



Original Article

The Effect of Drought Stress on Morpho-Physiological Responses of Wild Mustard (*Sinapis arvensis*) and Chickpea (*Cicer arietinum* L.) under Interference Conditions

Rahim Bakhsh Mohammadnezhad, Ebrahim Izadi Darbandi ^{*ID}, Mehdi Rastgoo ^{ID}

Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Article Info

Received:

February 23, 2025

Accepted:

May 31, 2025

First published online:

June 22, 2025

Corresponding Author:

Ebrahim Izadi Darbandi

Email:

e-izadi@um.ac.ir

Abstract

To evaluate the effects of different drought stress levels on the morpho-physiological responses of wild mustard and chickpea under interference conditions, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, during 2019. The experimental treatments comprised five interference ratios of chickpea/wild mustard (100/0, 75%/25%, 50%/50%, 25%/75% and 0/100%) and three drought stress levels (50%, 75%, and 90% field capacity). Results indicated that increasing drought stress intensity (from 90% to 50% field capacity) reduced chickpea biological and grain yields by up to 45% and 60%, respectively. Moreover, higher proportions of wild mustard interference significantly decreased chickpea grain yield; grain yield declined by 20%, 40%, and 65% as chickpea proportion decreased from 100% to 25%. Physiological parameters of chickpea, including stomatal conductance and net photosynthesis rate, were also markedly influenced by both drought stress and competitive ratios. At 50% field capacity, stomatal conductance and photosynthetic rate decreased by 35% and 45%, respectively, whereas at 75% field capacity, reductions reached 50% and 60%. Increasing wild mustard interference exerted a pronounced negative effect: In the 25%/75% mixture, stomatal conductance and net photosynthesis were 30% lower than in the sole chickpea treatment. The interaction between drought stress and interference ratio revealed that under severe drought stress (50% field capacity) combined with the highest wild mustard interference (75%/25%), chickpea yield declined by more than 75%. Notably, severe drought stress appeared to attenuate the competitive ability of wild mustard, thereby reducing its suppressive effect on chickpea.

Key words: Competitive ability, Field Capacity, grain yield, Photosynthetic rate, Stomatal conductance.

Cite this article: Mohammadnezhad, R.B., Izadi Darbandi, E., & Rastgoo, M. (2025). The effect of drought stress on morpho-physiological responses of wild mustard (*Sinapis arvensis*) and chickpea (*Cicer arietinum* L.) under interference conditions. Iran. J. of Weed Sci. 21(1): 75-100. DOI: [10.22034/ijws.2026.371507.1515](https://doi.org/10.22034/ijws.2026.371507.1515)





مقاله پژوهشی

تأثیر تنش خشکی بر پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) و نخود (*Cicer arietinum* L.) در شرایط تداخل

رحیم بخش محمدنژاد لجی، ابراهیم ایزدی دربندی*، مهدی راستگو^{id}

گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

به منظور ارزیابی اثرات تنش خشکی و تداخل خردل وحشی بر گیاه نخود، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی و در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۸ انجام شد. تیمارهای مورد بررسی شامل نسبت‌های کشت نخود/خردل وحشی در پنج سطح (۰/۱۰۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱۰۰/۰) و اعمال تنش خشکی در سه سطح (۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی) بودند. با افزایش تنش خشکی از حالت رطوبت بهینه (۹۰/FC) به تنش شدید (۵۰/FC)، در شرایط عدم تداخل ۰/۱۰۰، عملکرد دانه و بیولوژیک نخود به ترتیب ۲۰ و ۱۳ درصد کاهش پیدا کرد و در بیشترین سطح تداخل (۷۵/۲۵) این مقدار به ۷۲ و ۷۰ درصد کاهش رسید. در تیمارهای تداخل، با کاهش سهم نخود از ۱۰۰ درصد به ۲۵ درصد، عملکرد دانه نخود به ترتیب ۱۸، ۳۴ و ۶۵ درصد کاهش یافت. شاخص‌های فیزیولوژیکی نخود مانند هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز خالص نیز تحت تأثیر تنش خشکی و نسبت تداخل خردل وحشی قرار گرفتند. در شدت تنش ۷۵ درصد، هدایت روزنه‌ای و نرخ فتوسنتز به ترتیب ۳۰ و ۴۵ درصد کاهش داشت؛ در حالی که در تنش ۵۰ درصد، این کاهش به ۷۰ و ۶۰ درصد رسید. افزایش تداخل خردل وحشی نیز تأثیر منفی قابل توجهی داشت؛ در تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی، هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز خالص ۳۰ درصد کمتر از تیمار ۱۰۰ درصد نخود بود. تأثیر متقابل تنش خشکی و نسبت تداخل نشان داد که در بالاترین سطح تنش (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و بیشترین میزان نسبت تداخل خردل وحشی (۷۵/۲۵)، کاهش عملکرد نخود به بیش از ۷۵ درصد رسید. با توجه به نتایج حاصل، در شرایط تنش خشکی اثرات تداخل علف‌های‌هرز خردل وحشی با گیاه زراعی نخود کاهش یافت؛ به طوری که در شرایط خشکی شدید، توان رقابتی خردل وحشی به شدت کاهش یافت که این امر موجب کاهش فشار رقابتی آن بر نخود شد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۳/۱۰

تاریخ انتشار برخط:

۱۴۰۴/۰۴/۰۱

نویسنده مسئول:

ابراهیم ایزدی دربندی

ایمیل:

e-izadi@um.ac.ir

واژه‌های کلیدی: توان رقابتی،

ظرفیت زراعی، عملکرد دانه، نرخ

فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای.

استناد: محمدنژاد لجی، ر.ب.، ایزدی دربندی، ا.، و راستگو، م. (۱۴۰۴). تأثیر تنش خشکی بر پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) و نخود (*Cicer arietinum* L.) در شرایط تداخل. دانش علف‌های‌هرز ایران، ۲۱(۱): ۷۵-۱۰۰.

DOI: 10.22034/ijws.2026.371507.1515

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان است. © ۱۴۰۴. ناشر این مقاله، انجمن علوم علف‌های‌هرز ایران و موسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور است. این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.



Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

مقدمه

نخود (*Cicer arietinum* L.) در بین حبوبات به خاطر خصوصیات برجسته‌ای از جمله مقاومت به خشکی، تحمل سرما و کاربردهای متنوع آن، اهمیت زیادی داشته و از نظر سطح زیر کشت در ایران، مقام اول را دارا است (Anonymous, 2024) و به دلیل میزان بالای پروتئین دانه از اهمیت غذایی بالایی برخوردار است (Wallace et al., 2016).

در بین عوامل محدودکننده تولید و بهبود عملکرد نخود، علف‌های‌هرز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل هستند (Veisi et al., 2020). نخود به دلیل سرعت رشد کند و سطح برگ کم در برابر علف‌های‌هرز رقیب ضعیفی است؛ به‌طوری‌که در صورت عدم کنترل و مدیریت ضعیف علف‌های‌هرز آن، تلفات عملکرد تا بیش از ۹۰ درصد نیز گزارش شده است و در نتیجه دستیابی به بیشینه ظرفیت تولید در این گیاه، نیازمند مدیریت و کنترل کارآمد علف‌های‌هرز است (Fallahi et al., 2021). علف‌های‌هرز نه تنها روی عملکرد نخود تأثیر می‌گذارند، بلکه برداشت مکانیزه آن را نیز دچار مشکل می‌کنند (Ahmadi et al., 2008). براساس گزارش‌های موجود، خسارت علف‌های‌هرز در نخود در ایران بین ۴۸ تا ۶۶/۴ درصد و در برخی گزارش‌ها تا ۹۲ درصد تخمین زده شده است (Veisi et al., 2020).

از سوی دیگر، کمبود آب از عوامل اصلی محدودکننده کشاورزی به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. این در شرایطی است

که بیشتر اراضی کشاورزی ایران در این نواحی واقع شده‌اند و با تنش خشکی روبرو هستند؛ به‌طوری‌که با توجه به میانگین بارندگی سالانه ۲۴۰ میلی‌متر در ایران و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی آن، ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب شده و حدود ۹۰ درصد از سطح کشور تحت تنش خشکی می‌باشد (Nazeri Tahradi et al., 2016). از آنجایی‌که طبق گزارش‌های آماری سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ وزارت جهاد کشاورزی ۹۸ درصد از سطح زیر کشت نخود در ایران به‌صورت دیم است (Anonymous, 2024)، لذا قرار گرفتن نخود در معرض تنش خشکی که به‌تنهایی عامل حدود ۴۵ درصد کاهش تولید می‌باشد در کنار رقابت علف‌های‌هرز با آن محدودیت‌های تولید آن را تشدید می‌کند و از این‌رو بررسی اثرات متقابل و توأم این دو عامل و کمی‌سازی آنها در رشد و تولید نخود مهم و در برنامه‌ریزی مدیریت آنها مفید خواهد بود (Pouresmael et al., 2022). نتایج نیاوپان و همکاران (Nyaupane et al., 2024) نشان داد که گندم (*Triticum aestivum* L.) با حفظ سطح برگ خود تحت تنش خشکی برتری رقابتی بیشتری نسبت به چچم ایتالیایی (*Lolium multiflorum* L.) داشته است. بابایی و همکاران (Babaei Zarch et al., 2015) گزارش کردند که تنش خشکی منجر به تشدید رقابت خلر (*Lathyrus sativus* L.) و تاج‌خروس وحشی (*Amaranthus retroflexus* L.) می‌شود. براساس گزارش نامبردگان در شرایط عدم تنش و تنش

شرایط عدم تنش رطوبت، ۵۵ درصد بود؛ در حالی که در شرایط تنش رطوبتی ۸۶ درصد بود. در مطالعه‌ای دیگر بررسی تأثیر آبیاری بر رشد و رقابت چندگونه علف‌هرز با ذرت نشان داد که با کاهش میزان آب آبیاری توان رقابتی خرفه (*Portulaca oleracea* L.) روی ذرت کاهش یافت؛ در حالی که با کاهش مقدار آب آبیاری تأثیر منفی تاجریزی سیاه (*Solanum nigrum* L.) روی عملکرد ذرت افزایش یافت. بر اساس گزارش مذکور حساسیت بیشتر خرفه به کاهش میزان آب مصرفی به این دلیل است که خرفه یک‌گونه CAM (در شرایط کمبود رطوبت خاک) با نیاز آبی بالا است (Mahmoudi et al., 2017). نتایج مشابهی در مورد تأثیر تنش خشکی بر گونه‌ای تاج‌خروس وحشی (*A. rudis* L.) نشان داد که افزایش شدت تنش خشکی سبب کاهش ارتفاع، سطح برگ، زیست‌توده اندام‌های هوایی و مقدار بذری تولیدی این علف‌هرز شد (Sarangi et al., 2016).

با توجه به اینکه نه تنها رشد گیاهان بلکه تأثیرات تعاملی آن‌ها در روابط مجاورتی تحت تأثیر شرایط محیطی از جمله تنش‌های محیطی از قبیل خشکی قرار می‌گیرد؛ انتظار می‌رود که شدت رقابت علف‌های‌هرز با گیاهان زراعی و عملکرد آنها و نیز کارایی راهکارهای کنترل علف‌های‌هرز نیز متأثر از این شرایط باشد. از این رو ضمن نیاز به بررسی و پژوهش این مهم، دست‌یابی به پتانسیل تولید نخود در این شرایط، نیازمند توجه کافی به روابط تداخلی علف‌های‌هرز و به‌کارگیری روش‌های مدیریتی مناسب برای حذف یا کاهش

خفیف، تاج‌خروس وحشی در رقابت موفق‌تر عمل کرد؛ ولی در تنش‌های شدیدتر خلر توانایی بیشتری در رقابت داشته و توانسته است بر تاج‌خروس وحشی چیره شود. گندمی (Gandomi, 2015) گزارش کرد که در شرایط کمبود رطوبت خاک، قدرت رقابتی یولاف وحشی (*Avena fatua* L.) کاهش می‌یابد و برعکس توان رقابتی گندم افزایش می‌یابد؛ به طوری که کاهش میزان آب آبیاری به ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب سبب کاهش زیست‌توده یولاف وحشی به میزان ۲۹ و ۴۳ درصد شد و ارتفاع بوته یولاف وحشی نیز تحت تأثیر تنش خشکی ناشی از تأمین ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۵ و ۱۳ درصد کاهش یافت. در مطالعه‌ای دیگر و در بررسی تأثیر کم‌آبیاری به میزان ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی بر رقابت آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) با علف‌هرز تاج‌خروس وحشی، مشاهده شد که اگرچه تنش خشکی سبب کاهش میزان ماده خشک تولیدی گیاه زراعی و علف‌هرز شد؛ اما وزن خشک تاج‌خروس وحشی در مقایسه با آفتابگردان بیشتر تحت تأثیر کم‌آبیاری قرار گرفت (Kiamarsi, & Kazemini, 2014). راشد محصل و ایزدی دربندی (Izadi Darbandi & Rashed, 2009) نیز گزارش کردند که تنش خشکی میزان ماده خشک تولیدی تاج‌خروس وحشی را در رقابت با ذرت (*Zea mays* L.) بیشتر کاهش می‌دهد. بر اساس نتایج ایزدی دربندی (Izadi Darbandi, 2013) درصد کاهش عملکرد ناشی از رقابت تاج‌خروس وحشی با ذرت در

دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۸ انجام شد. تیمارهای مورد بررسی در آن شامل نسبت‌های تداخل نخود و علف خردل وحشی در پنج سطح (۰/۱۰۰، ۲۵/۷۵، ۵۰/۵۰ و ۷۵/۲۵ و ۱۰۰/۰ نخود/خردل وحشی) و سطوح مختلف تنش خشکی (۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی) بودند. واحدهای آزمایشی شامل گلدان‌هایی با قطر دهانه ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر بود که با نسبت ۱:۱ از خاک مزرعه‌ای با سابقه کشت نخود (جدول ۱) پر شدند.

تأثیرات تداخلی آن‌ها است. از آنجایی که با توجه به آمار مذکور شرایط کشت و کار نخود در ایران در اغلب نقاط کشور در معرض تنش خشکی است؛ از این رو، این آزمایش به منظور بررسی اثرات تداخلی علف هرز خردل وحشی با نخود در شرایط تنش خشکی انجام شد.

مواد و روشها

این آزمایش به منظور ارزیابی تأثیر تنش خشکی و تداخل بر پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک نخود و علف هرز خردل وحشی انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی و در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده برای آزمایش.

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used in the experiment.

Texture	N (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	pH	EC (ds m ⁻¹)	OC (%)	Depth (cm)
Loam-Silty	0.19	18.4	141	7.86	0.95	1.16	0-30

گلدان از گلدان‌های فوق در دمای ۱۰۵ درجه خشک و وزن شد. سپس به آرامی به این گلدان‌ها به اندازه‌ای آب اضافه شد تا خاک گلدان از آب اشباع شده و آب از انتهای گلدان خارج شد. برای جلوگیری از تبخیر آب از سطوح خاک، روی این گلدان‌ها با ورق آلومینیومی پوشیده شد تا از تبخیر آب جلوگیری شود و بعد از ۱۲ ساعت هر دو ساعت یک‌بار گلدان تا ثابت شدن وزن آن توزین شد. ثابت شدن وزن گلدان‌ها به عنوان رسیدن وضعیت آب خاک به ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد. با تفاضل وزن خاک در این مرحله و وزن خاک خشک، مقدار آب لازم برای رسیدن خاک هر گلدان به حد ظرفیت زراعی مشخص و سطوح

پس از آماده‌سازی گلدان‌ها با خاک آماده‌شده، بذور نخود و علف‌های هرز در سینی‌های نشاء کشت شدند. پس از سبزشدن بذور و استقرار اولیه گیاهچه‌ها در مرحله دو تا چهار برگی نخود که مصادف با سه تا چهار برگی علف هرز خردل وحشی بود، نشاها به گلدان‌ها منتقل شدند. تراکم گیاهان در داخل هر گلدان ثابت و برابر با چهار بوته بود که با نسبت‌های تراکم کشت نخود و خردل وحشی به ترتیب ۴:۰، ۳:۱، ۲:۲، ۱:۳ و ۰:۴ در هر گلدان کاشته شدند. پس از تثبیت گیاهان در گلدان‌ها، تیمارهای تنش خشکی از مرحله شش برگی نخود اعمال شد. جهت اعمال سطوح خشکی از روش وزنی استفاده شد. قبل از شروع آزمایش، خاک سه

توزین مجدد و خشک کردن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Smart & Bingham, 1974).

(معادله ۱)

RWC=

$100 \times ((\text{وزن خشک} - \text{وزن تورژسانس}) / (\text{وزن خشک} - \text{وزن تر}))$

همچنین، پس از رسیدن فیزیولوژیکی نخود (مرحله قهوه‌ای شدن نیام‌ها)، صفات مورفولوژیک و عملکردی نخود شامل ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در بوته، وزن دانه در بوته (با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم)، وزن صد دانه، عملکرد دانه (با استفاده از جمع وزن دانه‌های هر گلدان و تبدیل به گرم در مترمربع)، عملکرد بیولوژیک (جمع وزن خشک کل اندام‌های هوایی هر گلدان و تبدیل به مترمربع)، و وزن خشک ریشه و اندام‌هوایی (پس از خشک کردن نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت) اندازه‌گیری شد. برای بوته‌های خردل وحشی نیز ارتفاع، وزن خشک اندام‌هوایی و وزن خشک ریشه (با جمع‌آوری نمونه‌ها، جداسازی اندام‌ها، و خشک کردن در آون در شرایط مشابه نخود) اندازه‌گیری شدند. برای محاسبات آماری در این مطالعه از نرم‌افزار SAS 9.4 و برای ترسیم شکل‌ها از Excel (Ver. 2013) استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

خشکی بر همین اساس مشخص شد (Majer et al., 2008). با توجه به اینکه تمامی گلدان‌ها از وزن یکسانی برخوردار بودند، با توزین گلدان‌ها به صورت روزانه رطوبت کسر شده به آن‌ها اضافه و وضعیت رطوبتی گلدان‌ها مطابق با تیمار رطوبتی مورد نظر حفظ شد. برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی در اوایل گلدهی از هر یک از نمونه‌ها یک برگ کاملاً توسعه‌یافته انتخاب کرده و صفاتی مانند محتوی نسبی آب برگ، شاخص سبزی‌نگی برگ (SPAD)، نرخ فتوسنتز، تعرق، هدایت روزنه‌ای، غلظت CO₂ زیر روزنه اندازه‌گیری شد. شاخص‌های فتوسنتزی با دستگاه فتوسنتزسنج (مدل Li6400XT، ساخت شرکت ADC Bioscientific Ltd, UK) اندازه‌گیری و نرخ فتوسنتز خالص (Pn)، غلظت CO₂ بین سلولی (Ci)، هدایت روزنه‌ای (Gs) و نرخ (Tr) بررسی شدند. برای این منظور، برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته گیاه برای این اندازه‌گیری‌ها انتخاب شدند. اندازه‌گیری‌ها از ساعت ۸:۵۰ تا ۱۱:۰۰ صبح انجام و شدت نور LED روی ۸۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه تنظیم شد. از دستگاه کلروفیل‌متر SPAD-502 (Minolta، ژاپن) برای تعیین سبزی‌نگی برگ (عدد SPAD) گیاهان استفاده شد. محتوای نسبی آب برگ در برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته، پس از توزین اولیه، ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب مقطر،

نتایج و بحث

خصوصیات رشدی و عملکردی نخود

نتایج تجزیه واریانس داده‌های رشد و عملکرد نخود نشان داد که تاثیر تنش خشکی بر صفات ارتفاع بوته، وزن خشک اندام‌های هوایی، وزن خشک ریشه، تعداد غلاف در بوته، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک نخود معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) اما بر وزن صددانه تاثیر معنی‌داری نداشت. تاثیر نسبت تداخل

نیز بر صفات ارتفاع بوته ($p \leq 0.05$)، وزن خشکاندام‌های هوایی، وزن خشک ریشه، تعداد غلاف در بوته، وزن صددانه، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک کاملاً معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$). تاثیر متقابل تنش خشکی و نسبت تداخل بر صفات وزن خشک اندام‌های هوایی، وزن خشک ریشه، تعداد غلاف در بوته، وزن صددانه، عملکرد بیولوژیک ($p \leq 0.01$) و عملکرد دانه ($p \leq 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تاثیر نسبت‌های مختلف تداخل و سطوح مختلف تنش خشکی بر صفات رشدی و عملکردی نخود.

Table 2. Results of the analysis of variance for the effects of different interference ratios and different drought stress levels on chickpea growth and yield traits.

Sources of Variation (SOV)	DF	Mean Squares					
		Plant height	Root dry weight	Number of pods per plant	100-grain weight	Seed yield	Biological yield
Drought stress (A)	2	169**	0.318**	20.1**	15.0 ^{ns}	64.0**	217**
Interference ratio (B)	4	91.6*	1.16**	36.6**	111**	248**	804**
A × B	8	18.0 ^{ns}	0.139**	18.0**	107**	10.7*	97.9**
Error	30	23.8	0.018	1.25	6.25	2.98	24.5
CV (%)		9.68	9.89	17.6	5.83	9.21	13.5

^{ns}, * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

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

۱a). در نسبت‌های مختلف تداخل نخود و خردل-وحشی، بیشترین ارتفاع بوته (۵۴/۱ سانتی‌متر) در تیمار ۱۰۰ درصد نخود و کمترین ارتفاع (۴۶/۷ سانتی‌متر) در تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل-وحشی مشاهده شد (شکل ۱b).

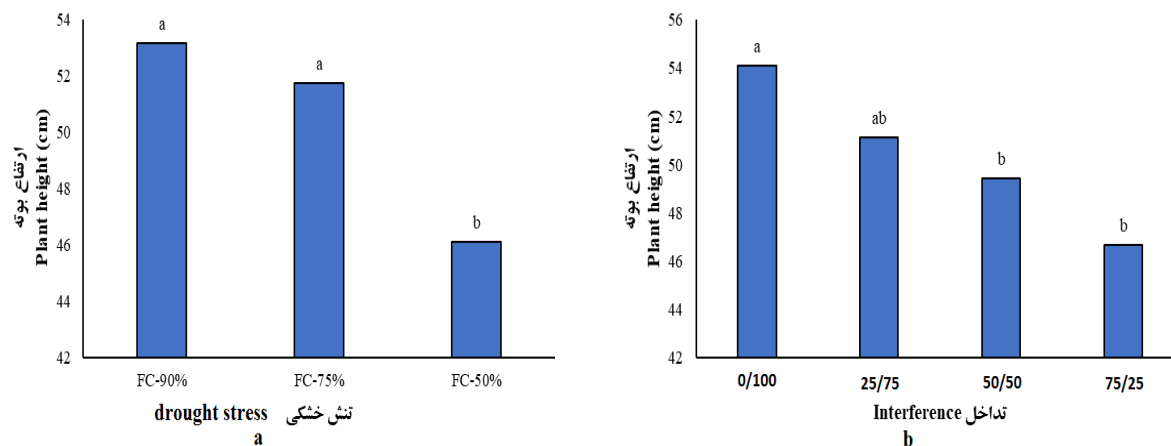
کاهش ارتفاع نخود در تاثیر تنش خشکی و نسبت تداخل می‌تواند به ترتیب به دلیل محدودیت جذب آب و کاهش تورژسانس سلولی لازم برای تقسیم و توسعه سلولی و نیز کاهش فتوسنتز و تولید ماده خشک (Wang et al., 2018) و رقابت برای منابع مشترک و محدود باشد. پژوهش‌های پیشین نیز

ارتفاع بوته نخود

نتایج نشان داد که تنش خشکی تاثیر منفی و معنی‌داری بر ارتفاع بوته نخود و خردل-وحشی داشت. بر اساس نتایج آزمایش، در شرایط بدون تنش (FC-90)، متوسط ارتفاع بوته ۵۳/۲ سانتی‌متر بود. با کاهش میزان دسترسی به آب و افزایش شدت تنش، ارتفاع بوته به ۵۱/۸ سانتی‌متر در سطح تنش متوسط (FC-75) و ۴۶/۱ سانتی‌متر در بالاترین سطح تنش خشکی (FC-50) کاهش یافت (شکل

گزارش شده است که با ایجاد سایه‌اندازی و کاهش دسترسی نخود به نور خورشید، می‌تواند سرعت رشد و توسعه گونه‌های رقیب را محدود کند (Ghorai & Ghorai, 2023).

کاهش ارتفاع گیاه در شرایط تنش خشکی (Yang et al., 2021) و تداخل علف‌های هرز (Singh et al., 2022) را گزارش کرده‌اند. در این ارتباط خردل وحشی به‌عنوان یک علف‌هرز رقیب



شکل ۱. مقایسه میانگین تأثیر تنش خشکی (a) و نسبت تداخل (b) بر ارتفاع بوته نخود. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

Figure 1. Mean comparisons of the effects of drought stress (a) and interference ratios (b) on chickpea plant height. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level.

زمانی بود که حداکثر تنش خشکی و حداکثر سطح تداخل یعنی تیمار ۷۵/۲۵×FC-۵۰ وجود داشت. بر اساس نتایج حاصل، در سطح رطوبتی FC-۹۰٪ با افزایش نسبت تداخل خردل وحشی در نخود، وزن خشک ریشه نخود به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) تحت تأثیر قرار گرفت. در نسبت تداخل ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی وزن خشک ریشه نخود نسبت به شاهد ۲۰/۵ درصد کاهش یافت. این در حالی است که در نسبت تداخل ۵۰/۵۰ به میزان ۳۴/۵ درصد و در بالاترین سطح نسبت تداخل خردل وحشی ۷۵/۲۵، به ۴۸ درصد رسید. در سطح تنش FC-۷۵٪، روندی مشابه اما با تأثیر منفی بیشتر مشاهده شد. به‌طوری‌که در نسبت تداخل ۷۵/۲۵ نخود/خردل-وحشی وزن خشک ریشه ۳۸/۳۲ درصد کاهش

وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه

نتایج نشان داد که دو عامل تنش خشکی و نسبت تداخل و همچنین اثرات متقابل آنها برهم به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) وزن خشک اندام هوایی نخود را تحت تأثیر قرار داد؛ به‌طوری‌که بیشترین وزن خشک اندام‌های هوایی نخود در تیمار ۰/۱۰۰ در شرایط عدم تداخل حاصل شد و کمترین وزن خشک اندام‌های هوایی نخود مربوط به تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی بود. اثرات متقابل دو عامل تنش خشکی و نسبت تداخل نشان داد که با افزایش تنش و نسبت تداخل میزان وزن خشک اندام‌های هوایی نخود کاهش پیدا می‌کند؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار وزن خشک اندام‌های هوایی نخود مربوط به

یافت و با افزایش شدت تنش خشکی به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (FC-50٪)، به ۶۷/۰۸ درصد رسید و افزایش نسبت تداخل خردل وحشی بر تاثیرات منفی آن بر وزن خشک ریشه نخود افزود (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه میانگین برهمکنش تاثیر سطوح مختلف تنش خشکی و نسبت‌های مختلف تداخل بر خصوصیات رشدی و عملکردی نخود.

Table 3. Mean comparisons of the interaction effects between different levels of drought stress and various interference ratios on chickpea growth and yield traits.

Drought stress (% FC)	Interference ratio	Root dry weight (g)	Number of pods per plant	100-grain weight (g)	Seed yield (g)	Biological yield (g)
90	0/100	2.00 ^a	5.00 ^{b-e}	40.2 ^{cd}	29.0 ^a	51.3 ^a
	25/75	1.59 ^{bc}	6.00 ^{b-d}	43.2 ^{bc}	19.4 ^c	40.6 ^b
	50/50	1.31 ^d	6.00 ^{b-d}	44.8 ^b	19.2 ^c	36.6 ^{b-d}
	75/25	1.04 ^f	12.7 ^a	44.9 ^b	16.6 ^{cd}	30.4 ^{c-e}
75	0/100	1.67 ^b	4.33 ^{de}	42.8 ^{b-d}	24.6 ^b	51.2 ^a
	25/75	1.54 ^{bc}	4.67 ^{c-e}	39.0 ^{cd}	18.5 ^c	39.0 ^b
	50/50	1.28 ^{de}	6.67 ^b	45.4 ^b	18.5 ^c	36.7 ^{b-d}
	75/25	1.03 ^f	11.3 ^a	39.4 ^{cd}	13.6 ^e	27.4 ^e
50	0/100	1.61 ^{bc}	5.33 ^{b-e}	34.6 ^e	23.1 ^b	44.6 ^{ab}
	25/75	1.42 ^{cd}	4.33 ^{de}	41.3 ^{b-d}	19.1 ^c	38.1 ^{bc}
	50/50	1.06 ^{ef}	6.33 ^{bc}	41.8 ^{b-d}	15.3 ^{de}	29.5 ^{de}
	75/25	0.537 ^g	3.67 ^e	57.4 ^a	8.23 ^f	15.4 ^f

در هر ستون، میانگین‌های با حرف یکسان بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each column, means with the same letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% level.

غلاف (۱۲/۷) نه در تیمار شاهد (۰/۱۰۰) بلکه در تیمار نسبت کشت ۷۵/۲۵ (نخود/خردل وحشی) مشاهده شد و تا نسبت کشت ۵۰/۵۰ نیز ادامه داشت. این در حالی است که در نسبت کشت ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی این صفت ۲۰ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. در سطح تنش ۷۵-FC٪ نیز، روند مشابهی مشاهده شد و بیشترین تعداد غلاف در بوته در نسبت کشت ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی مشاهده شد. اما با افزایش شدت تنش خشکی به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (FC-50٪)، توانایی جبرانی گیاه به شدت تضعیف شد و تعداد غلاف در تیمار ۷۵/۲۵ (نخود/خردل وحشی) کاهش معنی‌داری (۷۱ درصد) را نشان داد. در نگاه اول، غیرمنتظره به نظر می‌رسد که بیشترین تعداد غلاف در شرایطی مشاهده شده است که شدیدترین رقابت (۷۵/۲۵) و

با توجه به اینکه در شرایط تنش، منابع فتوسنتزی به جای رشد اندام‌های هوایی و ریشه، به مکانیسم‌های سازگاری نظیر افزایش تولید ترکیبات اسمولیت‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد اختصاص می‌یابد (Gul et al., 2022)، تشدید تاثیرات تداخل خردل-وحشی با نخود در این شرایط دور از انتظار نیست (MacLaren et al., 2020).

تعداد غلاف در بوته و وزن صدانه

تعداد غلاف در بوته به عنوان یکی از اجزای کلیدی عملکرد در نخود، تحت تاثیر معنی‌دار اثرات متقابل تنش خشکی و نسبت تداخل قرار گرفت. در سطح رطوبتی ۹۰-FC٪، با افزایش نسبت کشت خردل در تداخل با نخود، تعداد غلاف در هر بوته نخود به طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) تحت تأثیر قرار گرفت. بر خلاف سایر صفات عملکردی، بیشترین تعداد

به‌عنوان یک استراتژی بقاء در گیاه نخود تحت محدودیت‌های محیطی و رقابتی تأکید می‌کنند.

عملکرد دانه و بیولوژیک

عملکرد دانه به‌عنوان مهم‌ترین صفت زراعی، بیشترین حساسیت را به اثرات ترکیبی تنش خشکی و رقابت نشان داد. در سطح رطوبتی (FC-90)، با افزایش نسبت کشت خردل در تداخل با نخود، عملکرد دانه نخود به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) کاهش یافت. در نسبت کشت ۲۵/۷۵ نخود/خردل- وحشی، عملکرد دانه نخود نسبت به شاهد ۳۳ درصد کاهش یافت. این در حالی است که در نسبت کشت ۵۰/۵۰، ۳۴ درصد و در بالاترین سطح نسبت کشت خردل وحشی ۷۵/۲۵، ۴۳ درصد کاهش یافت. در سطح تنش FC-75، روند مشابهی با تأثیر منفی بیشتر مشاهده شد؛ به‌طوری‌که در نسبت کشت ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی، عملکرد دانه ۵۳ درصد کاهش یافت. با افزایش شدت تنش خشکی به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، این کاهش به ۷۱ درصد رسید و افزایش نسبت کشت خردل وحشی بر اثرات منفی آن بر عملکرد نهایی نخود افزود. عملکرد بیولوژیک (مجموع وزن خشک اندام هوایی و دانه) نیز به‌شدت تحت تأثیر رقابت و تنش قرار گرفت. در سطح رطوبتی FC-90، با افزایش نسبت کشت خردل وحشی در تداخل با نخود، عملکرد بیولوژیک نخود به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.01$) کاهش یافت. در نسبت کشت ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی عملکرد بیولوژیک نخود نسبت به شاهد ۲۱ درصد کاهش یافت، این در حالی است که در نسبت کشت ۵۰/۵۰

تنش وجود دارد، درحالی‌که عملکرد نهایی (عملکرد بیولوژیک و دانه) در این تیمارها کمترین مقدار بود. به نظر می‌رسد نخود (مانند بسیاری از حبوبات) در پاسخ به شرایط نامساعد مانند رقابت یا تنش خشکی ملایم تا متوسط، تلاش می‌کند تا با افزایش تعداد اندام‌های بارده (غلاف)، شانس بقای ژنتیکی خود را بالا ببرد. این یک مکانیسم جبران فنولوژیکی است. گیاه به جای سرمایه‌گذاری روی تولید دانه‌های بزرگ و سنگین (که انرژی بالایی نیاز دارد)، انرژی خود را صرف تولید غلاف‌های بیشتر می‌کند (Pang et al., 2017).

تحلیل داده‌های وزن صد دانه نشان می‌دهد که گیاه از یک استراتژی جبرانی در شرایط سخت محیطی استفاده می‌کند؛ یعنی با کاهش تعداد دانه‌های تولیدی (به دلیل سقط گل و غلاف)، منابع محدود باقی‌مانده را صرف پر کردن بهتر دانه‌های اندک می‌کند تا کیفیت بقای خود را افزایش دهد. علی‌رغم کاهش شدید عملکرد کل دانه، در شرایط رقابتی و به‌ویژه تحت تنش شدید (FC-50) وزن صد دانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و در بالاترین سطح تداخل (۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی) به ۴۲ درصد افزایش رسید. این پدیده بیانگر تغییر در استراتژی تخصیص کربن است؛ جایی‌که گیاه، با تنظیم ظرفیت سینک، منابع فتوسنتزی محدود باقیمانده را به صورت اولویت‌دار به پر شدن و افزایش کیفیت دانه‌های محدود باقی‌مانده هدایت می‌کند (Ullah et al., 2021). این یافته‌ها بر اهمیت سازوکار اولویت‌دهی به کیفیت نسبت به کمیت

(Saha et al., 2022) و حضور علف‌های‌هرز این محدودیت را دوچندان می‌کند. روند کاهش عملکرد بیولوژیک نیز مشابه عملکرد دانه بود و نشان داد که افزایش رقابت خردل وحشی موجب کاهش رشد کلی گیاه نخود می‌شود. کاهش عملکرد بیولوژیک در شرایط بدون تنش تا حدودی به رقابت برای نور و مواد مغذی مرتبط است، اما در شرایط خشکی، این کاهش بسیار چشمگیرتر شد. تنش خشکی می‌تواند موجب کاهش تولید زیست‌توده از طریق کاهش فتوسنتز، تخریب ساختارهای سلولی و کاهش کارایی مصرف آب شود (Junaid et al., 2025). در چنین شرایطی، حضور علف‌های‌هرز مانند خردل وحشی می‌تواند رقابت برای رطوبت و مواد غذایی را تشدید کرده و در نهایت منجر به کاهش شدیدتر عملکرد شود.

صفات فیزیولوژیک نخود

تأثیر تنش خشکی بر تمامی صفات فیزیولوژیک نخود، از جمله محتوی نسبی آب، شاخص سبزی‌نگی، فتوسنتز خالص، تعرق، هدایت روزنه‌ای و غلظت CO_2 زیر روزنه، در سطح یک درصد کاملاً معنی‌دار بود. تأثیر نسبت تداخل نیز بر صفات محتوای نسبی آب ($p \leq 0.01$) و شاخص سبزی‌نگی، فتوسنتز خالص، تعرق، هدایت روزنه‌ای و غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای در سطح یک درصد معنی‌دار بود. از سوی دیگر، تأثیر متقابل تنش خشکی و نسبت تداخل تنها بر فتوسنتز خالص و تعرق و در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

۲۹ درصد و در بالاترین سطح نسبت کشت خردل-وحشی ۷۵/۲۵، ۴۱ درصد کاهش یافت. در سطح تنش (FC-75)، روندی مشابه اما با تأثیر منفی بیشتر مشاهده شد؛ به طوری که در نسبت کشت ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی عملکرد بیولوژیک ۴۷ درصد کاهش یافت. با افزایش شدت تنش خشکی به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی FC-50، این کاهش به ۷۰ درصد رسید و افزایش نسبت کشت خردل وحشی بر اثرات منفی آن بر تولید بیوماس کلی گیاه نخود افزود. گزارش شده است که خردل وحشی، به عنوان یک علف‌هرز رقابت‌گر، می‌تواند با جذب مؤثرتر منابع و ایجاد سایه‌اندازی، رشد و عملکرد گندم را به شدت محدود کند (Modhej, 2021).

در شرایط بدون تنش، کاهش عملکرد دانه در تیمارهای با تراکم بالاتر خردل وحشی نشان می‌دهد که حتی در شرایط مطلوب رطوبتی، حضور خردل-وحشی موجب کاهش توان تولیدی نخود می‌شود. این کاهش احتمالاً ناشی از محدودیت‌های فیزیولوژیکی و رقابتی است که مانع از توسعه کامل اندام‌های زایشی و انتقال کافی مواد فتوسنتزی به دانه می‌شود (Jing et al., 2016). با افزایش شدت تنش خشکی، این تأثیرات تشدید شدند؛ به طوری که در بالاترین سطح تداخل و در شرایط خشکی شدید، کاهش عملکرد دانه به حداکثر مقدار خود رسید. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند تنش خشکی به تنهایی می‌تواند از طریق کاهش تقسیم سلولی و کاهش جریان مواد فتوسنتزی به دانه، عملکرد گیاه را محدود کند

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس تأثیر نسبت‌های مختلف تداخل و سطوح مختلف تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیک نخود.

Table 4. Results of the analysis of variance for the effects of different interference ratios and different drought stress levels on chickpea physiological traits.

Source of Variation	DF	Mean squares					
		RWC	SPAD	Photosynthesis	Transpiration Rate	Stomatal Conductance	Intercellular CO ₂ Concentration
Drought stress (A)	2	2376**	1320**	9.66**	1.18**	0.164**	5829**
Interference ratio (B)	4	21.4*	24.0**	0.285**	0.060**	0.008**	1911**
A × B	8	11.6 ^{ns}	1.81 ^{ns}	0.097**	0.007**	0.0008 ^{ns}	85.4 ^{ns}
Error	30	6.05	3.03	0.017	0.002	0.0009	160
C.V. (%)		3.73	4.40	6.28	7.74	13.8	3.41

^{ns}, * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

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

کارایی فتوسنتزی برگ نخود در شرایط تنش خشکی است. تداخل نخود با خردل وحشی نیز منجر به کاهش معنی‌دار صفات مذکور شد؛ به طوری که، بیشترین مقدار شاخص سبزی‌نگی (۴۱/۱) در نسبت تداخل ۷۵/۲۵ و کمترین مقدار آنها (۳۷/۴) در کشت خالص نخود مشاهده شد (جدول ۵).

بر اساس نتایج آزمایش، در شرایط بدون تنش، بیشترین (۹۰-FC) شاخص سبزی‌نگی (۵۰/۶) مشاهده شد؛ اما در سطوح متوسط و شدید تنش خشکی، شاخص سبزی‌نگی به ترتیب به ۳۸/۱ و ۲۹/۸ درصد کاهش یافت. این کاهش احتمالاً به دلیل تخریب ساختار کلروفیل و متعاقب آن کاهش

جدول ۵. مقایسات میانگین تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و نسبت‌های مختلف تداخل بر صفات فیزیولوژیک نخود.

Table 5. Mean comparisons of the effects of different drought stress levels and interference ratios on chickpea physiological traits.

	RWC (%)	SPAD	Stomatal Conductance (mol. m ⁻² . s ⁻¹)	Intercellular CO ₂ Concentration (mmol. m ⁻² . s ⁻¹)
Drought stress (%FC)				
90	77.8 ^a	50.6 ^a	0.324 ^a	392 ^a
75	69.7 ^b	38.1 ^b	0.232 ^b	373 ^b
50	50.4 ^c	29.8 ^c	0.092 ^c	348 ^c
Interference ratio				
0/100	64.4 ^c	37.4 ^c	0.182 ^c	350 ^b
25/75	64.9 ^{bc}	39.1 ^b	0.202 ^{bc}	371 ^a
50/50	66.1 ^{ab}	40.5 ^{ab}	0.223 ^{ab}	378 ^a
75/25	68.4 ^a	41.1 ^a	0.256 ^a	384 ^a

در هر ستون، میانگین‌های با حرف یکسان بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each column, means with the same letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% level.

رطوبتی مطلوب (بدون تنش) برابر با ۰/۳۲۴ مول بر متر مربع بر ثانیه بود، اما با افزایش شدت تنش، این مقدار به ۰/۲۳۲ در تنش متوسط و در نهایت به ۰/۰۹۲ مول بر متر مربع بر ثانیه در تنش شدید کاهش یافت. این کاهش، نشان‌دهنده بسته‌شدن روزنه‌ها

هدایت روزنه‌ای (Gs) و غلظت CO₂ زیر روزنه‌ای (Ci)
نتایج نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی و معنی‌داری بر هدایت روزنه‌ای (Gs) و غلظت CO₂ زیر روزنه‌ای (Ci) داشت. مقدار Gs در شرایط

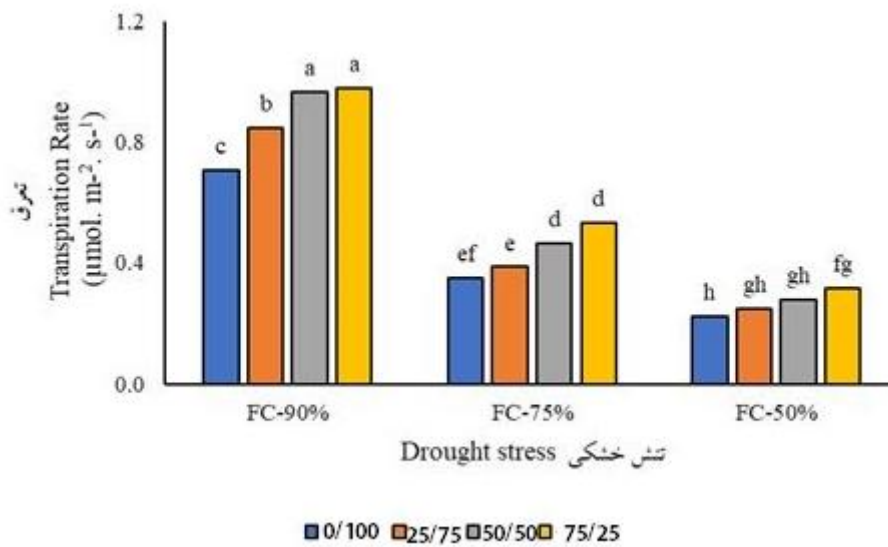
به‌طور هم‌زمان، نرخ تعرق در همین سطح رطوبتی نیز روند افزایشی داشت، به‌طوری‌که در تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی، افزایش ۱۹/۸ درصدی و در تیمارهای ۵۰/۵۰ و ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی به‌ترتیب افزایش ۷/۳۶ و ۳۸/۶ درصدی نسبت به شاهد مشاهده شد.

در سطح تنش متوسط (FC-75٪) نیز روند مشابهی مشاهده شد؛ اما به دلیل کاهش رطوبت خاک، مقادیر مطلق فتوستتوز و تعرق نسبت به شرایط بدون تنش کاهش یافت. در این شرایط، تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی افزایش ۲۲/۴ درصدی در Pn و ۵۲/۳ درصدی در Tr نسبت به تیمار شاهد داشت. در شرایط خشکی متوسط (FC-50٪) فتوستتوز و تعرق در تمامی تیمارها کاهش چشمگیری داشتند، اما همچنان تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی نسبت به تیمار (FC-90٪ × 0/100)، افزایش اندکی را در هر دو شاخص نشان داد. در این تیمار، مقدار Pn حدود ۴/۱ درصد و مقدار Tr حدود ۴۲/۴ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. با این حال، مقادیر مطلق هر دو شاخص در این سطح از تنش بسیار پایین باقی ماندند که نشان‌دهنده تأثیر منفی شدید خشکی بر فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه است. افزایش نسبی تعرق در حضور خردل وحشی به‌ویژه در سطوح بالای تداخل ممکن است به حفظ خنکی گیاه و کاهش آسیب ناشی از تنش کمک کرده باشد (شکل‌های ۲ و ۳).

به‌عنوان مکانیسم فیزیولوژیکی جهت کاهش تعرق و حفظ آب در شرایط کم‌آبی است. از سوی دیگر، بیشترین مقدار هدایت روزنه‌ای در بین تیمارهای مختلف تداخل نخود و خردل وحشی مربوط به تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی بود (۰/۲۵۶ مول بر مترمربع بر ثانیه)؛ در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار کشت خالص نخود و در شرایط عدم تداخل با خردل وحشی (۰/۱۰۰) (۰/۱۸۲) مول بر مترمربع بر ثانیه) مشاهده شد (جدول ۵). غلظت CO₂ زیر روزنه‌ای نیز با افزایش شدت تنش خشکی کاهش یافت؛ به‌طوری‌که مقدار Ci از ۳۹۲ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه در شرایط بدون تنش به ۳۷۳ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه در تنش متوسط و در نهایت به ۳۴۸ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه در شرایط تنش شدید رسید. بررسی تأثیر تداخل نشان داد که تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی با مقدار ۳۸۴ میلی‌مول بر متر مربع بر ثانیه بیشترین و تیمار نخود ۱۰۰ درصد با مقدار ۳۵۰ میلی‌مول بر متر مربع بر ثانیه کمترین غلظت CO₂ زیر روزنه‌ای را داشت (جدول ۵).

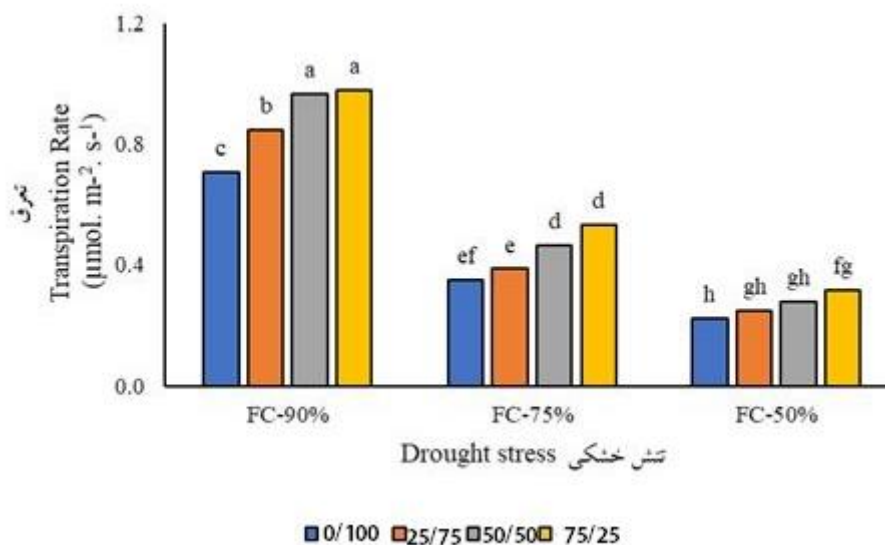
میزان فتوستتوز خالص (Pn) و نرخ تعرق (Tr)

در شرایط بدون تنش (FC-90٪)، با افزایش درصد خردل وحشی در ترکیب تداخل، میزان فتوستتوز خالص (Pn) و نرخ تعرق (Tr) افزایش یافت. در تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی، مقدار Pn نسبت به شاهد ۹/۸ درصد افزایش نشان داد. این مقدار در تیمارهای ۵۰/۵۰ و ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی به‌ترتیب ۱۴/۳ و ۳۲/۵ درصد بیشتر از تیمار ۰/۱۰۰ بود.



شکل ۲. مقایسه میانگین برهمکنش تأثیر تنش خشکی و نسبت تداخل بر میزان فتوسنتز خالص گیاه نخود. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

Figure 2. Mean comparisons of the interaction effect of drought stress and interference ratios on net photosynthesis rate in chickpea plants. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level.



شکل ۳. مقایسه میانگین برهمکنش تأثیر تنش خشکی و نسبت تداخل بر نرخ تعرق گیاه نخود. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

Figure 3. Mean comparisons of the interaction effect of drought stress and interference ratios on transpiration rate in chickpea plants. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level.

این است که کاهش محتوی نسبی آب تحت تنش خشکی نشان‌دهنده کاهش ظرفیت نگهداری آب در برگ‌ها و افزایش فشار اسمزی است که منجر به

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی و تداخل خردل وحشی تأثیرات معنی‌داری بر پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه نخود داشتند. اعتقاد بر

غذایی باعث کاهش فعالیت روزنه‌ای در گیاهان تحت تأثیر تداخل شده است.

کاهش غلظت CO₂ زیر روزنه‌ای (Ci) در پاسخ به تنش خشکی نشان می‌دهد که محدودیت در هدایت روزنه‌ای باعث کاهش ورود CO₂ به مزوفیل برگ و در نتیجه کاهش فتوسنتز شده است. این یافته‌ها با مطالعات قبلی که نشان داده‌اند محدودیت CO₂ زیر روزنه‌ای یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده فتوسنتز در شرایط تنش خشکی است، همخوانی دارد (Jaume et al., 2009). با این حال، در تیمارهای تداخل خردل وحشی، مقدار Ci در مقایسه با نخود خالص بالاتر بود که ممکن است ناشی از افزایش نرخ تعرق و بهبود نسبی تعادل گازی در برگ باشد. افزایش میزان فتوسنتز خالص در سطوح بالاتر تداخل خردل وحشی در شرایط بدون تنش و تنش متوسط نشان داد که حضور خردل-وحشی در شرایط خاصی می‌تواند تأثیرات مثبتی بر نرخ فتوسنتز داشته باشد. احتمالاً، در تیمارهای با تراکم بالای خردل وحشی، میکروکلیمای مطلوب‌تری برای نخود ایجاد شده است که منجر به افزایش جذب نور و بهبود فرایند فتوسنتز شده است. اما در شرایط خشکی شدید، این تأثیر مثبت کاهش یافت و میزان فتوسنتز در تمامی تیمارها کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر محدودکننده تنش شدید بر متابولیسم گیاه است. از سوی دیگر، افزایش نرخ تعرق در تیمارهای دارای تداخل خردل وحشی نشان می‌دهد که گیاهان در شرایط حضور خردل وحشی، احتمالاً به دلیل رقابت برای منابع، نرخ تبادل گازی و خنک‌کنندگی خود را افزایش داده‌اند. در شرایط

کاهش پتانسیل فشار سلولی و در نهایت افت رشد و فتوسنتز می‌شود (Yang et al., 2021). نتایج مشابهی توسط ساغوری الادریسی و همکاران (Saghouri el Idrissi et al., 2023) گزارش شده است که کاهش RWC را به تغییرات در تنظیم هدایت روزنه‌ها تحت تنش خشکی نسبت داده‌اند. تأثیر معنی‌دار تنش خشکی بر میزان کلروفیل نشان داد که کم‌آبی منجر به کاهش سنتز کلروفیل و افزایش تجزیه آن در برگ‌های نخود شده است. کاهش کلروفیل تحت تنش خشکی به‌عنوان یک مکانیسم دفاعی برای کاهش فعالیت فتوسنتزی و جلوگیری از آسیب اکسیداتیو شناخته شده است (Sherin et al., 2022). از سوی دیگر، تداخل خردل وحشی نیز بر میزان کلروفیل تأثیر منفی داشت که احتمالاً ناشی از رقابت برای نور، مواد غذایی و افزایش سایه‌اندازی بوده است. نتایج مشابهی توسط اسمیت و همکاران (Smith and Burns, 2022) گزارش شده است که نشان دادند تنش خشکی و رقابت علف‌های هرز می‌توانند به‌طور هم‌زمان موجب کاهش میزان کلروفیل و محدودیت در فرایند فتوسنتزی شوند.

کاهش هدایت روزنه‌ای تحت تنش خشکی نشان‌دهنده بسته‌شدن روزنه‌ها به‌عنوان یک پاسخ فیزیولوژیکی برای کاهش تعرق و حفظ آب است. کاهش هدایت روزنه‌ای معمولاً منجر به کاهش میزان فتوسنتز و در نتیجه کاهش تولید زیست‌توده و عملکرد می‌شود (Asargew et al., 2024). از سوی دیگر، تداخل خردل وحشی نیز تأثیر منفی بر Gs داشت که نشان می‌دهد رقابت برای منابع آب و مواد

صفات رشدی خردل وحشی

تأثیر تنش خشکی، نسبت تداخل خردل وحشی با نخود و تأثیرات متقابل تنش خشکی و نسبت تداخل بر ارتفاع بوته، وزن خشک اندام‌های هوایی و وزن خشک ریشه معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود (جدول ۶).

بدون تنش و تنش متوسط، این افزایش تعلق می‌تواند به کاهش دمای برگ و بهبود فعالیت فتوسنتزی کمک کند (Zhao et al., 2020). اما در شرایط تنش شدید، اگرچه تعلق همچنان در سطوح بالای تداخل بیشتر از تیمار شاهد بود، اما میزان مطلق آن کاهش یافت که نشان‌دهنده محدودیت شدید آب و کاهش فعالیت متابولیکی گیاه است.

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس تأثیر نسبت‌های مختلف تداخل و سطوح مختلف تنش خشکی بر صفات رشدی خردل وحشی.

Table 6. Results of the analysis of variance for the effects of different interference ratios and drought stress levels on wild mustard growth traits.

Source of Variation (SOV)	DF	Mean squares		
		Plant height	Shoot dry weight	Root dry weight
Drought stress (A)	2	18741**	76.2**	0.839**
Interference ratio (B)	4	941**	3.21**	0.035**
A × B	8	149**	0.956**	0.011**
Error	30	5.22	0.022	0.0002
C.V. (%)		2.97	3.26	2.12

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

خشکی شدید (50-FC/%)، میزان کاهش ارتفاع بسیار چشمگیر بود، به طوری که در تیمار کشت خالص خردل وحشی ۱۰۰/۰ ارتفاع بوته تنها ۲۹ سانتی‌متر بود که کاهش ۷۰ درصدی نسبت به شاهد را نشان داد. در تیمار ۲۵/۷۵ (نخود/خردل وحشی)، مقدار ارتفاع نسبت به تیمار شاهد در شرایط بدون تنش ۶۱ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر محدودکننده خشکی شدید بر رشد طولی گیاه است (جدول ۷). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تنش خشکی و تداخل با نخود تأثیرات قابل توجهی بر رشد و تولید زیست‌توده علف‌هرز خردل وحشی داشت. کاهش ارتفاع بوته خردل وحشی در شرایط تنش خشکی نشان‌دهنده محدودیت‌های

نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی، ارتفاع بوته خردل وحشی به طور قابل توجهی کاهش یافت. در شرایط بدون تنش (90-FC/%) افزایش نسبت نخود در تداخل مخلوط با خردل وحشی باعث افزایش ارتفاع گیاه خردل وحشی شد؛ به طوری که در تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی ارتفاع بوته نسبت به تیمار خردل وحشی ۱۰۰/۰ نخود/خردل وحشی به میزان ۲۱ درصد بیشتر بود. در سطح تنش متوسط (75-FC/%) ارتفاع بوته به طور کلی کاهش داشت. در این شرایط، تیمار ۱۰۰/۰ نخود/خردل وحشی نسبت به تیمار شاهد (90-FC/%) خردل وحشی ۱۰۰ درصد) ۳۷/۳ درصد افزایش ارتفاع نشان داد. در تنش

بدون تنش و تنش متوسط، افزایش درصد نخود در ترکیب تداخل به افزایش ارتفاع خردل وحشی منجر شد که ممکن است ناشی از رقابت برای نور و تاثیرات احتمالی تغییر در شرایط میکروکلیمای محیط باشد. با این حال، در تنش شدید، کاهش شدید ارتفاع نشان‌دهنده تاثیرات مخرب کمبود آب بر فرآیندهای رشدی خردل وحشی بود.

فیزیولوژیکی ناشی از کمبود آب است که منجر به کاهش تقسیم و کشیدگی سلولی می‌شود. این نتایج با یافته‌های مطالعه‌ای که گزارش کرده است تنش خشکی باعث کاهش رشد طولی گیاهان علفی به دلیل کاهش جذب آب و اختلال در متابولیسم هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد مانند جیبرلین می‌شود (Kalra et al., 2024)، همخوانی دارد. در شرایط

جدول ۷. مقایسات میانگین برهمکنش تاثیر سطوح مختلف تنش خشکی و نسبت مختلف تداخل بر خصوصیات رشدی خردل وحشی.

Table 7. Mean comparisons of the interaction effects between different levels of drought stress and various interference ratios on wild mustard growth traits.

Drought stress (% FC)	Planting ratio	Plant height (cm)	Shoot dry weight (g)	Root dry weight (g)
90%	100/0	99.0 ^c	6.03 ^c	0.891 ^c
	75/25	109 ^b	6.60 ^b	0.950 ^b
	50/50	117 ^a	7.07 ^a	0.999 ^a
	25/75	120 ^a	7.28 ^a	1.02 ^a
75%	100/0	62.0 ^e	3.69 ^e	0.645 ^e
	75/25	85.0 ^d	4.63 ^d	0.744 ^d
	50/50	97.7 ^c	6.05 ^c	0.893 ^c
	25/75	100 ^c	6.13 ^c	0.902 ^c
50%	100/0	29.0 ^h	1.72 ^f	0.439 ^f
	75/25	33.0 ^g	1.79 ^f	0.446 ^f
	50/50	34.0 ^g	1.80 ^f	0.446 ^f
	25/75	39.0 ^f	1.90 ^f	0.458 ^f

در هر ستون، میانگین‌های با حرف یکسان بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each column, the means with the same letter are not significantly different according to the LSD test.

درصد/عدم تنش) داشت. در تنش خشکی شدید (FC-50) کاهش وزن خشک به شدت محسوس بود و تیمار خردل وحشی ۱۰۰ درصد تنها ۱/۷۲ گرم وزن خشک داشت که نسبت به همان تیمار در شرایط ۹۰ درصد ظرفیت زراعی، ۷۱/۵ درصد کاهش نشان داد (جدول ۷). وزن خشک اندام‌های هوایی خردل وحشی نیز به شدت تحت تاثیر تنش خشکی قرار گرفت، به طوری که در بالاترین سطح خشکی، کاهش چشمگیری در وزن خشک مشاهده شد. کاهش وزن خشک می‌تواند نتیجه کاهش فتوسنتز، اختلال در تقسیم سلولی و کاهش تولید

وزن خشک اندام‌های هوایی خردل وحشی نیز به شدت تحت تاثیر تنش خشکی و نسبت تداخل قرار گرفت. در شرایط بدون تنش (FC-90) افزایش نسبت نخود باعث بهبود وزن خشک شد، به طوری - که تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی نسبت به تیمار کشت خالص خردل وحشی، ۲۰/۷ درصد وزن خشک بیشتری داشت. در سطح تنش متوسط (FC-75) وزن خشک خردل وحشی کاهش یافت، اما با افزایش نسبت تداخل نخود در تیمار ۲۵/۷۵ (نخود/خردل وحشی) همچنان ۱/۷ درصد وزن بیشتری نسبت به تیمار شاهد (خردل وحشی ۱۰۰

کاهش جذب آب و مواد مغذی و همچنین کاهش فعالیت متابولیکی سلول‌های ریشه باشد. در شرایط بدون تنش و تنش متوسط، افزایش درصد نخود در تداخل باعث افزایش وزن خشک ریشه خردل- وحشی شد که احتمالاً ناشی از تغییر در ساختار ریشه‌ای و کاهش رقابت مستقیم برای منابع خاکی بود. در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است که در برخی از سیستم‌های کشت مخلوط، بهبود در شرایط رشد می‌تواند به افزایش تولید ریشه کمک کند و در نتیجه بهره‌وری سیستم را افزایش دهد (Long *et al.*, 2021).

با این حال، در شرایط تنش شدید، کاهش شدید وزن خشک ریشه نشان‌دهنده محدودیت‌های شدید رشد و متابولیسم در گیاه بود که در نهایت می‌تواند منجر به کاهش توان رقابتی خردل وحشی در برابر نخود شود.

صفات فیزیولوژیک خردل وحشی

تأثیر تنش خشکی بر تمام صفات مورد بررسی در خردل وحشی از جمله محتوای نسبی آب، شاخص سبزی‌نگی برگ، فتوسنتز خالص، تعرق، هدایت روزنه‌ای و غلظت CO_2 زیر روزنه معنی‌دار شد ($p \leq 0.01$). تأثیر نسبت تداخل نیز بر شاخص سبزی‌نگی برگ، فتوسنتز خالص، تعرق و هدایت روزنه‌ای معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود. تأثیر متقابل تنش خشکی و نسبت تداخل برای اکثر صفات از جمله محتوای نسبی آب، شاخص سبزی‌نگی برگ و غلظت CO_2 زیر روزنه معنی‌دار نبود، اما بر تعرق ($p \leq 0.01$)

مواد فتوسنتزی باشد (Kang *et al.*, 2023). افزایش درصد نخود در ترکیب تداخل باعث افزایش وزن خشک خردل وحشی در شرایط بدون تنش و تنش متوسط شد که ممکن است به دلیل تغییر در رقابت برای منابع و تأثیرات متقابل مثبت بین گیاهان باشد. در پژوهش‌های مشابه نیز گزارش شده است که گیاهان زراعی در الگوهای کشت مخلوط می‌توانند از طریق تغییر در ساختار ریشه‌ای و سازگاری‌های مورفولوژیکی تأثیرات رقابتی را کاهش دهند (Rastgoo *et al.*, 2014). وزن خشک ریشه خردل وحشی در شرایط تنش و نسبت تداخل تغییرات معنی‌داری نشان داد. در شرایط FC-90/افزایش نسبت تداخل نخود باعث افزایش وزن ریشه شد؛ به طوری که تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی نسبت به تیمار کشت خالص خردل وحشی، به میزان ۱۴/۵ درصد افزایش وزن ریشه داشت. در تنش متوسط (FC-75/)، کاهش وزن ریشه نسبت به FC-90% مشاهده شد، اما همچنان در تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی مقدار وزن ریشه ۳۹/۸ درصد بیشتر از تیمار کشت خالص خردل وحشی بود. در تنش خشکی شدید (FC-50/)، وزن خشک ریشه کاهش چشمگیری داشت، به طوری که در تیمار کشت خالص خردل- وحشی مقدار آن تنها ۰/۴۳۹ گرم بود که نسبت به شرایط بدون تنش ۵۰/۷ درصد کاهش نشان داد (جدول ۷). کاهش وزن خشک ریشه تحت تنش خشکی نشان داد که کمبود آب نه تنها بر رشد اندام‌های هوایی، بلکه بر رشد سیستم ریشه‌ای نیز تأثیر منفی دارد. این کاهش ممکن است به دلیل

و هدایت روزنه‌ای ($p \leq 0.05$) تأثیر معنی‌داری داشت
(جدول ۸).

جدول ۸. نتایج تجزیه واریانس تأثیر نسبت‌های مختلف تداخل و سطوح مختلف تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیک خردل وحشی.

Table 8. Results of the analysis of variance for the effects of different interference ratios and drought stress levels on wild mustard physiological traits.

Sources of variation	DF	Mean squares					
		RWC	SPAD	Net Photosynthesis	Transpiration Rate	Stomatal Conductance	Intercellular CO ₂ Concentration
Drought stress (A)	2	1413**	276**	5.45**	0.386**	0.0810**	2206**
Interference ratio (B)	4	117**	11.3*	0.05*	0.032**	0.0020**	186*
A × B	8	8.67 ^{ns}	3.30 ^{ns}	0.016 ^{ns}	0.017**	0.0007*	19.8 ^{ns}
Total error	30	11.7	3.58	0.019	0.003	0.0002	59.7
CV (%)	-	4.68	7.15	6.95	9.48	7.52	1.93

^{ns}, * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

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

محتوی نسبی آب برگ (RWC) و شاخص سبزی‌نگی

(50-FC) به ۶۱/۶ درصد کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهنده کاهش توانایی گیاه در حفظ آب در شرایط کم‌آبی است. در سطوح تداخل، بیشترین مقدار محتوی نسبی آب برگ در تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی (۷۶/۹ درصد) و کمترین مقدار در تیمار کشت خالص خردل وحشی (۶۸/۲ درصد) مشاهده شد (جدول ۹).

نتایج نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی و معنی‌داری بر میزان محتوی نسبی آب برگ دارد. در شرایط رطوبتی مطلوب (90-FC) مقدار ۸۳/۲ درصد مشاهده شد، اما با کاهش دسترسی به آب، مقدار این صفت در سطوح تنش متوسط (75-FC) به ۷۴/۳ درصد و در شدیدترین سطح تنش

جدول ۹. مقایسات میانگین تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و نسبت‌های مختلف تداخل بر صفات فیزیولوژیک گیاه خردل وحشی.

Table 9. Mean comparisons of the effects of different drought stress levels and interference ratios on wild mustard physiological traits.

	RWC (%)	SPAD	Net Photosynthesis ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Intercellular CO ₂ Concentration ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Drought stress				
90	83.2 ^a	31.2 ^a	2.75 ^a	411 ^a
75	74.3 ^b	26.7 ^b	1.70 ^b	404 ^b
50	61.6 ^c	21.6 ^c	1.49 ^c	385 ^c
Interference ratio				
100/0	68.2 ^c	25.1 ^b	1.91 ^b	393 ^b
75/25	72.6 ^b	26.0 ^{ab}	1.93 ^b	401 ^{ab}
50/50	74.6 ^{ab}	26.9 ^a	2.01 ^{ab}	402 ^a
25/75	76.9 ^a	27.8 ^a	2.07 ^a	404 ^a

در هر ستون، میانگین‌های با حرف یکسان بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

In each column, means with the same letter are not significantly different according to the LSD test.

داشت. در سطح تنش متوسط (FC-75٪) نرخ تعرق به‌طور کلی کاهش یافت، اما تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی همچنان بالاترین مقدار را نشان داد. در تنش خشکی شدید (FC-50٪)، کاهش نرخ تعرق در تمام تیمارها مشاهده شد، به‌طوری‌که در تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی مقدار تعرق ۱۰/۷ درصد بیشتر از تیمار ۰/۱۰۰ نخود/خردل وحشی بود (شکل ۴).

غلظت CO₂ زیر روزه‌ای (Ci) و هدایت روزه‌ای (Gs)

نتایج نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش غلظت CO₂ زیر روزه‌ای می‌شود. مقدار این صفت در شرایط بدون تنش ۴۱۱ میلی‌مول بر متر مربع بر ثانیه بود، اما با افزایش شدت تنش، مقدار آن به ۴۰۴ میلی‌مول بر متر مربع بر ثانیه در سطح متوسط و ۳۸۵ میلی‌مول بر متر مربع بر ثانیه در سطح شدید کاهش یافت. کاهش Ci در شرایط تنش خشکی بیانگر محدودیت در ورود CO₂ به برگ‌ها و کاهش کارایی فتوسنتزی است (شکل ۵).

در سطوح نسبت تداخل، بیشترین مقدار Ci در تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی (۴۰۴ میلی‌مول بر متر مربع بر ثانیه) و کمترین مقدار در تیمار ۱۰۰ درصد خردل وحشی (۳۹۳ میلی‌مول بر متر مربع بر ثانیه) مشاهده شد (جدول ۹). میزان هدایت روزه‌ای (Gs) نیز الگوی مشابهی با نرخ تعرق نشان داد. در شرایط بدون تنش (FC-90٪)، هدایت روزه‌ای در تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی در مقایسه با تیمار کشت خالص نخود به‌میزان ۵/۸ درصد افزایش یافت. در سطح تنش متوسط (FC-75٪)، هدایت

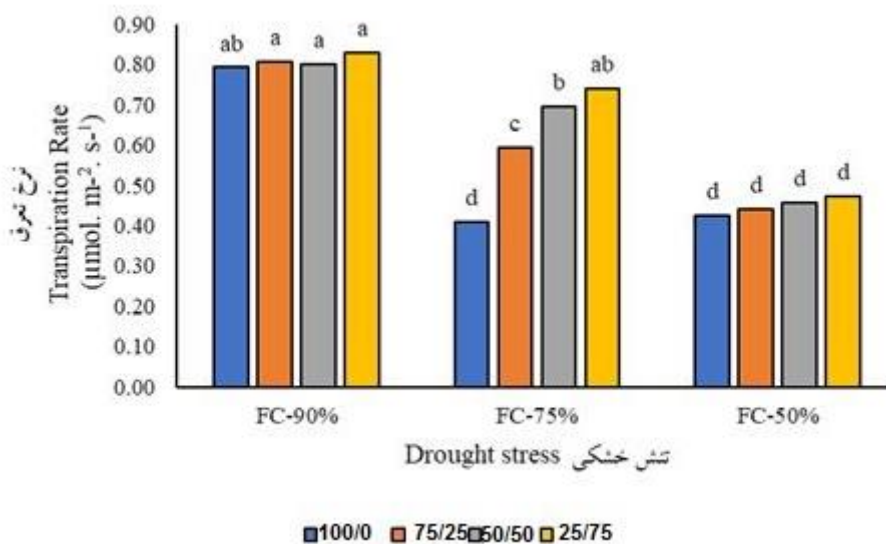
شاخص سبزی‌نگی برگ نیز تحت تأثیر تنش خشکی کاهش یافت. مقدار این صفت در شرایط بدون تنش ۳۱/۲ بود، اما در سطوح متوسط و شدید تنش، به‌ترتیب به ۲۶/۷ و ۲۱/۶ کاهش یافت. در سطوح تداخل، بیشترین مقدار شاخص سبزی‌نگی در تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی (۲۷/۸) و کمترین مقدار در تیمار کشت خالص خردل وحشی (۲۵/۱) مشاهده شد. با توجه به نتایج پیشین به نظر می‌رسد رقابت درون‌گونه‌ای خردل وحشی در تراکم کشت استفاده‌شده بیش از رقابت برون‌گونه‌ای آن با نخود در نسبت ۲۵/۷۵ آن بوده است (جدول ۹).

فتوسنتز خالص (Pn) و نرخ تعرق (Tr)

فتوسنتز خالص (Pn) نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی کاهش یافت. مقدار Pn در شرایط بدون تنش برابر با ۲/۷۵ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه بود، اما این مقدار در سطوح متوسط و شدید تنش به ۱/۷۰ و ۱/۴۹ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه کاهش یافت. در سطوح نسبت تداخل، بیشترین مقدار Pn در تیمار ۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی (۲/۰۷ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه) و کمترین مقدار در تیمار ۱۰۰ درصد خردل وحشی (۱/۹۱ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه) مشاهده شد (جدول ۹). نتایج نشان داد که نرخ تعرق (Tr) به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و نسبت تداخل قرار گرفت. در شرایط بدون تنش (FC-90٪) افزایش سهم خردل وحشی در ترکیب زراعی منجر به افزایش نرخ تعرق شد؛ به‌طوری‌که تیمار ۷۵/۲۵ نخود/خردل وحشی در مقایسه با تیمار نخود ۱۰۰ درصد حدود ۴/۷ درصد تعرق بیشتری

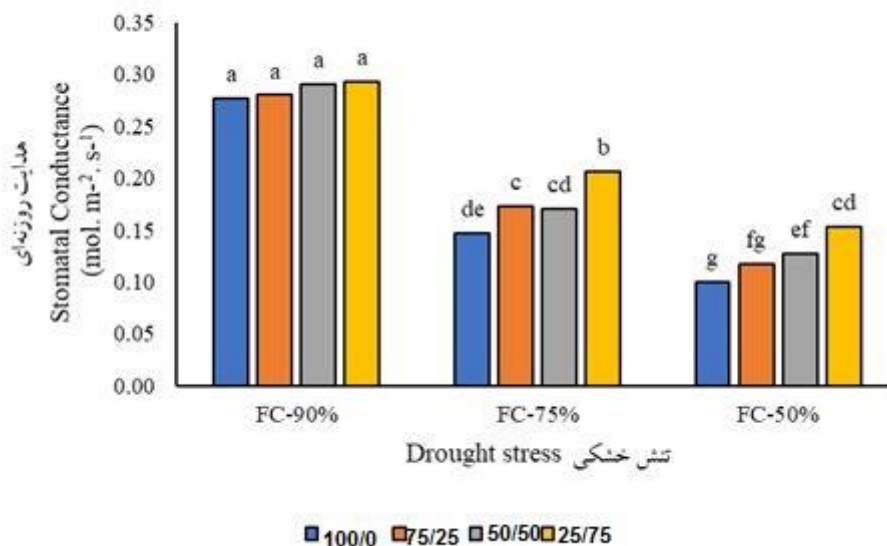
هدایت روزنه‌ای به شدت کاهش یافت، اما در تیمار نخود/خردل وحشی مقدار آن ۵۳ درصد بیشتر از تیمار نخود ۱۰۰ درصد بود (شکل ۵).

روزنه‌ای کاهش یافت، اما تیمار (۷۵/۲۵) نخود/خردل وحشی همچنان ۴۰/۸ درصد بیشتر از تیمار نخود ۱۰۰ درصد مقدار هدایت روزنه‌ای داشت. در شرایط تنش شدید (FC-50)، مقدار



شکل ۴. مقایسات میانگین برهمکنش تاثیر تنش خشکی و نسبت تداخل بر نرخ تعرق گیاه خردل وحشی. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند

Figure 4. Mean comparisons of the interaction effect of drought stress and interference ratio on transpiration rate in wild mustard plants. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level.



شکل ۵. مقایسه میانگین برهمکنش تاثیر تنش خشکی و نسبت تداخل بر میزان هدایت روزنه‌ای گیاه خردل وحشی. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

Figure 5. Mean comparisons of the interaction effect of drought stress and interference ratio on stomatal conductance in wild mustard plants. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level.

منجر به محدودیت در تثبیت کربن می‌شود (Qiao *et al.*, 2024). با این حال، نتایج نشان داد که در تیمارهای دارای نخود، مقدار Pn بالاتر از تیمار خردل وحشی ۱۰۰ درصد بود که ممکن است به دلیل بهبود شرایط میکروکلیمایی یا تاثیرات تسهیل‌کنندگی در سیستم کشت مخلوط باشد. کاهش غلظت CO₂ زیر روزنه‌ای تحت تنش خشکی، نشان‌دهنده محدودیت در ورود CO₂ به برگ‌ها است. این کاهش معمولاً ناشی از بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش دسترسی گیاه به CO₂ است که در نهایت منجر به کاهش نرخ فتوسنتز می‌شود (Ahluwalia *et al.*, 2021). تیمارهای دارای نخود توانستند مقدار Ci را در مقایسه با کشت خالص خردل وحشی تا حدی حفظ کنند که می‌تواند ناشی از تغییر در پویایی رقابت برای منابع باشد.

نرخ تعرق نیز تحت تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و تداخل زراعی کاهش یافت. کاهش Tr در شرایط تنش خشکی احتمالاً به دلیل بسته‌شدن روزنه‌ها برای جلوگیری از اتلاف آب بوده است (Yang *et al.*, 2021). با این حال، در شرایط بدون تنش و تنش متوسط، تیمارهای دارای نخود میزان تعرق بیشتری نسبت به کشت خالص خردل وحشی نشان دادند که می‌تواند ناشی از بهبود وضعیت آبی و افزایش فعالیت تعرقی در سیستم‌های کشت مخلوط باشد.

الگوی کاهش هدایت روزنه‌ای مشابه نرخ تعرق بود. بسته‌شدن روزنه‌ها تحت تنش خشکی یک پاسخ حفاظتی برای جلوگیری از خروج و از دست دادن آب است، اما این فرآیند منجر به کاهش

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیرات منفی و معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی علف‌هرز خردل وحشی دارد. کاهش محتوی نسبی آب برگ تحت تنش خشکی بیانگر کاهش توانایی گیاه در حفظ آب و تنظیم اسمزی است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین که کاهش RWC را به دلیل کاهش جذب آب و افزایش تعرق در شرایط کم‌آبی گزارش کرده‌اند (Sukpitak *et al.*, 2024)، همخوانی دارد. در این پژوهش، حضور نخود در تداخل باعث بهبود RWC در خردل وحشی شد که ممکن است به دلیل تغییر در شرایط میکروکلیمایی و بهبود دسترسی به آب در سیستم‌های کشت مخلوط باشد. از سوی دیگر، کاهش مقدار کلروفیل برگ در پاسخ به تنش خشکی نشان‌دهنده تخریب ساختارهای فتوسنتزی و کاهش سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی است (Hu *et al.*, 2023). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی، مقدار کلروفیل کاهش می‌یابد که این امر ممکن است ناشی از افزایش تجزیه کلروفیل و کاهش سنتز آن تحت استرس اکسیداتیو باشد. همچنین، حضور نخود در ترکیب زراعی تا حدودی موجب حفظ مقدار کلروفیل در خردل وحشی شد که می‌تواند به دلیل بهبود شرایط محیطی و کاهش شدت رقابت برای نور باشد.

تنش خشکی به‌طور معنی‌داری فتوسنتز خالص را کاهش داد. محققان بیان داشتند این کاهش می‌تواند به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش RWC، و اختلال در فعالیت آنزیم رویسکو باشد که

در هر دو گیاه مشهود بود. در شرایط تنش شدید، رشد خردل وحشی به شدت محدود شد؛ به طوری که وزن خشک اندام‌های هوایی آن نسبت به شرایط بدون تنش کاهش چشمگیری داشت. از سوی دیگر، اگرچه نخود نیز تحت تأثیر خشکی قرار گرفت، اما توانایی بیشتری در حفظ رطوبت و انجام فعالیت‌های فیزیولوژیکی از خود نشان داد، به ویژه در ترکیب‌هایی که نسبت نخود بیشتر بود (۲۵/۷۵ نخود/خردل وحشی). با توجه به این یافته‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که تنش خشکی می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات تداخل علف‌هرز خردل وحشی با گیاه زراعی نخود داشته باشد. در شرایط خشکی شدید، توان رقابتی خردل وحشی به شدت کاهش یافت که این امر موجب کاهش فشار رقابتی آن بر نخود شد. به عبارت دیگر، خشکی شدید می‌تواند موجب کاهش قدرت رشد علف‌هرز شده و در نهایت باعث کاهش تأثیرات منفی آن بر عملکرد نخود شود. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی خشک، مدیریت صحیح آب و استفاده از استراتژی‌هایی نظیر کشت مخلوط می‌تواند در کنترل علف‌های هرز و کاهش رقابت آنها با گیاهان زراعی مؤثر باشد.

جذب CO_2 و کاهش فتوسنتز می‌شود (Ahluwalia et al., 2021). در این پژوهش، تیمارهای دارای نخود به ویژه در شرایط تنش متوسط و شدید، مقدار GS بیشتری نسبت به تیمار کشت خالص خردل وحشی نشان دادند که احتمالاً به دلیل تأثیرات مثبت متقابل گیاهان و تغییر در رقابت برای منابع بوده است.

نتیجه گیری نهایی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی و معنی‌داری بر رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی هر دو گیاه نخود و علف‌هرز خردل-وحشی دارد. با افزایش شدت تنش، کاهش قابل-توجهی در ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، محتوی نسبی آب برگ، میزان کلروفیل، فتوسنتز خالص، نرخ تعرق و هدایت روزنه‌ای مشاهده شد. با این حال، تأثیرات تنش در گیاه نخود و خردل وحشی به طور متفاوتی بروز پیدا کرد. در شرایط بدون تنش، افزایش سهم نخود در ترکیب زراعی باعث بهبود رشد و عملکرد آن شد و در عین حال موجب کاهش رشد خردل وحشی شد. اما با افزایش شدت تنش، میزان کاهش رشد و عملکرد

منابع

- Ahluwalia, O. Singh, P.C. and Bhatia, R. 2021. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resour. Environ. Sustain.* 5:100032. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>.
- Ahmadi, A. Bazgir, E. and Mousavi, S.K. 2008. Sowing date and crop density effects on weed interference in chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Lorestan province. *Proceeding of the 2nd National Weed Sci. Congress.* 29-30 Jan. Mashhad.
- Anonymous, 2024. Agricultural statistics for the crop year 2022-2023. Statistics and Information Technology Office, Ministry of Agricultural Jihad, Deputy for Planning and Economy. <https://www.ajkhz.ir/moa-barnameh-rizi/index-e.html>. Accessed: November 22, 2024.

- Asargew, M.F. Masutomi, Y. Kobayashi, K. and Aono, M. 2024. Water stress changes the relationship between photosynthesis and stomatal conductance. *Sci. Total Environ.* 907: 167886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167886>.
- Babaei Zarch, M.J. Jami Al-Ahmadi, M. Zamani, G. and Golestanifar, F. 2015. Competition between *Lathyrus sativus* (L.) and *Amaranthus retroflexus* (L.) under water stress conditions. *Environ. Stress. Agri. Sci.* 8(2): 179-189. DOI: 10.22077/escs.2016.214.
- Fallahi, A. Ahmadvand, G. Mondani, F. and Aliverdi, A. 2021. Response of yield and yield compounds of rain-fed chickpea cultivars (*Cicer arietinum* L.) to plant density and weed interference. *Iran. J. Pulses Res.* 12(1): 41-57. DOI: 10.22067/ijpr.v12i1.74983.
- Gandomi, M. 2015. Competition between wheat and wild oats under irrigation deficit conditions. Master's thesis. Faculty of Agriculture. University of Birjand.
- Ghorai, A.K. and Ghorai, A.K. 2023. Weed smothering in mustard (*Brassica* spp.) by its high-density uniform broadcast sowing. *Inter. J. Environ. Clim. Change.* 13(2): 75–82. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i21656>.
- Gul, Z. Tang, Z.H. Arif, M. and Ye, Z. 2022. An insight into abiotic stress and influx tolerance mechanisms in plants to cope in saline environments. *Biol.* 11(4): 597. <https://doi.org/10.3390/biology11040597>.
- Hu, F., Zhang, Y. and Guo, J. 2023. Effects of drought stress on photosynthetic physiological characteristics, leaf microstructure, and related gene expression of yellow horn. *Plant Signal. Behav.* 18(1): 2215025. DOI: 10.1080/15592324.2023.2215025.
- Izadi Darbandi, E. 2012. Evolution of drought stress and nitrogen rate on redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) and corn (*Zea mays*) competition. *Appl. Agric. Res.* 25(1): 69-74.
- Izadi Darbandi, E. and Rashed Mohassel, M.H. 2009. Investigation of drought stress and nitrogen application rate on corn-redroot pigweed competition using replacement series experiments. *Iran. J. Weed Sci.* 4(2): 59-67.
- Jaume, F. Matilde, B. Josefina, B. Jean-Marc, D. Alexander, G. Jeroni, G. Miguel, J. Alicia, P. Miquel, R.C. Carlota, S. Magdalena, T. and Hipólito, M. 2009. Photosynthesis limitations during water stress acclimation and recovery in the drought-adapted *Vitis* hybrid Richter-110 (*V. berlandierix* V. *rupestris*). *J. Exp. Bot.* 60(8): 2361–2377. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp069>.
- Jing, P., Wang, D. Zhu, C. and Chen, J. 2016. Plant physiological, morphological and yield-related responses to night temperature changes across different species and plant functional types. *Front. Plant Sci.* 7: 1774. DOI: 10.3389/fpls.2016.01774.
- Junaid, M.D. Naeem, S. Aziz, A.u.R. and Javed, M.A. 2025. Drought stress responses in plants and biotechnological interventions for its mitigation. 1th edn. Champaign, Springer Nature Switzerland. Pages 91-126. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80610-0_3.
- Kalra, A. Goel, S. and Elias, A.A. 2024. Understanding role of roots in plant response to drought: Way forward to climate-resilient crops. *Plant Genome.* 17(1): e20395. DOI: 10.1002/tpg2.20395.
- Kang, J. Chu, Y. Ma, G. Zhang, Y. Zhang, X. Wang, M. Lu, H. and Wang, C. 2023. Physiological mechanisms underlying reduced photosynthesis in wheat leaves grown in the field under conditions of nitrogen and water deficiency. *Crop J.* 11(2): 638-650. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.06.010>.
- Khatun, M. Sarkar, S. Era, F.M. Islam, A.M. Anwar, M.P. Fahad, S. ,... , & Islam, A.A. 2021. Drought stress in grain legumes: Effects, tolerance mechanisms and management. *Agron.* 11(12): 2374.
- Kiamarsi, Z. and Kazemzaini, S.A. 2014. Effects of water deficit and redroot pigweed interference period at different growth stages on sunflower yield and oil percentage. *Iran. Weed Sci.* 10(1): 33-46.
- Long, L. Yixiang, L. and Xiao-Fei, L. 2021. Intercropping to maximize root–root interactions in agricultural plants: Agronomic aspects. The root systems in sustainable agricultural intensification. 309-328. DOI: 10.1002/9781119525417.ch12.
- MacLaren, C. Storkey, J. Menegat, A. Metcalfe, H. and Dehnen-Schmutz, K. 2020. An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 40(4): 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00631-6>.
- Mahmoudi, G. Ghanbari, A. Ghorbani, R. and Ghavidel, Z. 2016. Evaluating of irrigation levels on multiple species of competition and growth indices of species in field corn (*Zea mays* L.) some. *J. Iran. Plant Prot. Res.* 30(1): 63-74. DOI: 10.22067/jpp.v30i1.29285.
- Majer, P. Sass, L. Lelley, T. Cseuz, L. Vass, I. Dudits, D. and Pauk, D. 2008. Testing drought tolerance of wheat by a complex stress diagnostic system installed in greenhouse. *Acta Biol. Szeged.* 52(1): 97-100.

- Modhej, A. 2021. Evaluation of the aerial and underground organs of wild mustard (*Sinapis arvensis*) competition on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. J. Iran. Plant Prot. Res. 35(3): 389-398. DOI: 10.22067/jpp.2021.69400.1019.
- Moreira, B. Gonçalves, A. Pinto, L. Prieto, M.A. Caroch, M. Caleja, C. and Barros, L. 2024. Intercropping systems: An opportunity for environment conservation within nut production. Agric. 14(7): 1149. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071149>.
- Naderi, R. Kazemini, A. and Noroozi, M. 2015. Water stress and plant within row spacing effects on safflower yield in competition with wild oat. J. Bio. Environ. Sci. 9(26): 71-80.
- Nazeri Tahrudi, M. Khalili, K. and Ahmadi, F. 2016. Spatial and regional analysis of precipitation trend over Iran in the last half of century. Water and Soil, 30(2): 643-654. DOI: 10.22067/jsw. v30i2.39130.
- Nyaupane, S. Poudel, M.R. Panthi, B. Dhakal, A. Paudel, H., and Bhandari, R. 2024. Drought stress effect, tolerance, and management in wheat: A review. Cogent. Food Agric. 10(1): 2296094. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2296094>.
- Pang, J. Turner, N.C. Khan, T. Du, Y.L. Xiong, J.L. Colmer, T.D. Devilla, R. Stefanova, K. & Siddique, K.H.M. 2017. Response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to terminal drought: Leaf stomatal conductance, pod abscisic acid concentration, and seed set. J. Exp. Bot. 68(8), 1973–1985. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw153>.
- Pouresmael, M. Kanouni, H. Seifi, F. Kordenaeej, A. Sorkhi, B. and Bokaei, A.S. 2022. Tolerance diversity in Kabuli chickpea local germplasm under terminal drought. Environ. Stress Crop Sci. 15(3): 565-579. DOI: 10.22077/escs.2020.3873.1930.
- Qiao, M. Hong, C. Jiao, Y. Hou, S. and Gao, H. 2024. Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. Plants. 13(13): 1808. <https://doi.org/10.3390/plants13131808>.
- Rastgoo, S. Ayneband, A. and Fateh, E. 2014. Evaluation the competitiveness of sesame and mung bean crops in both monocropping and intercropping systems. J. Agro. 7(3): 356-367. DOI: 10.22067/jag. v7i3.31213.
- Saghouri el idrissi, I. Kettani, R. Ferrahi, M. Nabloussi, A. Ziri, R. and Brhadda, N. 2023. Water stress effect on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) advanced lines at flowering stage under controlled conditions. J. Agri. Food Res. 14: 100696. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100696>.
- Saha, D. Choyal, P. Mishra, U.N. Dey, P. Bose, B. MD, P. Gupta, N.K. and Singhal, R.K. 2022. Drought stress responses and inducing tolerance by seed priming approach in plants. Plant Stress. 4: 100066. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100066>.
- Sarang, D. Irmak, S. Lindquist, J.L. Knezevic, S.Z. and Jhala, A.J. 2016. Effect of water stress on the growth and fecundity of common waterhemp (*Amaranthus rudis*). Weed Sci. 64(1): 42-52.
- Sherin, G. Aswathi, K.P.R. and Puthur, J.T. 2022. Photosynthetic functions in plants subjected to stresses are positively influenced by priming. Plant Stress. 4: 100079. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100079>.
- Singh, M. Kukal, M.S. Irmak, S. and Jhala, A.J. 2022. Water use characteristics of weeds: A global review, best practices, and future directions. Front. Plant Sci. 12:794090. DOI: 10.3389/fpls.2021.794090.
- Smart, R.E. and Bingham, G.E. 1974. Rapid estimates of relative water content. Plant Phys. 53(2): 258-260.
- Smith, A.M. and Burns, E.E. 2022. Impacts of drought intensity and weed competition on drought-tolerant corn performance. Weed Sci. 70(4): 455-462. DOI:10.1017/wsc.2022.34.
- Suarez-Vidal, E. Sampedro, L. and Zas, R. 2017. Is the benefit of larger seed provisioning on seedling performance greater under abiotic stress? Environ. Exp. Bot. 134: 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.11.001>.
- Sukpitak, C. Seraypheap, K. Muñoz, P. and Munné-Bosch, S. 2024. Influence of water deficit on the longevity of ethylene-sensitive and ethylene-insensitive flowers. Environ. Exp. Bot. 219: 105647. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105647>.
- Ullah, S., Trethowan, R., Bramley, H. 2021. The physiological basis of improved heat tolerance in selected emmer-derived hexaploid wheat genotypes. Frontiers in Plant Science, 12: 739246.
- Veisi, M. Zand, E. Minbashi Moeini, M. and Bassiri, K. 2020. Review of research on weed management of chickpea in Iran: Challenges, strategies and perspectives. J. Plant Pro. Res. 60(2): 113-125. <https://doi.org/10.24425/jppr.2020.132212>.
- Wallace, T.C. Murray, R. and Zelman, K.M. 2016. The nutritional value and health benefits of chickpeas and hummus. Nutr. 8(12): 766. DOI: 10.3390/nu8120766.
- Wang, Z. Li, G. Sun, H. Ma, L. Guo, Y. Zhao, Z. Gao, H. and Mei, L. 2018. Effects of drought stress on photosynthesis and photosynthetic electron transport chain in young apple tree leaves. Bio. Open. 7(11): bio035279. DOI: 10.1242/bio.035279.

- Yang, X. Lu, M. Wang, Y. Wang, Y. Liu, Z. and Chen, S. 2021. Response mechanism of plants to drought stress. Horticult. 7(3): 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>.
- Zhao, W. Liu, L. Shen, Q. Yang, J. Han, X. Tian, F. and Wu, J. 2020. Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. Water, 12(8): 2127. <https://doi.org/10.3390/w12082127>.