Bhat, M.A., 2019. High-throughput phenotyping for crop improvement in the genomics era. *Plant Science*, 282, pp.60–72. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.01.007>
- Mugabe, D., Coyne, C.J., Piaskowski, J., Zheng, P., Ma, Y., Landry, E., McGee, R., Main, D., Vandemark, G. and Zhang, H., 2019. Quantitative trait loci for cold tolerance in chickpea. *Crop Science*, 59(2), pp.573–582. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.08.0504>
- Nabati, J., Nezami, A., Hasanfard, A., Nemati, Z. and Kahrom, N., 2023. Prolonged exposure to freezing stress reduces the ability of chickpea seedlings to effectively tolerate extremely low temperatures. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1239008. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1239008>
- Nayyar, H., Bains, T. and Kumar, S., 2005. Low temperature induced floral abortion in chickpea: Relationship to abscisic acid and cryoprotectants in reproductive organs. *Environmental and Experimental Botany*, 53(1), pp.39–47. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.02.011>
- Nayyar, H., Singh, S., Kaur, S., Kumar, S. and Upadhyaya, H.D., 2006. Differential sensitivity of macrocarpa and microcarpa types of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to water stress: Association of contrasting stress response with oxidative injury. *Journal of Integrative Plant Biology*, 48(11), pp.1318–1329. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2006.00350.x>
- Newton, A.C., Bootman, M.D. and Scott, J.D., 2016. Second messengers. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 8(8), a005926. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a005926>
- Novaković, L., Guo, T., Bačić, A., Sampathkumar, A. and Johnson, K.L., 2018. Hitting the wall—Sensing and signaling pathways involved in plant cell wall remodeling in response to abiotic stress. *Plants*, 7(4), 89. <https://doi.org/10.3390/plants7040089>

- Oladosu, Y., Rafii, M.Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H.A., Miah, G. and Usman, M., 2016. Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: A review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 30(1), pp.1–16. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1087333>
- Parankusam, S., Bhatnagar-Mathur, P. and Sharma, K.K., 2017. Heat responsive proteome changes reveal molecular mechanisms underlying heat tolerance in chickpea. *Environmental and Experimental Botany*, 141, pp.132–144. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.07.007>
- Paul, P.J., Samineni, S., Thudi, M., Sajja, S.B., Rathore, A., Das, R.R., Khan, A.W., Chaturvedi, S.K., Lavanya, G.R. and Varshney, R.K., 2018. Molecular mapping of QTLs for heat tolerance in chickpea. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(8), 2166. <https://doi.org/10.3390/ijms19082166>
- Peter, K., Viola, D. and Daniel, K.Y.T., 2019. Chickpea abiotic stresses: Combating drought, heat and cold. In O. A.B. de Oliveira (Ed.), *Abiotic and Biotic Stress in Plants* (Ch. 10). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83404>
- Prasad, P.V., Bheemanahalli, R. and Jagadish, S.K., 2017. Field crops and the fear of heat stress—Opportunities, challenges and future directions. *Field Crops Research*, 200, pp.114–121. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.024>
- Priyadarshan, P.M., 2017. Genetics of traits. In *Biology of Hevea Rubber* (pp.127–129). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54506-6_8
- Pushpavalli, R., Berger, J.D., Turner, N.C., Siddique, K.H., Colmer, T.D. and Vadez, V., 2020. Cross-tolerance for drought, heat and salinity stresses in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(3), pp.405–419. <https://doi.org/10.1111/jac.12393>
- Pushpavalli, R., Krishnamurthy, L., Thudi, M., Gaur, P.M., Rao, M.V., Siddique, K.H., Colmer, T.D., Turner, N.C., Varshney, R.K. and Vadez, V., 2015. Two key genomic regions harbour QTLs for salinity tolerance in ICCV 2× JG 11 derived chickpea (*Cicer arietinum* L.) recombinant inbred lines. *BMC Plant Biology*, 15, Article 124. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0491-8>
- Raina, A., Khan, S., Wani, M.R., Laskar, R.A. and Mushtaq, W., 2019. Chickpea (*Cicer arietinum* L.) cytogenetics, genetic diversity and breeding. In J.M. Al-Khayri, S.M. Jain, & D.V. Johnson (Eds.), *Advances in Plant Breeding Strategies: Legumes: Volume 7* (pp.53–112). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23400-3_3
- Ramos, I., Pataco, I.M., Mourinho, M.P., Lidon, F., Reboredo, F., Pessoa, M.F., Carvalho, M.L., Santos, J.P. and Guerra, M., 2016. Elemental mapping of biofortified wheat grains using micro X-ray fluorescence. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 120, pp.30–36. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2016.03.014>
- Rani, A., Devi, P., Jha, U.C., Sharma, K.D., Siddique, K.H. and Nayyar, H., 2020. Developing climate-resilient chickpea involving physiological and molecular approaches with a focus on temperature and drought stresses. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1759. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01759>
- Rani, A., Kiran, A., Sharma, K.D., Prasad, P.V.V., Jha, U.C., Siddique, K.H.M. and Nayyar, H., 2021. Cold tolerance during the reproductive phase in chickpea (*Cicer arietinum* L.) is associated with superior cold

- acclimation ability involving antioxidants and cryoprotective solutes in anthers and ovules. *Antioxidants (Basel)*, 10(11), 1693. <https://doi.org/10.3390/antiox10111693>
- Rashid, K., Akhtar, M., Cheema, K.L., Rasool, I., Zahid, A., Hussain, A., Aqeel, M., Anwar, S.A., Amin, M. and Qadeer, Z., 2021. Development of selection criteria for assessment of chickpea (*Cicer arietinum* L.) on physiomorphic attributes under drought stress at seedling stage and maturity. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 22(3&4), pp.98–109.
- Ray, M., Sahoo, K., Prusty, M., Mishra, N. and Mishra, P., 2022. Temperature stress in chickpea and its improvement strategies. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 11, 4173–4183.
- Rayapuram, N., Bigeard, J., Alhoraibi, H., Bonhomme, L., Hesse, A.-M., Vinh, J., Hirt, H. and Pflieger, D., 2018. Quantitative phosphoproteomic analysis reveals shared and specific targets of Arabidopsis mitogen-activated protein kinases (MAPKs) MPK3, MPK4, and MPK6. *Molecular & Cellular Proteomics*, 17(1), pp.61–80. <https://doi.org/10.1074/mcp.ra117.000135>
- Raza, A., Charagh, S., Abbas, S., Hassan, M.U., Saeed, F., Haider, S., Sharif, R., Anand, A., Corpas, F.J., Jin, W. and Varshney, R.K., 2023. Assessment of proline function in higher plants under extreme temperatures. *Plant Biology (Stuttgart)*, 25(3), pp.379–395. <https://doi.org/10.1111/plb.13510>
- Raza, A., Mehmood, S.S., Shah, T., Zou, X., Yan, L., Zhang, X. and Khan, R.S.A., 2019. Applications of molecular markers to develop resistance against abiotic stresses in wheat. In M. Hasanuzzaman, K. Nahar, & M.A. Hossain (Eds.), *Wheat Production in Changing Environments: Responses, Adaptation and Tolerance* (pp.393–420). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6883-7_15
- Razzaq, A., Sadia, B., Raza, A., Khalid Hameed, M. and Saleem, F., 2019. Metabolomics: A way forward for crop improvement. *Metabolites*, 9(12), 303. <https://doi.org/10.3390/metabo9120303>
- Resende, R.T., Piepho, H.P., Rosa, G.J., Silva-Junior, O.B., e Silva, F.F., de Resende, M.D.V. and Grattapaglia, D., 2021. Enviromics in breeding: Applications and perspectives on envirotypic-assisted selection. *Theoretical and Applied Genetics*, 134, pp.95–112. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03684-z>
- Romo, S., Labrador, E. and Dopico, B., 2001. Water stress-regulated gene expression in *Cicer arietinum* seedlings and plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 39(11), pp.1017–1026. [https://doi.org/10.1016/s0981-9428\(01\)01318-3](https://doi.org/10.1016/s0981-9428(01)01318-3)
- Roorkiwal, M., Bharadwaj, C., Barmukh, R., Dixit, G.P., Thudi, M., Gaur, P.M., Chaturvedi, S.K., Fikre, A., Hamwieh, A. and Kumar, S., 2020. Integrating genomics for chickpea improvement: Achievements and opportunities. *Theoretical and Applied Genetics*, 133(5), pp.1703–1720. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03584-2>
- Roorkiwal, M., Jain, A., Kale, S.M., Doddamani, D., Chitikineni, A., Thudi, M. and Varshney, R.K., 2018. Development and evaluation of high-density Axiom® Cicer SNP Array for high-resolution genetic mapping and breeding applications in chickpea. *Plant Biotechnology Journal*, 16(4), pp.890–901. <https://doi.org/10.1111/pbi.12836>

- Sachdeva, S., Bharadwaj, C., Patil, B.S., Pal, M., Roorkiwal, M. and Varshney, R.K., 2022. Agronomic performance of chickpea affected by drought stress at different growth stages. *Agronomy*, 12(5), 995. <https://doi.org/10.3390/agronomy12050995>
- Sachdeva, S., Bharadwaj, C., Sharma, V., Patil, B., Soren, K., Roorkiwal, M., Varshney, R. and Bhat, K., 2018. Molecular and phenotypic diversity among chickpea (*Cicer arietinum*) genotypes as a function of drought tolerance. *Crop & Pasture Science*, 69(2), pp.142–153. <https://doi.org/10.1071/cp17284>
- Sahebi, M., Hanafi, M.M., Rafii, M., Mahmud, T., Azizi, P., Osman, M., Abiri, R., Taheri, S., Kalhori, N. and Shabanimofrad, M., 2018. Improvement of drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.): Genetics, genomic tools, and the WRKY gene family. *BioMed Research International*, 2018, Article ID 3158474. <https://doi.org/10.1155/2018/3158474>
- Samantara, K., Reyes, V.P., Agrawal, N., Mohapatra, S.R. and Jena, K.K., 2021. Advances and trends on the utilization of multi-parent advanced generation intercross (MAGIC) for crop improvement. *Euphytica*, 217(10), 189. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02925-6>
- Samineni, S., Kamatam, S., Thudi, M., Varshney, R.K. and Gaur, P.M., 2016. Vernalization response in chickpea is controlled by a major QTL. *Euphytica*, 207, pp.453–461. <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1571-4>
- Samineni, S., Sajja, S.B., Mondal, B., Chand, U., Thudi, M., Varshney, R.K. and Gaur, P.M., 2021. MAGIC lines in chickpea: Development and exploitation of genetic diversity. *Euphytica*, 217(7), pp.1–12. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02874-0>
- Seymen, M., 2021. Comparative analysis of the relationship between morphological, physiological, and biochemical properties in spinach (*Spinacea oleracea* L.) under deficit irrigation conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 45(1), pp.55–67. <https://doi.org/10.3906/tar-2004-79>
- Shan, F., Clarke, H., Yan, G., Plummer, J. and Siddique, K., 2007. Identification of duplicates and fingerprinting of primary and secondary wild annual Cicer gene pools using AFLP markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 54(3), pp.519–527. <https://doi.org/10.1007/s10722-006-0008-2>
- Shao, J., Huang, K., Batoool, M., Idrees, F., Afzal, R., Haroon, M., Noushahi, H.A., Wu, W., Hu, Q., Lu, X., Huang, G., Aamer, M., Hassan, M.U. and El Sabagh, A., 2022. Versatile roles of polyamines in improving abiotic stress tolerance of plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1003155. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1003155>
- Sheoran, I. and Garg, O., 1983. Effect of different types of salinities on gram. *Indian Journal of Plant Physiology*, 26(4), pp.363–369.
- Shinozaki, K. and Yamaguchi-Shinozaki, K., 1996. Molecular responses to drought and cold stress. *Current Opinion in Biotechnology*, 7(2), pp.161–167. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(96\)80007-3](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(96)80007-3)
- Shinozaki, K. and Yamaguchi-Shinozaki, K., 1997. Gene expression and signal transduction in water-stress response. *Plant Physiology*, 115(2), 327. <https://doi.org/10.1104/pp.115.2.327>
- Singh, K. and Ocampo, B., 1997. Exploitation of wild Cicer species for yield improvement in chickpea. *Theoretical and Applied Genetics*, 95(3), pp.418–423. <https://doi.org/10.1007/s001220050578>

- Singh, K., Malhotra, R. and Saxena, M., 1995. Additional sources of tolerance to cold in cultivated and wild Cicer species. *Crop Science*, 35(5), pp.1491–1497. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183x003500050037x>
- Singh, M., Malhotra, N. and Singh, K., 2021. Broadening the genetic base of cultivated chickpea following introgression of wild Cicer species-progress, constraints and prospects. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68(6), pp.2181–2205. <https://doi.org/10.1007/s10722-021-01173-w>
- Sinha, R., Gupta, A. and Senthil-Kumar, M., 2016. Understanding the impact of drought on foliar and xylem invading bacterial pathogen stress in chickpea. *Frontiers in Plant Science*, 7, 902. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00902>
- Sita, K., Sehgal, A., Kumar, J., Kumar, S., Singh, S., Siddique, K.H. and Nayyar, H., 2017. Identification of high-temperature tolerant lentil (*Lens culinaris* Medik.) genotypes through leaf and pollen traits. *Frontiers in Plant Science*, 8, 744. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00744>
- Sivasakthi, K., Thudi, M., Tharanya, M., Kale, S.M., Kholová, J., Halime, M.H., Jaganathan, D., Baddam, R., Thirunalasundari, T. and Gaur, P.M., 2018. Plant vigour QTLs co-map with an earlier reported QTL hotspot for drought tolerance while water saving QTLs map in other regions of the chickpea genome. *BMC Plant Biology*, 18(1), pp.1–18. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1245-1>
- Soln, K. and Koce, J.D., 2022. Oxidative stress in roots: Detection of lipid peroxidation and total antioxidative capacity. *Methods in Molecular Biology*, 2447, pp.221–231. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2079-3_18
- Soltani, A., Galeshi, S., Zeinali, E. and Latifi, N., 2002. Germination, seed reserve utilization and seedling growth of chickpea as affected by salinity and seed size. *Seed Science and Technology*, 30(1), 51–60.
- Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J. and Zeinali, E., 2006. Modeling chickpea growth and development: Phenological development. *Field Crops Research*, 99(1), pp.1–13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.004>
- Soren, K.R., Madugula, P., Kumar, N., Barmukh, R., Sengar, M.S., Bharadwaj, C., Sharma, P.C., Singh, S., Bhandari, A. and Singh, J., 2020. Genetic dissection and identification of candidate genes for salinity tolerance using Axiom® CicerSNP array in chickpea. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(14), 5058. <https://doi.org/10.3390/ijms21145058>
- Thakur, A., Sharma, K.D., Siddique, K.H.M. and Nayyar, H., 2020. Cold priming the chickpea seeds imparts reproductive cold tolerance by reprogramming the turnover of carbohydrates, osmo-protectants and redox components in leaves. *Scientia Horticulturae*, 261, 108929. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108929>
- Thudi, M., Upadhyaya, H.D., Rathore, A., Gaur, P.M., Krishnamurthy, L., Roorkiwal, M., Nayak, S.N., Chaturvedi, S.K., Basu, P.S. and Gangarao, N., 2014. Genetic dissection of drought and heat tolerance in chickpea through genome-wide and candidate gene-based association mapping approaches. *Plos One*, 9(5), e96758. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175609>
- Tiwari, S., Lata, C., Chauhan, P.S. and Nautiyal, C.S., 2016. *Pseudomonas putida* attunes morphophysiological, biochemical and molecular responses in *Cicer arietinum* L. during drought stress and recovery. *Plant Physiology and Biochemistry*, 99, pp.108–117. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.11.001>

- Toker, C., 2014. Mutagenesis for resistance to abiotic stresses: Chickpea as model crop. In N.B. Tomlekova, M.I. Kozgar, & M.R. Wani (Eds.), *Mutagenesis: Exploring novel genes and pathways* (pp.215–238). Wageningen Academic Publishers. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-787-5_11
- Toker, C., Berger, J., Eker, T., Sari, D., Sari, H., Gokturk, R.S., Kahraman, A., Aydin, B. and von Wettberg, E.J., 2021. *Cicer turcicum*: A new *Cicer* species and its potential to improve chickpea. *Frontiers in Plant Science*, 12, 662891. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.662891>
- Toker, C., Canci, H. and Yildirim, T., 2007. Evaluation of perennial wild *Cicer* species for drought resistance. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 54(8), 1781–1786. <https://doi.org/10.1007/s10722-006-9197-y>
- Trenberth, K.E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R. and Sheffield, J., 2014. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), pp.17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Tuberosa, R. and Salvi, S., 2004. Markers, genomics and post-genomics approaches—will they assist in selecting for drought tolerance. Paper presented at the *New Directions for a Diverse Planet* Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane.
- Upadhyaya, H.D., Bajaj, D., Das, S., Saxena, M.S., Badoni, S., Kumar, V., Tripathi, S., Gowda, C., Sharma, S. and Tyagi, A.K., 2015. A genome-scale integrated approach aids in genetic dissection of complex flowering time trait in chickpea. *Plant Molecular Biology*, 89, pp.403–420. <https://doi.org/10.1007/s11103-015-0377-z>
- Upadhyaya, H.D., Dronavalli, N., Gowda, C. and Singh, S., 2011. Identification and evaluation of chickpea germplasm for tolerance to heat stress. *Crop Science*, 51(5), pp.2079–2094. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.01.0018>
- Upadhyaya, H.D., Dwivedi, S.L. and Sharma, S., 2017. Managing and discovering agronomically beneficial traits in chickpea germplasm collections. In *The Chickpea Genome* (Springer), pp.43-52. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66117-9_2
- Vadez, V., Krishnamurthy, L., Thudi, M., Anuradha, C., Colmer, T.D., Turner, N.C., Siddique, K.H., Gaur, P.M. and Varshney, R.K., 2012. Assessment of ICCV 2× JG 62 chickpea progenies shows sensitivity of reproduction to salt stress and reveals QTL for seed yield and yield components. *Molecular Breeding*, 30, pp.9–21. <https://doi.org/10.1007/s11032-011-9594-6>
- Van der Maesen, L.J.G., 1987. Origin, history and taxonomy of chickpea. In M.C. Saxena & K.B. Singh (Eds.), *The Chickpea* (pp.11–34). Wallingford, UK. <https://edepot.wur.nl/304694>
- Varshney, R.K., Gaur, P.M., Chamarthi, S.K., Krishnamurthy, L., Tripathi, S., Kashiwagi, J., Samineni, S., Singh, V.K., Thudi, M. and Jaganathan, D., 2013a. Fast-track introgression of "QTL-hotspot" for root traits and other drought tolerance traits in JG 11, an elite and leading variety of chickpea. *The Plant Genome*, 6(3). <https://doi.org/10.3835/plantgenome2013.07.0022>
- Varshney, R.K., Hiremath, P.J., Lekha, P., Kashiwagi, J., Balaji, J., Deokar, A.A., Vadez, V., Xiao, Y., Srinivasan, R. and Gaur, P.M., 2009a. A comprehensive resource of drought-and salinity-responsive ESTs for gene

- discovery and marker development in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *BMC Genetics*, 10(1), 523. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-523>
- Varshney, R.K., Hiremath, P.J., Lekha, P., Kashiwagi, J., Balaji, J., Deokar, A.A., Vadez, V., Xiao, Y., Srinivasan, R. and Gaur, P.M., 2009b. A comprehensive resource of drought-and salinity-responsive ESTs for gene discovery and marker development in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *BMC Genomics*, 10(1), pp.1–18. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-523>
- Varshney, R.K., Pandey, M.K., Bohra, A., Singh, V.K., Thudi, M. and Saxena, R.K., 2019a. Toward the sequence-based breeding in legumes in the post-genome sequencing era. *Theoretical and Applied Genetics*, 132(3), pp.797–816. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3252-x>
- Varshney, R.K., Song, C., Saxena, R.K., Azam, S., Yu, S., Sharpe, A.G., Cannon, S., Baek, J., Rosen, B.D. and Tar'an, B., 2013b. Draft genome sequence of chickpea (*Cicer arietinum*) provides a resource for trait improvement. *Nature Biotechnology*, 31(3), 240. <https://doi.org/10.1038/nbt.2491>
- Varshney, R.K., Thudi, M., Nayak, S.N., Gaur, P.M., Kashiwagi, J., Krishnamurthy, L., Jaganathan, D., Koppolu, J., Bohra, A. and Tripathi, S., 2014. Genetic dissection of drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 127(2), pp.445–462. <https://doi.org/10.1007/s00122-013-2230-6>
- Varshney, R.K., Thudi, M., Pandey, M.K., Tardieu, F., Ojiewo, C., Vadez, V., Whitbread, A.M., Siddique, K.H., Nguyen, H.T. and Carberry, P.S., 2018. Accelerating genetic gains in legumes for the development of prosperous smallholder agriculture: integrating genomics, phenotyping, systems modelling and agronomy. *Journal of Experimental Botany*, 69(13), pp.3293–3312. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery088>
- Varshney, R.K., Thudi, M., Roorkiwal, M., He, W., Upadhyaya, H.D., Yang, W., Bajaj, P., Cubry, P., Rathore, A. and Jian, J., 2019b. Resequencing of 429 chickpea accessions from 45 countries provides insights into genome diversity, domestication and agronomic traits. *Nature Genetics*, 51(5), pp.857–864. <https://doi.org/10.1038/s41588-019-0401-3>
- Vavilov, N.I., 1926. Centres of origin of cultivated plants (Vol. 16). Bull. Appl. Bot. Genet. Plant Breed.
- Vessal, S., Arefian, M. and Siddique, K.H.M., 2020. Proteomic responses to progressive dehydration stress in leaves of chickpea seedlings. *BMC Genomics*, 21(1), 523. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06930-2>
- Wang, L., Mehmood, U., Agyekum, E.B., Uhunamure, S.E. and Shale, K., 2022. Associating renewable energy, globalization, agriculture, and ecological footprints: Implications for sustainable environment in South Asian countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph191610162>
- Wang, X., Wang, K., Yin, G., Liu, X., Liu, M., Cao, N., Duan, Y., Gao, H., Wang, W. and Ge, W., 2018. Pollen-expressed leucine-rich repeat extensins are essential for pollen germination and growth. *Plant Physiology*, 176(3), pp.1993–2006. <https://doi.org/10.1104/pp.17.01241>
- Waqas, M., Azhar, M.T., Rana, I.A., Arif, A. and Atif, R.M., 2019. Drought stress in chickpea: Physiological, breeding, and omics perspectives. In S.H. Wani (Ed.), *Recent Approaches in Omics for Plant Resilience to*

- Climate Change* (pp.189–227). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-21687-0_9
- Wijerathna-Yapa, A. and Hiti-Bandaralage, J., 2023. Tissue culture—a sustainable approach to explore plant stresses. *Life (Basel)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/life13030780>
- Yadav, H., Yadav, O., Dhankar, O. and Oswal, M., 1989. Effect of chloride salinity and boron on germination, growth and mineral composition of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Annals of Arid Zone*, 28(1 & 2).
- Yadav, S.K., 2010. Cold stress tolerance mechanisms in plants: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), pp.515–527. <https://doi.org/10.1051/agro/2009050>
- Zandalinas, S.I., Mittler, R., Balfagón, D., Arbona, V. and Gómez-Cadenas, A., 2018. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiologia Plantarum*, 162(1), pp.2–12. <https://doi.org/10.1111/ppl.12540>
- Zhao, J., Lu, Z., Wang, L. and Jin, B., 2020. Plant responses to heat stress: Physiology, transcription, noncoding RNAs, and epigenetics. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 117. <https://doi.org/10.3390/ijms22010117>
- Zhu, F., Sun, Y., Jadhav, S.S., Cheng, Y., Alseekh, S. and Fernie, A.R., 2023. The plant metabolic changes and the physiological and signaling functions in the responses to abiotic stress. *Methods in Molecular Biology*, 2642, pp.129–150. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3044-0_7
- Zhu, M., Meng, X., Cai, J., Li, G., Dong, T. and Li, Z., 2018. Basic leucine zipper transcription factor SlbZIP1 mediates salt and drought stress tolerance in tomato. *BMC Plant Biology*, 18, Article 14. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1299-0>
- Zurayk, R., Adlan, M., Baalbaki, R. and Saxena, M., 1998. Interactive effects of salinity and biological nitrogen fixation on chickpea (*Cicer arietinum* L.) growth. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 180(4), pp.249–258. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.1998.tb00531.x>

Evaluation of photosynthetic pigments, yield and yield components of mung bean (*Vigna radiate* L.) in response to humic acid application and irrigation interruption

Amene Haqshenas ^a, Khosro Azizi ^{*b}, Nasser Bakhtiari ^c, Saeed Heydari ^b

^a Ph.D Graduated of Department of Plant Production and Genetic, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

^b Department of Plant Production and Genetic, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

^c M.Sc Student of Department of Environment, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tehran West Branch, Iran

*Corresponding Author: azizi.kh@lu.ir

Received: 6 January 2023

Accepted: 28 February 2022

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.379755.1310

How to cite this article:

Haqshenas, A., Azizi, K., Bakhtiari, N. and Heydari, S., 2025. Evaluation of photosynthetic pigments, yield and yield components of mung bean (*Vigna radiata* L.) in response to humic acid application and irrigation interruption. *Crop Science Research in Arid Regions*, 7(1), 217-233. <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2023.379755.1310>

Abstract

Introduction: The mung bean (*Vigna radiate* L. Wilczek) is one of the most important pulse crops in the world. It is a protein rich staple food and contains about 25 percent protein. Producing higher potential yield in comparison with other crops, is one of the greatest features of the mung bean crop. The use of organic fertilizers, including humic acid, without damaging the environment, may be effective for increasing yield. Humic acid is a natural organic polymer compound that is formed as a result of the decay of soil organic matter, peat, lignin, etc., which may be used to increase the product and its quality. One of the important benefits of humic acid is the chelation of various nutrients such as sodium, potassium, magnesium, zinc, calcium, iron, copper, etc. Water deficit by affecting on vegetative and reproductive growth period and balance between them will change yield and product quality. Humic substances play a vital role in soil fertility and plant nutrition. Plants grown on soils which contain adequate humic acid are less subject to stress, are healthier, produce higher yields; and the nutritional quality of harvested foods and feeds are superior. In this regard, the present study was conducted to investigate the effect of different levels of humic acid on yield and yield components of mung bean under drought stress conditions.

Materials and Methods: This study was conducted as split plot design with randomized complete block design with three replications in a field located in Firouzabad city during. Experimental treatments included water deficit stress as the main factor in three levels: control (normal irrigation), cutting irrigation at flowering stage and cutting irrigation at seed filling stage) and sub factor including use of humic acid at four levels (0, 2, 4, 6 kg / ha). The studied traits were: plant height, number of branches, number of lateral-secondary branches, number of leaves, leaf area index, pod length, number of seeds per pod, number of pods per plant, thousand seed weight, biological yield, seed yield, photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid), proline and seed protein. The



collected data were analyzed using SAS software and means were compared with LSD test at the 5% level of probability.

Results and Discussion: The results showed that the highest amount of chlorophyll a and 1000 seed weight was obtained in the conditions of full irrigation and the application of 4 kg/ha of humic acid, which showed an increase of 39.65 and 35.77% respectively compared to the control treatment. The use of humic acid in the amount of 4 kg per hectare caused a significant increase in the number of sub-branches, sheath length and number of leaves by 34, 18 and 14%, respectively. The application of 6 kg/ha of humic acid in the stress treatment at the flowering stage increased the amount of protein by 26.45% and in the stress treatment at the seed filling stage, the amount of proline increased by 48.85% compared to the control treatment. Also, the application of 4 kg/ha of humic acid in non-stress conditions increased the grain yield by 13.01% compared to the control treatment. Based on the results of the present study, the application of humic acid can reduce the negative effects of water stress and increase mung bean yield.

Conclusion: In general, the results of the present study showed that drought stress in the stages of flowering and seed filling caused a significant decrease in yield and yield components in mung bean plant. Among the levels of drought stress, stress caused more damage to the plant in the flowering stage than in the seed filling stage. The use of humic acid under stress conditions increased the amount of proline and mung bean protein compared to the control treatment (no use of humic acid). Also, the application of all levels of humic acid compared to the control (no use of humic acid) increased chlorophyll a, b and carotenoids, so that the highest amount of the mentioned traits was observed in the condition of full irrigation and the application of humic acid at the rate of 4 kg per hectare. The application of humic acid had a positive effect on the investigated traits and among the consumption levels, the application of 4 kg/ha was more effective. In general, it can be stated that with the use of humic acid, the negative effects caused by drought stress can be reduced to a great extent, which can ultimately improve the growth and increase the yield and yield components of the plant. According to the results of this research, it can be said that in similar conditions of the research site, the application of 4 kg of humic acid per hectare is the most appropriate treatment to deal with drought stress and increase yield in mung bean.

Keywords: Carotenoid, Chlorophyll a, Proline, Protein

ارزیابی رنگدانه‌های فتوسنتزی، عملکرد و اجزای عملکرد ماش (*Vigna radiate* L.) در پاسخ به کاربرد اسید هیومیک و قطع آبیاری

آمنه حق شناس^۱، خسرو عزیزی*^۲، ناصر بختیاری^۳، سعید حیدری^۲

۱- دانش آموخته دکتری گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، ایران

* مسئول مکاتبه: azizi.kh@lu.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.379755.1310

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶

چکیده

به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف اسید هیومیک بر عملکرد ماش در شرایط تنش خشکی، آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه‌ای واقع در استان فارس شهرستان فیروزآباد، در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا گردید. عامل اصلی شامل سه سطح تنش خشکی: آبیاری کامل (بدون قطع آبیاری یا بدون تنش خشکی)، تنش آبیاری (یک نوبت قطع آبیاری) در مرحله گل‌دهی و تنش آبیاری (یک نوبت قطع آبیاری) در مرحله پر شدن دانه و عامل فرعی شامل اسید هیومیک به صورت خاک کاربرد در چهار سطح (صفر، ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در هکتار) بود. نتایج نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل a و وزن هزار دانه در شرایط آبیاری کامل و کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک حاصل شد که به ترتیب نسبت به تیمار شاهد ۳۹/۶۵ و ۳۵/۷۷ درصد افزایش نشان داد. مصرف اسید هیومیک به مقدار ۴ کیلوگرم در هکتار، باعث افزایش معنی‌دار تعداد شاخه فرعی، طول غلاف و تعداد برگ به ترتیب به میزان ۳۴، ۱۸ و ۱۴ درصد گردید. کاربرد ۶ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک در تیمار تنش در مرحله گل‌دهی باعث افزایش ۲۶/۴۵ درصدی میزان پروتئین و در تیمار تنش در مرحله پر شدن دانه باعث افزایش ۴۸/۸۵ درصدی میزان پروتئین نسبت به تیمار شاهد گردید. بر اساس نتایج پژوهش حاضر، کاربرد اسید هیومیک می‌تواند اثرات منفی ناشی از تنش کم‌آبی را کاهش داده و افزایش عملکرد ماش را به همراه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین، پرولین، کارتنوئید، کلروفیل a

مقدمه

(Babaeian et al., 2010). بنابراین، استفاده از انواع کودهای آلی از جمله هیومیک اسید، بدون اثر مخرب زیست‌محیطی ممکن است برای افزایش عملکرد، مؤثر واقع شود. هیومیک اسید ترکیب پلیمری طبیعی آلی است که در نتیجه پوسیدگی مواد آلی خاک، پیت، لیگنین و غیره به وجود می‌آید که ممکن است برای افزایش محصول و کیفیت آن به کار گرفته شود. از مزایای مهم هیومیک اسید، کلات‌کنندگی عناصر غذایی مختلف مانند سدیم، پتاسیم، منیزیم، روی، کلسیم، آهن، مس و غیره برای غلبه بر کمبود عناصر غذایی است که افزایش طول، وزن ریشه و ایجاد ریشه‌های جانبی را سبب می‌شوند (Abedi and Pakniat, 2010).

تولید آنتی‌اکسیدان‌ها در شرایط تنش کمبود آب به واسطه جلوگیری از اتصال آن‌ها با پروتئین‌ها افزایش می‌یابد که محلول‌یابی اسید هیومیک سبب تسریع این روند شده و در نتیجه آسیب‌های ناشی از تنش کم‌آبی کاهش می‌یابد (Nanda

با افزایش روزافزون جمعیت جهان افزایش تقاضا برای منابع پروتئین گیاهی در حال افزایش است. پس از غلات، حبوبات مهم‌ترین منبع غذایی بوده و در این میان ماش، یکی از مهم‌ترین حبوبات می‌باشد که با دارا بودن ۲۵-۲۰ درصد پروتئین، تأمین‌کننده بخش مهمی از پروتئین مورد نیاز انسان است و در این زمینه نقش مهمی را ایفا می‌کند (Firouzabadi and Farahani, 2013). ماش به عنوان یک منبع پروتئین، تقریباً تمام اسیدهای آمینه را داراست، به طوری که اسیدهای آمینه مانند لوسین، آرژنین، ایزولوسین، لیسین و والین به مقدار زیاد و اسیدهای آمینه تریپتوفان، سیستین و متیونین به میزان محدود در پروتئین آن یافت می‌شود (Ganjeali et al., 2008). ایران از اقلیمی خشک و نیمه‌خشک برخوردار است. به طوری که تنش خشکی در آن از مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید محصولات زراعی، باغی و دارویی به‌شمار می‌رود

فارس، شهرستان فیروزآباد با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۱ دقیقه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه ۱۵ دقیقه شرقی از نصف‌النهار گرینویچ با ارتفاع ۱۶۰۰ متری از سطح دریا، در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا گردید. عامل اصلی در سه سطح تنش خشکی شامل: آبیاری کامل (بدون قطع آبیاری یا بدون تنش خشکی)، تنش آبیاری (یک نوبت قطع آبیاری) در مرحله گل‌دهی و تنش آبیاری (یک نوبت قطع آبیاری) در مرحله پر شدن دانه و عامل فرعی شامل اسید هیومیک به صورت خاک کاربرد در چهار سطح (صفر، ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در هکتار) بود. جهت اعمال تیمار اسید هیومیک از پودر هیومکس شامل ۷۵ درصد، ۵ درصد اسید فولیک، پتاسیم ۱۱/۸ درصد، نیتروژن ۰/۲۸ درصد و آهن ۰/۲ درصد استفاده شد.

قبل از انجام آزمایش نمونه‌برداری از خاک مزرعه انجام و مورد آنالیز قرار گرفت. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ آمده است. عملیات خاک‌ورزی شامل شخم، دیسک و تسطیح قبل از کاشت صورت گرفت. در این آزمایش بذر ماش از شرکت حمایتی توزیع بذر مرودشت تهیه شد. بذرها به صورت کپه‌ای در عمق ۳ سانتی‌متر، بر روی پشته‌ها با فاصله ردیف ۵۰ و فاصله بوته ۱۰ سانتی‌متر با دست کشت شدند، عملیات تنک کردن در مرحله ۴-۳ برگی انجام گرفت. ابعاد هر کرت آزمایش ۵×۲ متر، در هر کرت ۵ خط کشت به طول ۵ متر در نظر گرفته شد. عملیات کاشت در ۱ تیرماه انجام شد و آبیاری بر اساس نیاز گیاه به‌روش قطره‌ای صورت گرفت. در طول دوره رشد، علف‌های هرز در کلیه واحدهای آزمایشی به صورت دستی وجین شدند. در طول دوره رشد آفت یا بیماری خاصی مشاهده نشد. به‌منظور اندازه‌گیری صفات مورد نظر دو ردیف کناری و ۵۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به‌عنوان حاشیه حذف شدند. سپس دو متر مربع از هر کرت برای اندازه‌گیری صفات در نظر گرفته شد. پس از کف‌برد نمودن بوته‌ها صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد برگ در بوته، طول غلاف‌ها، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و شاخص سطح برگ و عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن هزار دانه اندازه‌گیری شدند. در پایان رسیدگی فیزیولوژیکی اندازه‌گیری پروتئین بذر به روش برادفورد انجام شد (Bradford, 1976)

کلروفیل و کارتنوئید به روش لیچنتنالر اندازه‌گیری شد. به

(*et al., 2019*). اثر مثبت هیومیک اسید در گیاه تحت شرایط تنش کمبود آب گزارش شده است که به نقش آن در افزایش جذب عناصر غذایی، توانایی فتوسنتز، رشد و افزایش گلوتاتینون پراکسیداز نسبت داده شده است (*Shah et al., 2014*). محلول‌پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر هیومیک اسید در دوره‌های مختلف تنش کم آبیاری باعث بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی و افزایش مؤلفه‌های تولیدی گندم در مقایسه با شاهد (عدم محلول‌پاشی) گردید (*Tourfi and Shokuhfar, 2019*). در گیاه مرزه بیشترین ارتفاع بوته، تعداد برگ، تعداد شاخه فرعی و وزن خشک بوته در شرایط آبیاری در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی با ۴۵۰ میلی‌گرم در لیتر هیومیک اسید به دست آمد؛ درحالی‌که بیشترین میزان طول برگ، کلروفیل a، b و کل، کارتنوئید و کربوهیدرات از تیمار آبیاری در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر هیومیک اسید حاصل شد (*Hosseini et al., 2019*). نتایج حاصل از تحقیقی که بر روی گیاه آفتاب‌گردان انجام شد نشان داد، اسید هیومیک می‌تواند سبب کاهش اثرات سوء تنش خشکی بر آفتابگردان شود هم‌چنین استفاده از اسید هیومیک در هر دو شکل محلول‌پاشی و خاک مصرف با تأثیر معنی‌دار بر ارتفاع بوته، قطر طبق، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، مقادیر کلروفیل a و درصد عناصر فسفر و پتاسیم در دانه، سبب افزایش این صفات شد (*Heidari et al., 2019*).

شناخت اثر تنش خشکی بر رشد ماش جهت کاهش خسارت ناشی از تنش نیازمند مطالعه و تحقیق بیشتری است که انجام مطالعات بیشتر در این خصوص ضروری است. در این راستا، یافتن راهکارهایی که بتواند امکان بهره‌برداری با راندمان بالا از منابع آب را در شهرستان فیروزآباد فراهم نماید، می‌تواند باعث ایجاد تحول قابل ملاحظه‌ای در تولید محصولات کشاورزی در این منطقه گردد. به همین منظور و با توجه به موارد ذکر شده این آزمایش با هدف تعیین حساس‌ترین مرحله رشد ماش به تنش خشکی و تعیین مناسب‌ترین میزان کاربرد اسید هیومیک در این گیاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه‌ای واقع در استان

لوله آزمایش در دار منتقل شد و به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید (۳۰۰۰ دور در دقیقه). از عصاره حاصل ۱ سی‌سی برداشته و در لوله آزمایش ریخته شد سپس ۱ سی‌سی معرف نین هیدرین و ۱ سی‌سی اسید استیک گلاسیال به آن افزوده شد و یک ساعت در بن ماری ۱۰۰ درجه قرار گرفت تا رنگ آجری تولید شد. سپس برای توقف واکنش‌ها در آب یخ قرار داده شد و پس از سرد شدن به هر لوله آزمایش ۴ میلی‌لیتر محلول تولوئن اضافه شد. در هر لوله دو فاز تشکیل شد. فاز بالایی که حاوی کمپلکس رنگی بود، برای اندازه‌گیری مقدار پرولین استفاده شد و میزان جذب نور آن در طول موج ۵۲۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفومتر قرائت گردید (Bunce, 1981). برای اندازه‌گیری درصد پروتئین دانه از دستگاه NIR (دستگاه مادون قرمز) استفاده شد.

در این پژوهش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (Version 9.4)، تجزیه و تحلیل گردید. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

این منظور ۰/۱ گرم برگ تازه در هاون چینی با ازت مایع خرد و با ۱۰ میلی‌لیتر استون خالص، مخلوط گردید و پس از سانتریفیوژ (دور ۴۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه) با استفاده از اسپکتروفوتومتری، جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۲ و ۴۷۰ اندازه‌گیری شد. استون به عنوان محلول شاهد برای تنظیم صفر جذب نوری استفاده گردید. میزان کلروفیل (CA) a، کلروفیل b (CB) و کارتنوئید ((C(X+C)) برحسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ، به ترتیب از طریق روابط ۱، ۲ و ۳ محاسبه شدند (Lichtenthaler, 1987):

$$A = 11/24 \times A662 - 2/04 \times A645C$$

$$C B = 20/13 \times A645 - 4/19 \times A662 \quad (1)$$

$$C = (X+C) = 1000 \times (A470 - 1/90 CA - 63/14 \quad (2)$$

$$CB) / 214 \quad (3)$$

برای اندازه‌گیری غلظت پرولین ۰/۵ گرم از نمونه برگ که در پایان مرحله گل‌دهی جمع‌آوری شده بود، توزین شد و ضمن ساییدن داخل هاون چینی به تدریج ۱۰ سی‌سی اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد به آن افزوده شد. محلول حاصل به

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام پژوهش

Table 1- Soil physical and chemical properties of experimental location

شوری خاک	اسیدیته	کربن آلی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	رس	سیلت	شن	بافت خاک
EC	pH	O.C	N	P	K	Clay	Silt	Sand	Soil texture
(dS.m ⁻¹)		(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(%)	(%)	(%)	
1	6.8	0.2	0.02	14.3	245	19.1	58	22.9	سیلت-لوم Silt loam

نتایج و بحث

اختلال در فتوسنتز به واسطه کم آبی، کاهش تولید مواد فتوسنتزی برای ارائه به بخش‌های در حال رشد گیاه و کاهش انعطاف‌پذیری دیواره سلول‌های ساقه نسبت داد که در نتیجه طولی شدن سلول‌ها متوقف می‌شود (Candan et al., 2018). در پژوهشی که بر روی چمن انجام شد کاربرد اسید هیومیک توانست اثرات تنش خشکی را کاهش داده و روند افزایش ارتفاع گیاه را بهبود بخشد (Bigdelinasab et al., 2020). هم‌راستا با پژوهش حاضر در تحقیقی که بر روی گیاه زیره سبز انجام شد کاربرد ۴ لیتر در هکتار اسید هیومیک نسبت به کاربرد ۶ لیتر در هکتار اسید هیومیک مؤثرتر بود و باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه زیره سبز به میزان ۲۳ درصد نسبت به شاهد گردید (Nasiri Dehsorkhi et al., 2018).

ارتفاع بوته اثر متقابل تیمارهای تنش و اسید هیومیک بر ارتفاع بوته ماش در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). حداکثر ارتفاع بوته از تیمار مصرف ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و در شرایط عدم تنش به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با سایر سطوح مصرف اسید هیومیک داشت. کمترین ارتفاع بوته نیز در شرایط عدم مصرف اسید هیومیک و تنش خشکی در مرحله گل‌دهی به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) ۳۵/۵ درصد کاهش یافت (جدول ۳). اولین اثر کم آبی در گیاهان اندازه کوچکتر و تعداد کمتر برگ‌ها یا ارتفاع گیاه است که ناشی از کاهش توسعه سلولی و رشد می‌باشد (Mohammadi Alborzi et al., 2012). هم‌چنین کاهش ارتفاع گیاه در اثر تنش خشکی را می‌توان به

جدول ۲- تجزیه واریانس تنش خشکی و اسید هیومیک بر خصوصیات مورد مطالعه ماش

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	MS			
		ارتفاع بوته Plant height	شاخه فرعی Sub branch per plant	تعداد برگ Leaf number	شاخص سطح برگ Leaf area index
تکرار Replication	2	543 ^{ns}	6.0 [*]	7.3 ^{ns}	2.4 ^{ns}
تنش Stress	2	1745.0 [*]	56.4 ^{**}	72.9 [*]	10.7 ^{**}
خطا Error	4	166.8	0.4	6.8	0.4
اسید هیومیک Humic acid	3	976.2 ^{**}	11.9 ^{**}	9.4 ^{**}	6.1 ^{**}
تنش×اسید هیومیک Stress× Humic acid	6	91.6 ^{**}	0.2 ^{ns}	0.2 ^{ns}	0.0 ^{ns}
خطا Error	18	22.1	0.5	0.2	0.4
ضریب تغییرات C.V (%)		5.8	8.1	3.7	10.2

ns, * و **: به ترتیب عدم معنی دار و معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and **: no significant and significant at 5% and 1% levels of probability, respectively

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس تنش خشکی و اسید هیومیک بر خصوصیات مورد مطالعه ماش

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	MS				
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئید Carotenoid	پروبلین Proline	پروتئین Protein
تکرار Replication	2	0.1 ^{**}	0.0 ^{**}	0.1 ^{**}	0.3 ^{**}	0.1 ^{ns}
تنش Stress	2	0.4 ^{**}	0.1 ^{**}	0.9 ^{**}	6.2 ^{**}	63.0 ^{**}
خطا Error	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
اسید هیومیک Humic acid	3	0.2 ^{**}	0.5 ^{**}	0.1 ^{**}	1.4 ^{**}	8.7 ^{**}
تنش×اسید هیومیک Stress× Humic acid	6	0.0 ^{**}	0.0 ^{ns}	0.0 ^{**}	0.1 ^{**}	0.4 [*]
خطا Error	18	0.0	0.0	0.0	1.0	9.1
ضریب تغییرات C.V (%)		2.2	7.2	4.1	4.7	1.4

ns, * و **: به ترتیب عدم معنی دار و معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and **: no significant and significant at 5% and 1% levels of probability, respectively

تعداد شاخه فرعی

هورمونی باشد که باعث بهبود جذب مواد غذایی و افزایش بیوماس ریشه و شاخساره می گردد. بیشترین تعداد شاخه فرعی در کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک مشاهده گردید که افزایش ۳۴ درصدی صفت مذکور نسبت به شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) را به همراه داشت (جدول ۵). افزایش

مطابق با نتایج تجزیه واریانس، عامل تنش و اسید هیومیک تعداد شاخه فرعی را در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر قرار داد (جدول ۲). افزایش کاربرد اسید هیومیک سبب افزایش تعداد شاخه فرعی گردید، این امر می تواند به دلیل اثرات

دیگری نیز گزارش شده است. به طور مثال، نتایج پژوهشی نشان داد کم‌آبی سبب کاهش معنادار تعداد شاخه جانبی در بوته ماش گردید، به طوری که در تیمار کم آبی در مرحله زایشی تعداد شاخه جانبی ۲۹/۸ درصد و در تیمار کم آبی در مرحله رویشی ۲۱/۹ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (Aghdasi et al., 2018).

انشعابات جانبی گیاه در اثر مصرف اسید هیومیک در گلرنگ نیز گزارش شده است (Karimi and Tadayyon, 2018). هم‌چنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد تنش در مرحله گل‌دهی و پرشدن دانه باعث کاهش تعداد شاخه فرعی به ترتیب به میزان ۳۷ و ۲۰ درصد نسبت به شاهد (عدم تنش) گردید (جدول ۴). کاهش انشعابات جانبی ماش در اثر تنش خشکی در پژوهش‌های

جدول ۳- اثر متقابل تنش خشکی و سطوح مختلف اسید هیومیک بر خصوصیات مورد مطالعه ماش

Table 3- Interaction effect of drought stress and different levels of humic acid on studied properties of mung bean

تیمارها		ارتفاع بوته	کلروفیل a	کارتنوئید	پروترین	پروتئین
Treatments	اسید هیومیک	Plant height	Chlorophyll a (mg g ⁻¹ FW)	Carotenoid (mg g ⁻¹ FW)	Proline (mg g ⁻¹ FW)	Protein (%)
مرحله تنش	Humic acid	(cm)				
Stress stage	(kg/ha)					
عدم تنش No stress	0	79.6 ^{cd}	0.7 ^e	0.9 ^c	2.2 ^f	20.4 ^h
	2	91 ^b	0.8 ^d	1 ^b	2.4 ^{ef}	21.2 ^g
	4	113.6 ^a	1.1 ^a	1.2 ^a	2.5 ^{de}	21.6 ^{fg}
	6	85 ^{bc}	1 ^b	1.3 ^a	2.6 ^{de}	22.1 ^{ef}
تنش در مرحله گلدهی Stress at flowering stage	0	53 ^f	0.3 ^h	0.5 ^f	2.7 ^d	24.4 ^c
	2	72 ^{de}	0.6 ^f	0.5 ^f	3.2 ^c	25.6 ^b
	4	78.6 ^{cd}	0.7 ^e	0.6 ^e	3.7 ^b	25.9 ^b
	6	69 ^e	0.5 ^g	0.6 ^e	3.8 ^b	27.7 ^a
تنش در مرحله پر شدن دانه Stress at seed filling stage	0	73.6 ^{de}	0.6 ^f	0.6 ^c	3.3 ^c	22.3 ^e
	2	84 ^{bc}	0.8 ^d	0.8 ^d	3.7 ^b	23.4 ^d
	4	89 ^b	0.9 ^c	1 ^{bc}	4.2 ^a	23.7 ^d
	6	79 ^{cd}	0.8 ^d	1 ^{bc}	4.3 ^a	24.4 ^c

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means with similar letters are not significantly different at the 5 % probability level based on LSD test

ادامه جدول ۳- اثر متقابل تنش خشکی و سطوح مختلف اسید هیومیک بر خصوصیات مورد مطالعه ماش

Continued table 3- Interaction effect of drought stress and different levels of humic acid on studied properties of mung bean

تیمارها		تعداد غلاف در بوته	وزن هزاردانه	عملکرد بیولوژیک	عملکرد دانه
Treatments	اسید هیومیک	Pod number per	1000 seed weight	Biological yield	Seed yield
مرحله تنش	Humic acid (kg/ha)	plant	(gr)	(Kg/ha)	(kg/ha)
Stress stage					
عدم تنش No stress	0	29.8 ^d	29.8 ^d	1562.9 ^c	835.6 ^{bc}
	2	43.8 ^b	43.8 ^{ab}	2050.3 ^a	855 ^b
	4	46.4 ^a	46.4 ^a	2363.2 ^a	960.6 ^a
	6	35.1 ^c	35.1 ^c	1634.8 ^{bc}	843.5 ^{bc}
تنش در مرحله گلدهی Stress at flowering stage	0	20.8 ^g	20.8 ^f	1222.4 ^d	596.9 ^h
	2	27.4 ^{de}	27.4 ^{de}	1526.9 ^c	693 ^{fg}
	4	41.1 ^c	41.1 ^b	1628.8 ^{bc}	722.3 ^f
	6	23.2 ^{ef}	23.2 ^{ef}	1500 ^c	670.8 ^g
تنش در مرحله پر شدن دانه Stress at seed filling stage	0	23.8 ^e	23.8 ^{ef}	1523.4 ^c	734.1 ^{ef}
	2	34.2 ^c	34.2 ^c	1652.2 ^{bc}	776 ^{de}
	4	44.5 ^b	44.5 ^{ab}	1874.6 ^b	801.7 ^{cd}
	6	29.1 ^d	29.1 ^d	1676.4 ^{bc}	783.8 ^d

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means with similar letters are not significantly different at the 5 % probability level based on LSD test.

تعداد برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده تنش خشکی بر تعداد برگ در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود این در حالی است که اثر متقابل تنش در اسید هیومیک برای این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۲). نتیجه مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای مورد مطالعه در جدول ۴ نشان داد که تعداد برگ در شرایط عدم تنش (شاهد) بیشینه مقدار (۱۵/۵۳) و در شرایط تنش در مرحله گل‌دهی کمینه مقدار (۱۰/۶۱) را داشت (جدول ۵). اعتقاد بر این است که کاهش مقدار آب در دسترس گیاه با تأثیر بر فشار تورژسانس سلول‌های گیاهی باعث کاهش رشد و گسترش سلول‌های برگ شده، از این‌رو تعداد برگ در این شرایط کاهش می‌یابد (Alishah et al., 2006). نتایج پژوهشی نشان داد تنش کم آبی در مرحله رویشی باعث کاهش ۳۶/۶ درصدی و در مرحله زایشی سبب کاهش ۳۲/۶ درصدی تعداد برگ در بوته ماش سبزی نسبت به تیمار شاهد گردید (Aghdasi et al., 2018). همچنین تنش کم آبی باعث کاهش تعداد برگ در سه گونه نعنای (پونه، سوسن و نعنای فلفلی) گردید (Nezami et al., 2016). در مطالعه‌ای که بر روی اثر تنش کم آبی بر خصوصیات رشدی سه رقم گیاه جعفری انجام شد پژوهشگران بیان کردند، کاهش رطوبت قابل دسترس خاک باعث کاهش تعداد برگ گیاهان شد (Petroopoulos et al., 2008).

تعداد برگ تحت تأثیر کاربرد اسید هیومیک قرار گرفت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). بیشینه تعداد برگ (۱۳/۸۹) در تیمار کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک مشاهده گردید که با سایر تیمارهای کاربرد اسید هیومیک دارای اختلاف معنی‌داری بود و در مقایسه با شاهد، افزایش ۱۴ درصدی را به همراه داشت (جدول ۴). افزایش تعداد برگ در گیاه، احتمالاً به دلیل گسترش سریع سیستم ریشه‌ای گیاه در غلظت‌های بالای اسید هیومیک است که این خود منجر به افزایش جذب بیشتر عناصر غذایی، رشد بهتر گیاه و به دنبال آن افزایش تعداد برگ می‌شود (Fazel Tehrani et al., 2018). تیمارهای ۳ و ۶ لیتر در هکتار اسید هیومیک به ترتیب با افزایش ۱۴ و ۲۲ درصدی تعداد برگ در بوته گلرنگ، اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشتند (Karimi and Tadayyon, 2018).

شاخص سطح برگ

مطابق با نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات اصلی تنش خشکی و کاربرد اسید هیومیک در سطح احتمال یک درصد بر شاخص سطح برگ ماش معنی‌دار گردید؛ این در حالی بود که اثر متقابل عامل‌های مورد بررسی بر صفت مذکور معنی‌دار نشد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای مورد مطالعه بر این صفت در جدول ۴ نشان داد که با اعمال تنش خشکی سطح برگ کاسته شد و بیشینه سطح برگ (۴/۳۲) در تیمار عدم تنش مشاهده گردید. کمینه مقدار سطح برگ در تیمار تنش در زمان گل‌دهی مشاهده گردید که نسبت به تیمار شاهد ۴۳/۷۵ درصد کاهش را نشان داد (جدول ۵). سطح برگ تعیین‌کننده میزان تشعشع جذب شده توسط گیاه و بنابراین تخریب و تولید ماده خشک می‌باشد. از جمله سازگاری‌های گیاه در شرایط کم‌آبیاری، کاهش سطح برگ به‌منظور کاهش تخریب است (Pandey and Agarwal, 1998). از سوی دیگر با افت محتوی نسبی آب برگ زمینه کاهش فتوسنتز در واحد سطح برگ را فراهم می‌نماید (Tas and Tas, 2007). تقسیم سلولی در اثر افزایش میزان اسید آبسیزیک، تأمین نشدن آسیمیلات مورد نیاز برای رشد برگ و در نتیجه کاهش فتوسنتز از مهم‌ترین علل احتمالی کاهش شاخص سطح برگ بر اثر تنش خشکی ذکر شده‌اند (Tesfaye et al., 2006).

همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد کاربرد کلیه سطوح اسید هیومیک باعث افزایش معنی‌دار شاخص سطح برگ گردید. به‌طوری‌که بیشترین شاخص سطح برگ (۴/۳۵)، با کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (عدم مصرف اسید هیومیک) ۴۶/۲۰ درصد افزایش را نشان داد (جدول ۴). در پژوهشی که بر روی گندم انجام شد محققین گزارش دادند کاربرد اسید هیومیک باعث افزایش سطح برگ گردید (Mahmoodi Zoeek et al., 2015).

کلروفیل a, b و کارتنوئید

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که تنش به‌طور معنی‌داری ($P < 0.01$) میزان کلروفیل b را تحت تأثیر قرار داد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بین سطوح تنش، اختلاف معنی‌داری از نظر کلروفیل b وجود دارد، به‌طوری‌که

افزایش دهد و انتقال مواد فتوسنتزی را راحت‌تر کند هم‌چنین باعث کاهش اثرات تنش خشکی گردد (Delfine et al., 2005). پژوهش‌گران گزارش دادند، تنش خشکی موجب کاهش میزان کلروفیل a، b و کارتنوئید گردید از طرفی کاربرد اسید هیومیک، میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید را افزایش داد (Dalvand et al., 2018).

پرویلین

مطابق با نتایج واریانس داده‌ها (جدول ۲) اثرهای اصلی تنش و اسید هیومیک و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال ۱٪ بر میزان پرویلین معنی‌دار گردید. نتایج برهم‌کنش عوامل مورد بررسی نشان داد در شرایط تنش در مرحله پر شدن دانه کاربرد ۶ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک کارآمدتر بود، به‌طوری‌که بیشترین میزان پرویلین (۴/۳۶ میلی‌گرم بر گرم تر برگ) در این تیمار مشاهده گردید و نسبت به تیمار شاهد (عدم مصرف اسید هیومیک) ۴۸/۸۵ درصد افزایش را نشان داد (جدول ۳). تجمع پرویلین یک مکانیسم سازگاری به تنش‌های غیر زیستی از جمله تنش خشکی می‌باشد به‌طوری‌که در شرایط تنش خشکی باعث کاهش از دست‌دهی آب گیاه می‌شود (Maiti et al., 2000)، هم‌چنین تجمع پرویلین به گیاه کمک می‌کند که در دوره کوتاهی بعد از اعمال تنش خشکی زنده بماند و پس از رفع تنش، رشد خود را بازیابی نماید از طرفی پرویلین انباشت شده می‌تواند میزان آسیب وارده به گیاه در شرایط تنش را کاهش دهد (Movahhedy et al., 2004).

یکی از روش‌هایی که می‌توان از طریق آن دوره‌های آبیاری را کاهش داد و باعث بهبود بهره‌وری مصرف آب و کاهش اثر تنش خشکی در گیاهان شد استفاده از ترکیب‌های ارگانیک مانند اسیدهیومیک است. کاربرد اسیدهیومیک می‌تواند باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها، بهبود فعالیت فتوسیستم II و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی گردد (Lotfi et al., 2015).

درصد پروتئین

مطابق با نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، تأثیر برهم‌کنش تنش و اسید هیومیک بر درصد پروتئین معنی‌دار گردید ($P < 0.05$). نتایج مقایسه میانگین تیمارها نشان داد،

تیمار عدم تنش بالاترین میزان کلروفیل b را به خود اختصاص داد (جدول ۵). هم‌چنین نتایج این پژوهش بیانگر تأثیر معنی‌دار (سطح احتمال ۱٪) کاربرد اسید هیومیک بر میزان کلروفیل b بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که کاربرد کلیه سطوح اسید هیومیک در مقایسه با شاهد (عدم مصرف اسید هیومیک) باعث افزایش کلروفیل b گردید به‌طوری‌که بیشترین و کمترین میزان کلروفیل b به ترتیب در تیمارهای کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و شاهد مشاهده شد. کاربرد اسید هیومیک به میزان ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش معنی‌دار کلروفیل b به ترتیب به میزان ۲۲/۴۰، ۳۲/۹۲ و ۲۷/۷۰ درصد نسبت به شاهد گردید (جدول ۴).

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۲) اثر سطوح تنش و اسید هیومیک و برهم‌کنش آن‌ها (در سطح احتمال ۱٪) بر کلروفیل a و کارتنوئید معنی‌دار بود. نتایج برهم‌کنش عوامل مورد بررسی نشان داد که کاربرد اسید هیومیک تأثیر مثبت و معنی‌داری بر کلروفیل a داشت. به‌طوری‌که بالاترین میزان کلروفیل a در شرایط آبیاری کامل و کاربرد اسید هیومیک به میزان ۴ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با کلیه تیمارها نشان داد و در مقایسه با شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) باعث افزایش ۳۹/۶۵ درصدی صفت مذکور گردید (جدول ۳). هم‌چنین نتایج برهم‌کنش تنش و اسید هیومیک بر میزان کارتنوئید بیانگر آن بود که در شرایط تنش کاربرد ۶ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک کارآمدتر است، اما با تیمار کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک اختلاف معنی‌داری نداشت. کاربرد ۶ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک در شرایط آبیاری کامل باعث افزایش کارتنوئید به میزان ۲۹ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) گردید (جدول ۳). کاهش میزان کلروفیل در اثر تنش خشکی به علت افزایش تولید رادیکال‌های اکسیژن می‌باشد که این رادیکال‌های آزاد سبب پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه رنگیزها می‌شوند (Sanjari et al., 2015). از طرفی تأثیر مثبت اسید هیومیک بر متابولیسم سلول‌های گیاهی و افزایش مقدار رنگیزه‌های کلروفیل تایید شده است. اسید هیومیک با قرار دادن آب و مواد غذایی بیشتر و مناسب‌تر در اختیار گیاه می‌تواند ساخت کلروفیل‌های a، b و کارتنوئید را

(Habibi and Bihamta, 2007) و ۱۶/۲ درصدی (Ebrahimi *et al.*, 2010) طول غلاف لوبیا در شرایط تنش خشکی نسبت به شرایط بدون تنش نیز گزارش شده است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴)، تأثیر اسید هیومیک بر طول غلاف در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. کاربرد اسید هیومیک، باعث افزایش معنی دار طول غلاف در بوته نسبت به شاهد (عدم مصرف اسید هیومیک) گردید. در بین سطوح مصرف اسید هیومیک، بیشترین طول غلاف در بوته مربوط به کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار بود، که افزایش ۱۸ درصدی طول غلاف در بوته نسبت به شاهد را نشان داد (جدول ۵). در همین راستا، پژوهشگران با محلول پاشی اسید هیومیک در گیاه ماش، افزایش معنی دار ($P \leq 0.05$) طول غلاف را گزارش کردند. همچنین آن‌ها به عدم معنی داری اثرات متقابل تنش خشکی × اسید هیومیک پی بردند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Bandani *et al.*, 2014). در تحقیقی که بر روی لوبیای لیما انجام شد پژوهشگران گزارش دادند تنش خشکی به طور معنی داری باعث کاهش طول غلاف گردید از طرفی کاربرد اسید هیومیک با تأثیر مثبت بر طول غلاف باعث افزایش طول غلاف شد (Beheshti *et al.*, 2017).

تعداد دانه در غلاف

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴)، تنش خشکی و کاربرد اسید هیومیک تأثیر معنی داری بر تعداد دانه در غلاف داشت ($P < 0.01$). اما در مورد برهم کنش عامل‌های مورد بررسی اختلاف معنی دار آماری از نظر صفت مذکور مشاهده نشد. با توجه به نتایج مقایسه میانگین برای زمان‌های مختلف تنش، بیشترین تعداد دانه در غلاف، به تیمار شاهد (عدم تنش) تعلق داشت و پس از آن به ترتیب تنش در مرحله پر شدن دانه و تنش مرحله گل‌دهی قرار داشتند (جدول ۵). سایر پژوهشگران گزارش دادند در گیاه ماش برای تشکیل تعداد مناسب دانه در هر غلاف شروع گل‌دهی نسبت به شروع تشکیل غلاف و پر شدن دانه حساس‌ترین مرحله رشدی به تنش کمبود آب می‌باشد (Pirzad *et al.*, 2015).

در خصوص سطوح مختلف اسید هیومیک، نتایج مقایسه میانگین نشان داد بیشترین تعداد دانه در غلاف، از تیمار کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک به دست آمد و کمترین آن

تنش در مرحله گل‌دهی با کاربرد ۶ کیلوگرم در هکتار بالاترین میزان پروتئین را به خود اختصاص داد و باعث افزایش ۲۶/۴۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) گردید (جدول ۳).

بالاتر بودن درصد پروتئین در شرایط کم آبیاری نسبت به شرایط آبیاری می‌تواند مرتبط با کاهش طول دوره رشد و نمو در تیمارهای تنش دیده باشد که موجب کاهش نسبت کربوهیدرات به پروتئین و در نتیجه افزایش درصد پروتئین در این تیمارها می‌شود (Jalilian *et al.*, 2005). نیتروژن، فسفر و گوگرد جزء عناصر پر مصرف برای رشد گیاه هستند و از مهم‌ترین نقش این عناصر شرکت در ساختمان پروتئین و در نتیجه ساختمان گیاه می‌باشد. اسید هیومیک و ترکیبات آن هم از طریق افزایش قابلیت ریشه‌ها در جذب این عناصر و هم از طریق مداخله در فعالیت‌های آنزیمی مرتبط با فراهمی آن‌ها برای گیاه، سبب افزایش توان سنتز پروتئین در گیاه و انتقال آن به دانه‌ها می‌گردند (Saruhan *et al.*, 2011). در پژوهش انجام شده بر روی گندم محققین عنوان نمودند کاربرد اسید هیومیک (به نسبت ۱ کیلوگرم به ۳۰۰ کیلوگرم بذر) باعث افزایش پروتئین دانه نسبت به تیمار شاهد گردید (Mohebbi *et al.*, 2022). در آزمایشی، اثر محلول پاشی اسید هیومیک و نیتروژن بر گندم مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج نشان داده است که کاربرد اسید هیومیک و نیتروژن سبب افزایش معنی دار محتوی پروتئین دانه شده است (Delfine *et al.*, 2005).

طول غلاف

نتایج نشان داد تنش به طور معنی داری طول غلاف را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۴). بر اساس نتایج مقایسه میانگین بیشترین و کمترین طول غلاف با مقادیر ۱۰/۵ و ۸/۲ سانتی‌متر به ترتیب از تیمار عدم تنش (شاهد) و تنش در مرحله گل‌دهی ماش به دست آمد (جدول ۴). با توجه به ریزش گل‌ها طی وقوع تنش خشکی و کاهش تعداد غلاف با افزایش شدت تنش خشکی، شاخص‌های فیزیولوژیکی کاهش یافته و در نتیجه تقسیم مواد فتوسنتزی بین غلاف‌های کمتری صورت می‌گیرد. این مسئله روند نزولی کاهش طول غلاف را به دنبال دارد (Beheshti *et al.*, 2017). کاهش معنی دار ۹/۵ درصدی

جدول ۴- تجزیه واریانس تنش خشکی و اسید هیومیک بر عملکرد و اجزای عملکرد ماش

Table 4- Variance analysis of drought stress and humic acid on mung bean yield and yield components

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	MS					
		طول غلاف Pod length	تعداد دانه در غلاف Seed number per pod	تعداد غلاف در بوته Pod number per plant	وزن هزار دانه 1000-seed weight	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield
تکرار Replication	2	3.6 ^{ns}	0.02 ^{ns}	16.69 ^{ns}	1.4 ^{ns}	92621.2 ^{ns}	54937.8*
تنش Stress	2	19.3*	37.0**	551.4**	342.2**	704167.3*	123577.3**
خطا Error	4	1.1	0.3	6.5	8.0	87994.3	4918.6
اسید هیومیک Humic acid	3	7.0**	4.5**	508.5**	622.0**	468566.5**	17034.0**
تنش×اسید هیومیک Stress× Humic acid	6	0.4 ^{ns}	1.3 ^{ns}	11.7*	17.6*	97674.6*	2146.1*
خطا Error	18	0.4	0.7	3.9	6.0	25861.8	777.0
ضریب تغییرات C.V (%)		6.9	9.0	5.1	7.3	9.4	3.6

ns, * و **: به ترتیب عدم معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and **: no significant and significant at 5% and 1% levels of probability, respectively

جدول ۵- اثر ساده تنش خشکی و سطوح مختلف اسید هیومیک بر خصوصیات مورد مطالعه ماش

Table 5- The simple effect of drought stress and different levels of humic acid on the studied characteristics of mung bean

تیمارها Treatments	تعداد شاخه فرعی Number of lateral branch		شاخص سطح برگ Leaf area index		کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW)	طول غلاف Pod length (cm)	تعداد دانه در غلاف Number of seed per pod
	تعداد برگ Leaf number	تعداد شاخه فرعی Number of lateral branch	تعداد برگ Leaf number	شاخص سطح برگ Leaf area index			
مرحله تنش Stress stage							
عدم تنش No stress	11.6 ^a	15.5 ^a	4.3 ^a	0.6 ^a	10.5 ^a	11.2 ^a	
تنش در مرحله گلدهی Stress at flowering stage	7.3 ^c	10.6 ^c	2.4 ^c	0.3 ^c	8.2 ^b	7.8 ^c	
تنش در مرحله پر شدن دانه Stress at seed filling stage	9.3 ^b	12.8 ^b	3.3 ^b	0.4 ^b	10.3 ^a	8.8 ^b	
سطوح اسید هیومیک Humic acid (kg/ha)							
0	8.2 ^c	11.5 ^c	2.3 ^c	0.3 ^d	8.4 ^c	8.7 ^b	
2	9.3 ^b	13.1 ^b	3.5 ^b	0.4 ^c	9.6 ^b	9.2 ^b	
4	11 ^a	13.8 ^a	4.3 ^a	0.5 ^a	10.4 ^a	10.3 ^a	
6	9.2 ^b	13.4 ^b	3.3 ^b	0.5 ^b	10.2 ^{ab}	8.8 ^b	

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means with similar letters are not significantly different at the 5 % probability level based on LSD test.

به‌نظر می‌رسد افزایش تعداد دانه در غلاف با مصرف اسید هیومیک به‌دلیل جلوگیری از ریزش یا عقیم شدن غلاف‌ها باشد. پژوهش‌گران عنوان نمودند، دلیل افزایش تعداد دانه در بوته

نیز از عدم کاربرد اسید هیومیک حاصل گردید (جدول ۴). مصرف ۶ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک باعث افزایش تعداد دانه در غلاف به‌میزان ۱۵/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید.

تنش به همراه کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک حاصل شد که وزن هزار دانه را نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) ۳۵/۷۷ درصد افزایش داد (جدول ۳). به نظر می‌رسد اسید هیومیک با افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو سبب افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه شده (Delfine et al., 2005) و احتمالاً با بهبود تولید قند، پروتئین و ویتامین در گیاه و تأثیر مثبتی که بر جنبه‌های مختلف فتوسنتز گذاشته، محتوای غذایی (ترکیبات ذخیره‌ای بذر) محصولات کشاورزی را افزایش دهد (Cavani et al., 2003). افزایش ۲۷/۱ درصدی وزن هزار دانه با کاربرد ۱۴/۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک در گیاه ذرت گزارش شده است (Gomaa et al., 2014). در بررسی اثر کاربرد اسید هیومیک بر اجزای عملکرد کلزا، افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه را با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم هیومیک اسید گزارش کردند (Rahimi et al., 2016). در پژوهشی که بر روی ذرت انجام شد محققین گزارش دادند تنش کم آبی باعث کاهش و کاربرد اسید هیومیک به میزان ۵ لیتر در هکتار باعث افزایش وزن هزار دانه گردید (Moosavi and Ragh ara, 2018)

عملکرد بیولوژیک

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۴)، اثر سطوح مختلف اسید هیومیک (در سطح احتمال ۱٪) و زمان‌های مختلف تنش (در سطح احتمال ۵٪) و برهم‌کنش آن‌ها (در سطح احتمال ۵٪) بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود. نتایج برهم‌کنش عوامل مورد بررسی نشان داد در بین سطوح اسید هیومیک کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار کارآمدتر بود. به طوری که در کلیه سطوح اسید هیومیک، کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) نشان داد. کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک در شرایط بدون قطع آبیاری، تنش در مرحله گل‌دهی و تنش در مرحله پر شدن دانه باعث افزایش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک به ترتیب به میزان ۳۳/۸۶، ۳/۹۲ و ۱۶/۶۲ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) گردید. کمترین میزان عملکرد بیولوژیک (۱۲۲۲/۴ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار تنش در زمان گل‌دهی با عدم مصرف اسید هیومیک بود (جدول ۳). دلیل کاهش عملکرد بیولوژیک در شرایط کم آبیاری را می‌توان به رشد رویشی کمتر و به دنبال آن سطح محدودتر و

نخود با مصرف مقدار بالای اسید هیومیک در زمان رویشی + گل‌دهی به دلیل جلوگیری از ریزش یا عقیم شدن غلاف‌ها در شرایط دیم می‌باشد (Shabani and Armin, 2015).

تعداد غلاف در بوته

مطابق با نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴)، اثرهای اصلی تنش و اسید هیومیک در سطح احتمال ۱٪ و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال ۵٪ بر تعداد غلاف در بوته معنی‌دار گردید. نتایج برهم‌کنش عوامل مورد بررسی نشان داد که بیشترین تعداد غلاف در بوته (۴۶/۴) در شرایط عدم تنش و کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک بدست آمد که افزایش ۳۵/۷۷ درصدی نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) داشت. کمترین تعداد غلاف در بوته (۲۰/۸) در تیمار تنش در مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد اسید هیومیک مشاهده شد (جدول ۳). در مرحله گل‌دهی تنش باعث ریزش گل‌ها می‌شود که به تبع آن به کاهش تعداد غلاف نیز منجر می‌گردد. با توجه به این موضوع که در ابتدای مرحله زایشی رقابت زیادی بین مخازن در حال شکل‌گیری (گل‌ها و غلاف‌های در حال رشد) برای آسمیلات در دسترس وجود دارد، به نظر می‌رسد که کمبود آب در مرحله گل‌دهی منجر به بروز عواملی مانند: کاهش شدت فتوسنتز، کاهش میزان آبسزیک اسید و کاهش میزان بارگیری مواد پرورده شده و در نهایت موجب ریزش گل‌ها و غلاف‌ها شده است (Moradi et al., 2008). افزایش تعداد غلاف با مصرف اسید هیومیک ممکن است به دلیل افزایش جذب عناصر غذایی و در نتیجه کاهش ریزش طبیعی گل‌ها و غلاف‌ها باشد. با محلول‌پاشی اسید هیومیک و افزایش جذب عناصر غذایی، رشد گیاه بیشتر شده و گیاه دارای کانوپی بزرگ‌تری می‌شود که قادر است مخازن زایشی بزرگ‌تری را تغذیه نماید و به میزان کافی ماده خشک و غلاف در بوته تولید کند (Jalota et al., 2007).

وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که علاوه بر اثر ساده تنش و اسید هیومیک (سطح احتمال ۱٪)، تأثیر برهم‌کنش تنش و اسید هیومیک نیز بر وزن هزار دانه در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار گردید (جدول ۴). نتایج برهم‌کنش عوامل مورد بررسی نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه (۴۶/۴ گرم) در تیمار عدم

محیطی و تغذیه‌ای مناسب باشد رشد جانبی گیاه بیشتر شده و احتمال افزایش تعداد غلاف در بوته و وزن خشک غلاف بیشتر است و در نهایت باعث افزایش عملکرد دانه می‌شود (Farbod and Mambini, 2015).

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد اعمال تنش خشکی در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه باعث کاهش معنی‌دار عملکرد و اجزای عملکرد در گیاه ماش گردید. در بین سطوح تنش خشکی، تنش خشکی در مرحله گل‌دهی خسارت بیشتری را نسبت به مرحله پر شدن دانه بر گیاه وارد کرد. کاربرد اسید هیومیک در شرایط تنش باعث افزایش میزان پروتئین و پروتئین ماش نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد اسید هیومیک) گردید. همچنین کاربرد کلیه سطوح اسید هیومیک در مقایسه با شاهد (عدم مصرف اسید هیومیک) باعث افزایش کلروفیل a, b و کارتنوئید گردید به‌طوری‌که بالاترین میزان صفات مذکور در شرایط آبیاری کامل و کاربرد اسید هیومیک به میزان ۴ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. کاربرد اسید هیومیک تأثیر مثبتی بر صفات مورد بررسی داشت و در بین سطوح مصرفی، کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار مؤثرتر واقع گردید. در مجموع می‌توان اظهار داشت با کاربرد اسید هیومیک تا حدی زیادی می‌توان اثرات منفی ناشی از تنش خشکی را تقلیل داد که در نهایت، این امر می‌تواند بهبود رشد و افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گیاه را به‌همراه داشته باشد. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان بیان کرد در شرایط مشابه محل پژوهش، کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک مناسب‌ترین تیمار برای مقابله با تنش خشکی و افزایش عملکرد در ماش می‌باشد.

تولید ماده خشک کمتر در گیاه در این شرایط نسبت داد (Moosavi, 2017). افزایش عملکرد بیولوژیک با مصرف اسید هیومیک را می‌توان به تحریک رشد گیاه از طریق سوخت و ساز عناصر کم‌مصرف و پر مصرف، فعال‌سازی آنزیم‌ها و تغییر در نفوذپذیری غشاء و سنتز پروتئین‌ها نسبت داد که مجموع این عوامل سبب افزایش بیوماس گیاه می‌گردد (Ulukan, 2008). محققین مشاهده کردند که تنش آبی جذب نیتروژن و بیوماس را در ارقام نخود تونسی کاهش می‌دهد (Labidi et al., 2009).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) گویای این مطلب است که زمان‌های مختلف تنش و اسید هیومیک در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۵ درصد بر عملکرد دانه تأثیر معنی‌داری داشت. نتایج مقایسه میانگین نشان داد تیمار عدم تنش با مصرف ۴ کیلوگرم در هکتار بیشترین مقدار (۹۶۰/۶ کیلوگرم در هکتار) و تیمار تنش در مرحله گل‌دهی با عدم مصرف اسید هیومیک کمترین مقدار (۵۹۶/۹ کیلوگرم در هکتار) عملکرد دانه را به‌خود اختصاص دادند (جدول ۳). کاربرد ۴ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک در شرایط عدم تنش، تنش در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه باعث افزایش عملکرد دانه به‌ترتیب به‌میزان ۱۴، ۲۱ و ۹ درصد نسبت به شاهد (عدم مصرف اسید هیومیک) گردید. در گیاه نخود (Haghparast et al., 2012) و لوبیای لیما (Beheshti et al., 2017) نیز نتایج مشابهی مبنی بر افزایش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی با کاربرد اسید هیومیک مشاهده شد. محققین بیان نمودند عملکرد دانه با صفت تعداد غلاف در بوته همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری دارد. به نظر می‌رسد که هر چه شرایط

References

- Abedi, T. and Pakniat, H., 2010. Changes in antioxidant enzymes in response to the drought in ten varieties of Canola. *Journal of Genetics and Plant Breeding*, 46(1), pp.27–34. [In Persian]. <https://doi.org/10.17221/67/2009-cjgpb>
- Aghdasi, S., Modares Sanavy, S.A.M., Aghaalikhani, M. and Keshavarz, H., 2018. Effect of foliar application of iron and manganese on yield and yield components of mungbean under water deficit stress. *Water and Soil Science*, 28, pp.13–25. [In Persian].

- Alishah, H.M., Heidari, R., Hassani, A. and Dizaji, A., 2006. Effect of water stress on some morphological and biochemical characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum*). *Journal of Biological Sciences*, 6, pp.763–767. <https://doi.org/10.3923/jbs.2006.763.767>
- Babaeian, M., Heidari, M. and Ghanbari, A., 2010. Effect of water stress and foliar micronutrient application on physiological parameters and nutrient uptake in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Iranian Journal of Crop Science*, 12(4), pp.377–391. [In Persian].
- Bandani, M., Mobasser, H.R. and Sirusmehr, A., 2014. Effect of organic fertilizer on length of pod, biological yield and number of seeds per pod in mung bean (*Vigna radiata* L.). *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 8, pp.763–766.
- Beheshti, S., Tadayyon, A. and Fallah, S., 2017. Effect of humic acid on the yield and yield components of Lima bean (*Phaseolus lunatus* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal Pulses Research*, 7, pp.175–187. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/ijpr.v7i2.46533>
- Bigdelinasab, H., Solgi, M. and Taghizadeh, M., 2020. The application of humic acid and nanocomposite superabsorbent on growth characteristic and resistance to drought stress in turfgrass. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 51, pp.387–402. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijhs.2019.276698.1608>
- Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, pp.248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Bunce, J.A., 1981. Comparative responses of leaf conductance to humidity in single attached leaves. *Journal of Experimental Botany*, 32, pp.629–634. <https://doi.org/10.1093/jxb/32.3.629>
- Candan, N., Cakmak, I. and Ozturk, L., 2018. Zinc-biofortified seeds improved seedling growth under zinc deficiency and drought stress in durum wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181, pp.388–395. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800014>
- Cavani, A., Nasorri, F., Ottaviani, C., Sebastiani, S., De Pità, O. and Girolomoni, G., 2003. Human CD25+ regulatory T cells maintain immune tolerance to nickel in healthy, nonallergic individuals. *The Journal of Immunology*, 171, pp.5760–5768. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.171.11.5760>
- Dalvand, M., Solgi, M. and Khaleghi, A., 2018. Effects of foliar application of humic acid and drought stress on growth and physiological characteristics of marigold (*Tagetes erecta*). *Journal of Soil and Plant Interactions*, 9, pp.67–80. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/ejgcst.9.2.67>
- Delfine, S., Tognetti, R., Desiderio, E. and Alvino, A., 2005. Effect of foliar application of N and humic acids on growth and yield of durum wheat. *Agronomy for Sustainable Development*, 25, pp.183–191. <https://doi.org/10.1051/agro:2005017>
- Ebrahimi, M., Behamta, M., Hoseinzadeh, A., Khialparast, F. and Gholbashi, M., 2010. Evaluation of yield, yield components and some agronomic traits of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes under climatic conditions of Karaj. *Journal of Agroecology*, 2, pp.134–150. [In Persian].

- Farbod, N. and Mambini, M., 2015. Effect of row spacing and water stress on correlation between yield, yield components and some morphophysiological traits of mung bean (*Vigna radiata* L.). *Journal of Plant Production Sciences*, 4, pp.1–3. [In Persian].
- Fazel Tehrani, H., Ilkaei, M. and Mostafavi, K., 2018. Leaf characteristics of Basilicum (*Ocimum basilicum* L.) affected by different levels of humic acid and tea compost. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 13, pp.65–73. [In Persian].
- Firouzabadi, B.S. and Farahani, I., 2013. Effect of planting date on seed yield and its components of mung bean (*Vigna radiata* L.) genotypes in Varamin region in Iran. *Seed and Plant Production Journal*, 29(3), pp.387–401.
- Ganjeali, A., Parsa, M. and Sabaghpour, S., 2008. *Farming and agrosystems of pulses in Pulses*. Jihade-Daneshgahi Mashhad Press. [In Persian].
- Gomaa, M.A., Radwan, F.I., Khalil, G.A.M., Kandil, E.E. and El-Saber, M.M., 2014. Impact of humic acid application on productivity of some maize hybrids under water stress conditions. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 4, pp.668–673.
- Habibi, G. and Bihamta, M.R., 2007. Study of seed yield and some traits associated with pinto bean under reduced irrigation. *Journal of Research and Conservation in Agriculture and Horticulture*, 74, pp.34–46. [In Persian].
- Haghparsat, M., Maleki Farahani, S., Sinki, J.M. and Zarei, G.H., 2012. Reduction of negative effects of drought stress on chickpea using humic acid and seaweed extract. *Crop Production in Environmental Stress*, 4(1), pp.59–71. [In Persian].
- Heidari, M., Paydar, A., Baradarn Firozabad, M. and Abedinin Esfalati, M., 2019. The effect of drought stress and application of humic on quantitative yield, photosynthetic pigments, and mineral nutrients content in sunflower seeds. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 50(4), pp.51–62. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2018.253008.654448>
- Hosseini, S.H., Ebrahimpak, N., Yusefi, A. and Egdarnzhad, A., 2019. Effect of water stress and humic acid foliar application on morpho-physiological characteristics of *Satureja hortensis*. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26, pp.219–232. [In Persian]. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15481.3071>
- Jalilian, J., Modarres, S.A.M. and Sabaghpour, S.H., 2005. The effect of density and supplemental irrigation on yield, yield components and protein content of four chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under dry land condition. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resource*, 12, pp.1–9. [In Persian].
- Jalota, S., Sood, A., Vitale, J. and Srinivasan, R., 2007. Simulated crop yields response to irrigation water and economic analysis. *Agronomy Journal*, 99, pp.1073–1084. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0054>
- Karimi, E. and Tadayyon, A., 2018. Effect of humic acid spraying on yield and some morphological characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions. *Field Crops Research*, 31(1), pp.19–38. [In Persian].

- Labidi, N., Mahmoudi, H., Dorsaf, M., Slama, I. and Abdelly, C., 2009. Assessment of intervarietal differences in drought tolerance in chickpea using both nodule and plant traits as indicators. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 1, pp.80–86. <https://doi.org/10.5897/jpbcs2023.1021>
- Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, pp.350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Lotfi, R., Gharavi-Kouchebagh, P. and Khoshvaghti, H., 2015. Biochemical and physiological responses of *Brassica napus* plants to humic acid under water stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 62, pp.480–486. <https://doi.org/10.1134/s1021443715040123>
- Mahmoodi Zoek, R., Nasri, M. and Oveysi, M., 2015. Effects of humic acid spraying on yield and nutrient transition to wheat grain in drought stress condition. *Agronomic Research in Semi Desert Regions*, 12(2), pp.119–131.
- Maiti, R., Moreno-Limon, S. and Wesche-Ebeling, P., 2000. Responses of some crops to various abiotic stress factors and its physiological and biochemical basis of resistances: a review. *Agricultural Reviews*, 21, pp.155–167.
- Mohammadi Alborzi, M., Safikhani, F., Masoud Sinaki, J. and Abbaszadeh, B., 2012. The effect of drought on morphological characteristics of anisum (*Pimpinella anisum* L.). *Journal of Plant Ecophysiology*, 4, pp.14–25. [In Persian].
- Mohebbi, M., Ghobadi, M.E. and Chaghazardi, H.R., 2022. The effect of seed treatment with salicylic acid, humic acid and zinc on the yield of durum wheat under rainfed conditions. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 1, pp.318–334. [In Persian]. <https://doi.org/10.22126/cbb.2022.8349.1020>
- Moosavi, G.R., 2017. Effect of irradiation interval, humic acid and sulfur fertilizer on morphological and yield traits of fenugreek (*Trigonella foenum-gracum* L.). *Journal of Plant Ecophysiology*, 9, pp.40–51. [In Persian].
- Moosavi, S. and Ragh ara, H., 2018. Effect of water deficit stress and application of humic and salicylic acid on physiological traits, yield and yield components of corn. *Plant Environmental Physiology*, 13, pp.88–101. [In Persian].
- Moradi, A., Ahmadi, A.S. and Hosseinzadeh, A., 2008. Physiological agronomic reactions of mung bean (variety) to severe and mild drought stress in vegetative and reproductive stages. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, pp.659–671. [In Persian].
- Movahhedy, D.M., Modares, S.S., Soroushzadeh, A. and Jalali, M., 2004. Changes in proline, total soluble sugars, SPAD and chlorophyll fluorescence in winter safflower cultivars under drought stress and foliar application of zinc and manganese. *Desert*, 9, pp.93–110.
- Nanda, S., Sarangi, P.K. and Vo, D.V.N., 2019. *Fuel Processing and Energy Utilization*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429489594>
- Nasiri Dehsorkhi, A., Makarian, H., Varnaseri Ghandali, V. and Salari, N., 2018. Investigate effect of humic acid and vermicompost application on yield and yield components of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Applied Field Crops Research*, 31(1), pp.93–113. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/aj.2018.121407.1277>

- Nezami, S., Nemati, S.H., Aruee, H. and Bagheri, A., 2016. Study on effect of water deficit stress on growth of three *Mentha* species. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9, pp.59–74. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2016.300>
- Pandey, R. and Agarwal, R., 1998. Water stress-induced changes in proline contents and nitrate reductase activity in rice under light and dark conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 4, pp.53–57.
- Petropoulos, S.A., Daferera, D., Polissiou, M. and Passam, H.C., 2008. The effect of water deficit stress on the growth, yield and composition of essential oils of parsley. *Scientia Horticulturae*, 115(4), pp.393–397. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.10.008>
- Pirzad, A.R., Jalilian, J. and Akbari Bavandi, V., 2015. Improving grain yield of mung bean (*Vigna radiata* L.) using zeolite under water deficit conditions. *Research in Field Crops*, 3, pp.1–13. [In Persian].
- Rahimi, Z., Mozaffari, H. and Hassanpour Darvishi, H., 2016. Investigation the effect of humic acid in irrigation water on yield and yield components of rapeseed. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 12, pp.95–106. [In Persian].
- Sanjari, M., Siroomsmehr, A. and Fakheri, B., 2015. The effects of drought stress and humic acid on some physiological characteristics of roselle. *Journal of Crops Improvement*, 17, pp.403–441. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jci.2015.55189>
- Saruhan, V., Kuvuran, A. and Babat, S., 2011. The effect of different humic acid fertilization on yield and yield components performances of common millet (*Panicum miliaceum* L.). *Scientific Research and Essays*, 6, pp.663–669. <https://doi.org/10.5897/sre10.1153>
- Shabani, R. and Armin, M., 2015. Effects of time and integrated applications of biological and chemical fertilizers on yield and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in dry land condition. *Journal of Applied Vegetation Ecophysiology*, 1, pp.31–43. [In Persian].
- Shah, B., Sulaimana, S., Jamal, P. and Alam, M.Z., 2014. Production of heterogeneous catalysts for biodiesel synthesis. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 5(2), pp.73–75.
- Tas, S. and Tas, B., 2007. Some physiological responses of drought stress in wheat genotypes with different ploidity in Turkiye. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(2), pp.178–183.
- Tesfaye, K., Walker, S. and Tsubo, M., 2006. Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. *European Journal of Agronomy*, 25, pp.60–70. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.014>
- Tourfi, F. and Shokuhfar, A., 2019. Effect of humic acid on yield, yield components and physiological parameters of wheat in deficit irrigation conditions. *Journal of Plant Production Sciences*, 9, pp.121–132.
- Ulukan, H., 2008. Agronomic adaptation of some field crops: a general approach. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(3), pp.169–179. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.2008.00306.x>

Crop Science Research in Arid Regions

Vol. 7, No. 1, Spring 2025

Publisher: University of Zabol

Editor-in-Chief: Dr. Mohammad Reza Asgharipour, Professor, Department of Agronomy, University of Zabol

Managing Editor: Dr. Esmaeel Seyedabadi, Associate Professor, Department of Agronomy, University of Zabol

Editorial Board:

Dr. Seyyed Jalal Tabatabaei, Professor, Department of Horticultural, University of Shahed

Dr. Naser Majnoon Hoseini, Professor, Department of Agricultural Science, University of Tehran

Dr. Mohammad Reza Shakiba, Professor, Department of Plant Ecophysiology, University of Tabriz

Dr. Seyyed Mohsen Mousavi Nik, Professor, Department of Agronomy, University of Zabol

Dr. Mohammad Sedghi, Professor, Department of Agronomy, University of Ardabil

Dr. Khosro Azizi, Professor, Department of Agronomy, Lorestan University

Dr. Abdol Ali Ghafari, Associate Professor, Dryland Agricultural Research Institute (DARI)

Dr. Mohammad Reza Asgharipour, Professor, Department of Agronomy, University of Zabol

Dr. Behnam Kamkar, Professor, Department of Agronomy, Ferdowsi University of Mashhad

Dr. Reza Sadrabadi Haghighi, Professor, Department of Agronomy Islamic Azad University of Mashhad

Dr. Mahmoud Ramroodi, Professor, Department of Agronomy, University of Zabol

Dr. Mehdi Dahmardeh, Associate Professor, Department of Agronomy, University of Zabol

International Advisory Board:

Dr. Aria Dolatabadian, Assistant Professor, University of Western Australia, Australia

Dr. Howard Charles Lee, University of Hadlow College, England

Dr. Amit Kesarwani, Assistant Professor, University of Pantnagar, India

Dr. Shahzad maqsood Ahmed Basra, Professor, University of Agricultural, Faisalabad, Pakistan

Dr. Murat Tunçtürk, Professor, University of Van Yüzüncü Yıl, Turkey

Assistant Editors: Dr. Esmaeel Seyedabadi, Dr. Abbas Nasiri Dehsorkhi

Typesetting: Fatemeh Fathi

Address: Journals office, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Bonjar Road, Zabol, Iran, 9861335856.

Tel: +98(54)31232102, **Fax:** +98(54)31232100

Email: csraa@uoz.ac.ir, csraa.uoz1@gmail.com

URL: www.cropsscience.uoz.ac.ir

Chickpea (<i>Cicer arietinum</i> L.): Achievements and opportunities in response to abiotic stresses and its flexibility to changing weather conditions	179
Bahman Fazeli-Nasab, Saeedreza Vessal, Abdolreza Bagheri, Saeid Malekzadeh-Shafaroudi	
Evaluation of photosynthetic pigments, yield and yield components of mung bean (<i>Vigna radiate</i> L.) in response to humic acid application and irrigation interruption	217

Amene Haqshenas, Khosro Azizi, Nasser Bakhtiari, Saeed Heydari



Effects of foliar application of potassium silicate and calcium nitrate on grain yield, photosynthetic pigments and concentration of mineral elements of in seed of safflower at a dry condition Ali Shadrooz, Mostafa Heidari, Mehdi Baradaran Firouzabadi	1
Multivariate analysis of new genotypes of durum wheat (<i>Triticum durum</i>) in full irrigation and terminal drought stress conditions Rashin Taheri, Zahra Khodarahmpour, Manoochehr Khodarahmi, Mohammad Moradi	19
Identifying and determining factors affecting rainfed barley yield gap in drought stress conditions at the end of the growing season Reza Ataei Azimi, Ali Rahemi Karizaki, Abbas Biabani, Masomeh Naeemi	39
Morpho-physiological and essential oil of <i>Satureja mutica</i> Fisch. affected by elicitors and irrigation regimes Mehrab Yadegari	53
Effect of drought stress, organic manure and potassium on grain yield and quality and water productivity of rapeseed Hamdollah Eskandari, Kamyar Kazemi	77
Evaluation of the foliar application of iron sulfate on the quantitative and qualitative yield of grain maize cultivars Milad Soltani Nejad, Mehdi Dahmardeh, Eissa Khammari	91
Evaluation of promising high-yield bread wheat lines with desirable agronomic traits using the selection index of ideal genotype (SIIG) in southern Fars province Ali Reza Askari Kelestani, Mohsen Esmailzadeh Moghadam, Sirous Tahmasebi, Manouchehr Dasfal	105
Evaluation of the genetic parameters of performance and important agronomic traits of the safflower genotypes resulting from the crossing of the variety Omid Bakhsh 93 × American under drought stress Seyedeh Esmat Hashemi Fadaki, Nafiseh Mahdinezhad, Ghasem Mohammadinejad, Fatemeh Ebrahimi, Barat Ali Fakheri	125
Investigating the effect of physiological characteristics of durum wheat on yield under rainfed conditions using multivariate statistical methods Hoshang Rahmati, Ali Nakhzari Moghadam	139
The effect of nanosilicon and zinc nanooxide on the quantitative, qualitative, and water and zinc use efficiency of soybeans (<i>Glycine max</i> L.) under irrigation regimes Heshmatollah Azizi, Abbas Maleki, Mohammad Mirzaei Heydari, Farzad Babaei, Ali Hatami	157

The list is continued on the back cover.....