

Research Article

Vol. 39, No. 2, Summer 2025, p. 315-329

Evaluation of Drought Tolerance in Some Almond Commercial Cultivars (*Prunus dulcis* Mill.) on GN Vegetative Rootstock

S.A. Mousavi^{1*}, M. Tatari²

1- Horticulture Crops Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension organization (AREEO), Shahrekord, Iran

2- Horticulture Crops Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension organization (AREEO), Isfahan, Iran

(* - Corresponding author's Email: sa.mousavi@areeo.ac.ir)

Received: 26 August 2024

Revised: 31 October 2024

Accepted: 11 November 2024

Available Online: 11 November 2024

How to cite this article:

Mousavi, S.A., & Tatari, M. (2025). Evaluation of drought tolerance in some almond commercial cultivars (*Prunus dulcis* Mill.) on GN vegetative rootstock. *Journal of Horticultural Science*, 39(2), 315-329. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89582.1375>

Introduction

Peach×almond (GN) hybrid rootstocks have favorable characteristics such as ease of rooting, favorable growth vigour, resistance to nematodes, calcareous and dry soil (Babadai et al., 2018). Currently, water deficiency caused by reduced rainfall is a major concern and a critical limitation for agricultural production (Hass et al., 2021). Under drought stress, plant cell membranes become more susceptible to electrolyte leakage. Membrane leakage is caused by uncontrolled free radicals and leads to lipid peroxidation (Cheng et al., 2018). Since tolerance to drought stress is the result of the interaction of morphological and physiological traits of plant, therefore, a combination of different traits that have a direct relationship with drought tolerance can be used as selection criteria to screen the ideal cultivar (Karimi et al., 2015).

Materials and Methods

This research carried out during the years 2020 and 2021 at the Chahartakhteh station affiliated to the Center for Research and Education of Agriculture and Natural Resources in Chaharmahal and Bakhtiari Province. The almond seedlings included Shahroud 6, 7, 8, 10, 12, 13 and 21, that all of them grafted on the GN rootstock, along with GN rootstock, subjected to different drought stress treatments in June for four months. Drought stress treatments included 70% of field capacity (control or no drought stress), 50% field capacity (mild stress), 30% field capacity (moderate stress) and 10% field capacity (severe stress). A counter determined the amount of irrigation in each treatment, and a Time-Domain Reflectometry (TDR) used to measure the soil moisture. Before the experiment, the physicochemical properties of the soil measured. The measured morphological traits included leaf area, percentage of leaf abscission, and shoot fresh and dry weight. These traits measured four months after subjecting to water stress. The evaluated physiological traits included electrolyte leakage (EL), relative leaf water content (RWC), leaf chlorophyll, proline and malondialdehyde (MDA). These traits also measured four months after subjecting to water stress. The experiment conducted in split plots based on a randomized complete block design in three replications and four seedlings in each experimental unit. The main plot included water drought treatments and the sub plot included almond cultivars. Data analysis carried out using SAS software version 9.2 and comparison of mean data conducted based on LSD test at a five percent probability level.



©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/).

<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89582.1375>

Results and Discussion

As the intensity of drought stress increased, the fresh and dry weight of shoot decreased in almond cultivars and GN rootstock. At soil humidity of 10% field capacity, Shahroud 8 showed higher amounts of shoot fresh weight (785 g). The lowest fresh and dry weight of the shoot and the highest leaf abscission were observed under severe drought stress (10% of the field capacity) in Shahroud 13. The increase in drought levels led to a decrease in the leaf area in the studied cultivars and rootstock of almond. Shahroud 8 had more chlorophyll content than other cultivars at the most severe stress level, and Shahroud 13 showed the lowest chlorophyll b content at 10% humidity of field capacity. A significant decrease in leaf chlorophyll concentration under drought stress has also been reported in previous research ([Schlemmer et al., 2005](#); [Gohari et al., 2023](#)). A further decrease in chlorophyll could be due to a drastic decrease in RWC under severe stress conditions. According to [Ranjbar et al. \(2022\)](#), the amount of RWC decreased by 32 to 44% under stress conditions in the K13-40 grafted cultivar on the rootstock of bitter almond No. 32. In the current research, the biggest decrease in RWC was in Shahroud 13 with a decrease of 36.85%. The lowest decrease in RWC was also observed in the GN rootstock with a decrease of 20.94%. Shahroud 13 and GN rootstock showed the highest and lowest electrolyte leakage at the highest stress level, respectively. [Karimi et al. \(2013\)](#) also found a significant increase in EL in White, Mamai and Ferragnes cultivars due to the higher sensitivity of these cultivars to water loss. The most difference in MDA value was observed in Shahroud 13 with an increase of 186.35% and the lowest difference was found in Shahroud 10 with an increase of 84.58%. Shahroud 6 produced the highest content of proline under severe water stress. According to the results, Shahroud 13 and then Shahroud 6 were recognized as the most sensitive cultivars. Shahroud 8 and 12 were among the tolerant cultivars. Other cultivars were also between these two groups.

Conclusions

Shahroud 13 was recognized as the most sensitive cultivar with the lowest fresh and dry weight, RWC and the highest ion leakage and MDA at the most severe stress level. After that, Shahroud 6 had high sensitivity. Shahroud 8 was recognized as the most drought tolerant cultivar due to its lowest MDA content, the highest chlorophyll a and b and RWC in the most level of drought. After Shahroud 8, Shahroud 12 was including the tolerant cultivars. Tolerant cultivars can be used in future studies to evaluate the possibility of planting these cultivars in areas with water shortage problems.

Keywords: Electrolyte leakage, Field capacity, Malondialdehyde, Proline, Water stress

ارزیابی تحمل به خشکی در برخی ارقام تجاری بادام (*Prunus dulcis* Mill.) بر روی پایه رویشی GN

سید اصغر موسوی^{۱*} - مریم تاتاری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

چکیده

برای ارزیابی تحمل به خشکی در نهال‌های ارقام تجاری بادام (*Prunus dulcis* Mill.)، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی طی سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی چهارمحال و بختیاری (شهرکرد) اجرا گردید. کرت اصلی شامل سطوح مختلف آبیاری براساس میزان درصد رطوبت قابل استفاده خاک بین ظرفیت زراعی (F.C) تا نقطه پژمردگی دائم (P.W.P) شامل ۷۰ درصد (شاهد یا بدون تنش)، ۵۰ درصد (تنش ملایم)، ۳۰ درصد (تنش متوسط) و ۱۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی (تنش شدید) تعیین و اعمال گردید. کرت فرعی، نهال‌های پیوندی ارقام شاه‌رود ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۲۱ بود که همگی بر روی پایه GN پیوند زده شده بودند. پایه رویشی GN نیز در کنار ارقام پیوندی کشت و مقایسه گردید. تیمارهای رطوبتی به‌مدت چهار ماه از اول خرداد تا پایان شهریور ماه اعمال شد و پس از آن صفات ریخت‌شناختی و فیزیولوژیکی ثبت گردید. جهت اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک از دستگاه رطوبت‌سنج (TDR) استفاده شد. طبق نتایج، کمترین وزن تر و خشک اندام هوایی تحت تنش شدید خشکی در رقم 'شاه‌رود ۱۳' به‌ترتیب با میانگین‌های ۶۰۱ و ۳۶۴/۶۶ گرم مشاهده شد. در شدیدترین سطح تنش، رقم 'شاه‌رود ۸' بیشترین مقادیر کلروفیل a و b را به‌ترتیب با میانگین‌های ۷/۴۸ و ۲/۰۷ میلی‌گرم در گرم تر نشان داد. کمترین کاهش RWC در پایه GN با کاهش ۲۰/۹۴ درصدی دیده شد. این پایه کمترین نشت یونی (۴۳/۹۴ درصد) را نیز نشان داد. بیشترین افزایش در مقدار MDA در رقم 'شاه‌رود ۱۳' مشاهده گردید. رقم 'شاه‌رود ۶' در تنش رطوبتی شدید، بیشترین محتوای پرولین (۶۳/۱۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) را داشت. در شدیدترین سطح تنش، ارقام 'شاه‌رود ۱۳' و '۶' به‌عنوان حساس‌ترین و ارقام 'شاه‌رود ۸' و '۱۲' به‌عنوان متحمل‌ترین ارقام به تنش خشکی شناخته شدند.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، پرولین، ظرفیت زراعی، مالون‌دی‌آلدئید، نشت یونی

مقدمه

(1995). در چنین شرایطی، شناسایی ژنوتیپ‌ها و ارقام گیاهی متحمل به کم‌آبی اهمیت ویژه‌ای دارد و یکی از راه حل‌های مناسب برای توسعه کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آید. با تغییر اقلیم، تنش خشکی و اثرات آن بر گیاهان دارای اهمیت بیشتری شده است (Mansourmoghaddam et al., 2021). یکی از مهم‌ترین اثرات کمبود آب طی فصل رویش، کاهش رشد سبزینه‌ای گیاهان است. کاهش سطح رویشی سبب می‌شود تا توانایی گیاه برای جذب نور و در نهایت تولید مواد فتوسنتزی کاهش یابد که خود دلیلی بر کاهش وزن اندام‌ها می‌باشد (Karimi et al., 2015). براساس گزارش اعظمی و همکاران (Aazami et al., 2022)، در شرایط خشکی، وزن خشک شاخساره در ارقام مختلف بادام (*Prunus dulcis* Mill.) کاهش یافت. برزگر و همکاران (Barzegar et al.,

بخش عمده مساحت ایران از نظر اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌گردد و کمبود آب مهم‌ترین عامل محدودکننده تولیدات کشاورزی در این مناطق می‌باشد (Alizadeh,

۱- بخش تحقیقات علوم زراعی- باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران
۲- بخش تحقیقات علوم زراعی- باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
(*)- نویسنده مسئول:

(Email: asgharmousavi@gmail.com)<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89582.1375>

گزارش کردند که بین ارقام از نظر شاخص‌های ریخت‌شناختی از جمله سطح مقطع تنه، سطح مقطع شاخه، رشد شاخه و ارتفاع درخت، میزان ریزش و تاخوردگی برگ در شرایط تنش تفاوت معنی‌داری وجود داشت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به‌ترتیب ژنوتیپ‌های K۸۲۴، K۵۶، و ارقام سوپرنوا و آذر نسبت به بقیه ارقام و ژنوتیپ‌های مورد بررسی، مقاومت بهتری به تنش خشکی نشان دادند. صفوی و همکاران (Safavi et al., 2023) گزارش نمودند که پایه GN در مقایسه با ارقام بادام مورد مطالعه از نظر شاخص‌های رشدی کمتر تحت تأثیر تنش آبی قرار گرفت و تحمل بیشتری به خشکی نشان داد. کریمی و همکاران (Karimi et al., 2015) گزارش نمودند که مقدار نسبی آب برگ (RWC) در ژنوتیپ‌های حساس بادام کاهش و نشت یونی افزایش یافت. براساس گزارش این محققان، محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشاء سلولی و غلظت رنگیزه‌ها در برگ رقم سوپرنوا و پایه GF677 تحت شرایط تنش اسمزی به‌صورت معنی‌داری بیشتر از سایر ارقام بوده است که احتمالاً از سازوکارهای مقاومت به تنش خشکی در بادام می‌باشد. در پژوهش دیگری توسط فتحی و همکاران (Fathi et al., 2019)، گزارش شد که در پاسخ به تنش خشکی، ارقام فرانسیس و سه‌د روی پایه GN، بیشترین RWC و کمترین کاهش در وزن تر و خشک اندام هوایی، و ژنوتیپ‌های '۱۳-۴۰' و 'K3-3-1' بیشترین ریزش برگ و کاهش در سطح کل برگ را در بین ارقام و ژنوتیپ‌های بادام نشان دادند. تنش خشکی با ایجاد اختلال در فرآیند انتقال الکترون در میتوکندری و کلروپلاست و با تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن از جمله پراکسید هیدروژن، موجب آسیب اکسیداتیو به غشاء، افزایش نشت الکترولیت، پراکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه تولید مالون‌دی‌آلدئید در برگ ارقام بادام مورد مطالعه شده است (López-López et al., 2018). مقاومت گیاه به خشکی می‌تواند با ارزیابی محتوای MDA ارزیابی شود (Cheng et al., 2018). افزایش MDA در شرایط خشکی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Sarker & Oba, 2018; Nie et al., 2018).

تجمع پرولین تحت تنش خشکی، تولید اکسیژن اتمی را کم کرده و در نتیجه احتمال آسیب به غشاء کلروپلاست را کاهش می‌دهد (Zhang et al., 2019). رقم سوپرنوا و ژنوتیپ‌های ایرانی ۸-۶ و B-124 به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی توسط کریمی و همکاران (Karimi et al., 2015) معرفی شده‌اند. در پژوهش دیگری، ایساکیدیس و همکاران (Isaakidis et al., 2004) براساس خصوصیات ریخت‌شناختی و پتانسیل آب برگ، رقم فرانسیس روی پایه GN22 را متحمل به تنش خشکی گزارش کردند که از نظر بیشتر خصوصیات مورد بررسی با پایه‌های GN15 و GF677 اختلاف معنی‌دار نداشت. دی‌هرالد (De Herralde, 2000) گزارش کرد که

ارقام مختلف بادام، در شرایط کمبود آب از نظر خصوصیات رویشی تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر داشته‌اند. نتایج مرادی و همکاران (Moradi et al., 2019) نشان داد که تنش خشکی منجر به کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ، میزان کلروفیل a و کل و افزایش معنی‌دار نشت یونی و پرولین آزاد برگ در پایه‌های بذری و رویشی بادام شد. از آنجایی که تحمل به تنش خشکی نتیجه برهم‌کنش صفات ریخت‌شناختی و فیزیولوژیکی گیاه است، بنابراین ترکیبی از صفات مختلف که رابطه مستقیم با تحمل به خشکی دارند، می‌تواند به‌عنوان معیارهای گزینش برای غربال کردن رقم متحمل استفاده گردد (Karimi et al., 2015). بر این اساس، پژوهش حاضر به‌منظور مقایسه واکنش نهال‌های هفت رقم تجاری بادام پیونده‌شده روی پایه GN نسبت به سطوح مختلف تنش خشکی اجرا گردید.

مواد و روش‌ها تیمارهای آزمایشی

این پژوهش طی سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در ایستگاه چهارتخته وابسته به مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری اجرا گردید. اوایل شهریور ماه سال ۱۳۹۷، ارقام بادام شامل ارقام شاه‌رود ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۲۱ بر روی پایه رویشی GN پیوند شدند. در اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ نهال‌های پیوندی یکنواخت از نظر سن، قطر ساقه و ارتفاع انتخاب و در زمین اصلی به فواصل ۵۰ سانتی‌متر روی ردیف و دو متر بین ردیف کشت شدند. پایه رویشی GN نیز در کنار ارقام پیوندی کشت گردید. با شروع فصل رشد در سال ۱۳۹۹، به‌مدت دو ماه قبل از شروع تیمار تنش آبیاری، مراقبت‌های لازم از نهال‌ها انجام گردید و سپس تنش خشکی به‌مدت چهار ماه از اول خرداد تا پایان شهریور ماه اعمال شد. به‌منظور اعمال تنش خشکی، در هر واحد آزمایشی، لوله‌های مخصوص دستگاه رطوبت‌سنج (TDR) جهت اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک نصب شد. براساس قرائت دستگاه رطوبت‌سنج، آبیاری در تیمارهای مختلف براساس میزان درصد رطوبت قابل استفاده خاک بین ظرفیت زراعی (F.C) تا نقطه پژمردگی دائم (P.W.P) شامل ۷۰ درصد (شاهد یا بدون تنش)، ۵۰ درصد (تنش ملایم)، ۳۰ درصد (تنش متوسط) و ۱۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی (تنش شدید) تعیین و اعمال گردید. حجم آبیاری در هر تیمار توسط کنتور تعیین گردید. قبل از اجرای آزمایش، خاک زمین محل اجرای آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک اندازه‌گیری شد (جدول ۱). براساس نتایج تجزیه خصوصیات فیزیکو-شیمیایی خاک، در پاییز قبل از کاشت ۴۰ کیلوگرم کود فسفره، ۴۰ کیلوگرم کود پتاس و ۴ تن کود دامی پوسیده‌شده به زمین مورد آزمایش افزوده شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکو-شیمیایی خاک محل آزمایش در دو سال مورد مطالعه

Table 1- Physico-chemical properties of the soil of experimental site during two studied years

سال Year	بافت Texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی Ec (dS.m ⁻¹)	کربن آلی Organic C (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم K (Mg.kg ⁻¹)	آهن Fe (mg.kg ⁻¹)	منگنز Mn (mg.kg ⁻¹)	روی Zn (mg.kg ⁻¹)
2020	Loamy	7.88	1.012	0.761	0.06	21.20	354.00	4.25	11.47	0.95
2021	Loamy	7.90	0.925	0.41	0.04	8.40	231.00	4.01	9.63	0.63

صفات ریخت‌شناختی

صفات ریخت‌شناختی اندازه‌گیری شده شامل سطح برگ، درصد ریزش برگ و وزن تر و خشک اندام هوایی بودند. این صفات چهار ماه بعد از اعمال تنش آبی اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری سطح برگ با استفاده از دستگاه سطح‌سنج (LI3100CAREA METER) و از میانگین ۲۴ عدد برگ بالغ و سالم از هر واحد آزمایشی که در گره‌های پنجم و ششم انتهایی ساقه اصلی قرار داشتند، انجام شد. درصد ریزش برگ طبق معادله (۱) محاسبه شد.

(۱)
$$= \text{درصد ریزش برگ} \times 100 \times (\text{تعداد برگ در شمارش اولیه} / \text{تعداد برگ باقی‌مانده روی شاخه})$$
 در پایان دوره تنش، تعداد دو نهال از هر واحد آزمایشی از سطح خاک جدا و وزن تر اندام هوایی (شاخ و برگ) به‌وسیله ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس توزین گردید (Mousavi et al., 2009).

صفات فیزیولوژیکی

صفات فیزیولوژیکی ارزیابی شده شامل نشت یونی (EL)، محتوای نسبی آب برگ (RWC)، کلروفیل برگ، پرولین و مالون‌دی‌آلدهید (MDA) بود. این صفات نیز چهار ماه بعد از اعمال تنش آبی اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری EL، قطعات برگ یک سانتی‌متری به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر و در تاریکی قرار داده شدند. پس از آن، نشت یونی اولیه (EC₁) به‌وسیله دستگاه هدایت‌سنج (EC متر) قرائت شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از اندازه‌گیری نشت یونی ثانویه (EC₂)، نشت الکترولیت از طریق معادله (۲) محاسبه شد (Blum & Ebercon, 1981).

(۲)
$$EL = (EC_1/EC_2) \times 100$$
 برای برآورد RWC، ابتدا نمونه برگ‌های تازه وزن شد (FW) و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر شناور شدند. پس از توزین (TW)، برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. وزن خشک برگ‌ها (DW) اندازه‌گیری شده و

محتوای نسبی آب برگ با استفاده از معادله (۳) محاسبه شد (Gohari et al., 2023).

$$RWC = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100 \quad (۳)$$

به‌منظور اندازه‌گیری کلروفیل، استخراج عصاره برگ به‌وسیله استون ۸۰ درصد انجام شد. جذب نور توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۴۸۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت گردید و غلظت کلروفیل a و b بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر محاسبه گردید (Lichtenthaler & Wellburn, 1983). جهت اندازه‌گیری مقدار پرولین برگ، بافت تازه برگ با محلول سه درصد اسید سولفوسالسیلیک در هاون ساییده شد و سپس با معرف اسید نین-هیدرین و اسیداستیک گلاسیال مخلوط گردید. محلول حاصل در بن-ماری و پس از آن در حمام یخ نگهداری شدند. در مرحله بعد، چهار میلی‌لیتر تولوئن به عصاره حاصل اضافه گردید و جذب نوری در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. غلظت پرولین هر نمونه با استفاده از نمونه‌های استاندارد تهیه‌شده از پرولین خالص با وزن مولکولی ۱۱۵/۵ محاسبه گردید (Bates et al., 1973). برگ تازه نمونه‌های گیاهی به‌وسیله بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار عصاره‌گیری شده و سپس سانتریفیوژ گردید. محلول فوقانی با تری‌کلرواستیک ۲۰ درصد حاوی اسید تری‌تیوباربیتوریک مخلوط و در حمام آب گرم و بلافاصله در حمام یخ سرد گذاشته شد. پس از سانتریفیوژ، جذب محلول رویی در دو طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر قرائت گردید و مقدار مالون دی-آلدئید بر حسب میکرومول در گرم وزن تر محاسبه شد (Heath & Packer, 1968).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و چهار نهال در هر واحد آزمایشی به اجرا درآمد. کرت اصلی شامل تیمارهای رطوبتی و کرت فرعی شامل ارقام بادام بود. تجزیه مرکب داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ و مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

وزن تر و خشک اندام هوایی

نتایج نشان داد که رقم شاهرود ۷ در شرایط رطوبتی ۷۰ درصد ظرفیت زراعی بیشترین وزن تر اندام هوایی (۹۸۷/۳۳ گرم) را نشان داد. این رقم در ظرفیت زراعی ۵۰ و ۳۰ درصد خاک نیز به ترتیب با میانگین‌های ۹۳۱/۶۶ و ۸۴۵/۶۶ گرم، وزن تر اندام هوایی بیشتری نسبت به سایر ارقام و GN داشت. در تنش ۱۰ درصد، شاهرود ۸ مقادیر بیشتری از وزن تر (۷۸۵ گرم) را نشان داد. کمترین وزن تر اندام هوایی تحت تنش شدید خشکی (۱۰ درصد ظرفیت زراعی) در رقم شاهرود ۱۳ با میانگین ۶۰۱ گرم مشاهده گردید. این رقم در سایر سطوح تنش نیز وزن تر اندام هوایی کمتری را نشان داد (جدول ۲). تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزنده است که منجر به بروز تغییرات معنی‌داری در فعالیت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان می‌شود (Okunlola et al., 2017). در پژوهشی، به‌طور مشابه وزن تر اندام هوایی ارقام بادام با افزایش سطح تنش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین وزن تر شاخساره در تیمار شاهد و رقم سنگی مشاهده شد (۴/۸۳۲ گرم). کمترین مقدار این صفت نیز در تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و در رقم تلخ با میانگین ۱/۹۳۸ گرم مشاهده شد (Aazami et al., 2022). کاهش سطح رویشی سبب می‌شود تا توانایی گیاه برای جذب نور و در نهایت تولید مواد فتوسنتزی کاهش یابد که خود دلیلی بر کاهش وزن اندام‌های هوایی می‌باشد.

رقم شاهرود ۸ در تیمار ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، با میانگین ۵۴۵/۶۶ گرم بیشترین وزن خشک اندام هوایی را داشت. در رطوبت ۷۰ درصد، رقم شاهرود ۶ و در رطوبت‌های ۵۰ و ۱۰ درصد ظرفیت زراعی، پایه GN وزن خشک اندام هوایی بیشتری را نشان دادند. به‌طور مشابه با وزن تر اندام هوایی، شاهرود ۱۳ در رطوبت ۱۰ درصد ظرفیت زراعی (۳۶۴/۶۶ گرم)، کمترین وزن خشک اندام هوایی را نشان داد. شاهرود ۱۰ در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی و شاهرود ۲۱ در رطوبت ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی را نشان دادند (جدول ۲). در پژوهش انجام‌شده توسط اعظمی و همکاران (Aazami et al., 2022)، بیشترین وزن خشک شاخساره در رقم سنگی و در تیمارهای ۷۵ درصد ظرفیت زراعی با میانگین ۲/۴۱۵ گرم و شاهد با میانگین ۲/۳۶۵ گرم به دست آمد. بادام تلخ در تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی با میانگین ۰/۷۷۷ گرم، کمترین وزن خشک شاخساره را به همراه داشت. در پژوهش این محققان، وزن تر و خشک در بین ارقام با یکدیگر هم‌خوانی داشتند، به‌طوری‌که رقم سنگی بیشترین وزن تر و خشک و رقم تلخ کمترین وزن تر و خشک را نشان داد. در پژوهش حاضر نیز هم‌خوانی

و همبستگی بین وزن تر و خشک در رقم شاهرود ۱۳ دیده شد که کمترین مقدار این دو صفت را داشت، درحالی‌که شاهرود ۸ نیز جزء ارقام با وزن تر و خشک بیشتر بود.

با کاهش مقدار آب میزان جذب عناصر، تجمع مواد فتوسنتزی و سرعت رشد نسبی کاهش می‌یابد. افت قابل توجه سرعت رشد نسبی بیانگر کاهش ماده خشک تولیدشده در اثر کاهش رشد شاخ و برگ است. علاوه بر این، ریزش برگ نیز در کاهش نرخ فتوسنتز و کاهش وزن تر و خشک نهال‌ها دخالت دارد (Karimi et al., 2015). در این پژوهش، وزن تر و خشک نهال‌های تحت تنش ملایم به ترتیب بیش از ۲۵ و ۲۴ درصد وزن تر و خشک نهال‌های تحت تنش شدید بود. کاهش در وزن تر و خشک اندام‌های هوایی در اثر تنش خشکی در گونه‌های درختی قبلاً نیز گزارش شده است (Gholami et al., 2010; Elfeel & Al-Namo, 2011).

ریزش برگ

بیشترین ریزش برگ در شاهرود ۱۳ و تیمار ۱۰ درصد ظرفیت زراعی (۳۸/۲۵ درصد) حادث شد. این رقم در سایر تیمارهای رطوبتی نیز بیشترین درصد ریزش برگ را نشان داد. کمترین درصد ریزش برگ متعلق به ارقام شاهرود ۱۰ و ۱۲ در تیمار رطوبتی شاهد (۰/۳۱ درصد) بود. در رطوبت‌های ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، شاهرود ۸ کمترین ریزش برگ را داشت. این رقم به همراه شاهرود ۱۲ در تنش رطوبتی ۱۰ درصد ظرفیت زراعی نیز کمترین مقادیر ریزش برگ را نشان داد (جدول ۲). افزایش معنی‌دار در ریزش برگ ژنوتیپ‌های بادام تحت تنش شدید خشکی در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Kovalikova et al., 2020; Gohari et al., 2023). تنش خشکی باعث افزایش غلظت اتیلن شده و ریزش برگ اتفاق می‌افتد (Kovalikova et al., 2020). علاوه بر این گیاهان با کاهش تعداد برگ در دوره تنش می‌توانند شدت تعلق را کاهش دهند (Sinha et al., 2022). ایساکیدیس و همکاران (Issakidis et al., 2004) پایه GN22 را از لحاظ پتانسیل آب برگ و ریزش برگ، متحمل گزارش کردند. در پژوهش حاضر، ارقام شاهرود ۸، ۱۰، ۱۲ و پایه GN تحمل بیشتری به کاهش آب برگ نشان دادند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

سطح برگ

نتایج نشان داد که پایه GN بیشترین سطح برگ را داشت و در بین ارقام بادام مورد بررسی، شاهرود ۱۰ و سپس شاهرود ۱۲ سطح برگ بیشتری نسبت به سایر ارقام داشتند. کمترین سطح برگ نیز متعلق به شاهرود ۶ و شاهرود ۱۳ بود (شکل ۲). در بسیاری از گیاهان نواحی خشک و نیمه‌خشک، سازگاری به خشکی با کاهش

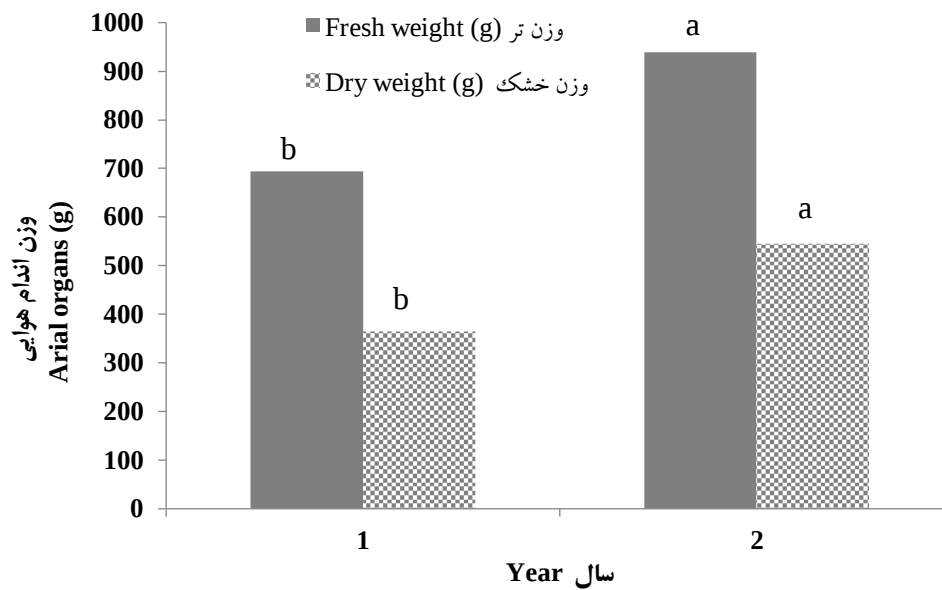
اندام‌های تعرق‌کننده از طریق کاهش سطح و یا ریزش برگ‌ها حاصل می‌شود و بدیهی است که کاهش سطح برگ، میزان فتوسنتز را نیز کاهش می‌دهد. سطح برگ یک ویژگی ژنتیکی می‌باشد که تغییرات اندک را در نتیجه شرایط محیطی تحمل می‌کند (Gispert & Vargas, 2011).

به‌طور کلی در این پژوهش، افزایش سطوح خشکی منجر به کاهش سطح برگ در ارقام و پایه مورد بررسی بادام گردید. سطح برگ در تیمار ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (شاهد) ۱/۴۹ برابر بیشتر از تیمار ۱۰ درصد ظرفیت زراعی بود (شکل ۳).

جدول ۲- اثر تنش خشکی و رقم پیوندشده روی پایه GN بر برخی خصوصیات رویشی بادام

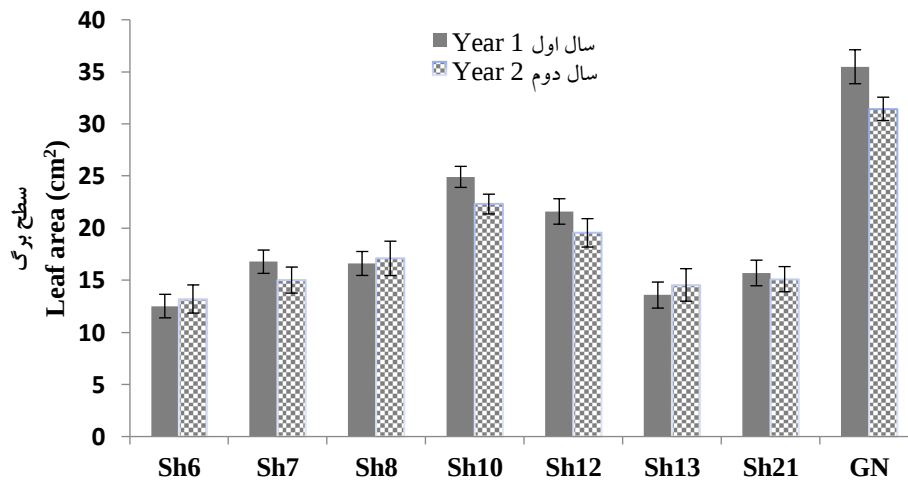
Table 2- The effect of drought stress and cultivar grafted on the GN rootstock on some vegetative characteristics of almond

تنش خشکی (درصد ظرفیت زراعی) Drought stress (% field capacity)	رقم/پایه Cultivar/ rootstock	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight (g)	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g)	ریزش برگ Leaf abscission (%)
70%	شاهرود ۶ Sh 6	943±136.11	534.83±110.26	0.45±0.05
	شاهرود ۷ Sh 7	987.33±136.23	514.83±107.99	0.38±0.01
	شاهرود ۸ Sh 8	964.66±136.27	496.50±107.68	0.32±0.05
	شاهرود ۱۰ Sh 10	945.33±136.12	491.83±111.54	0.31±0.02
	شاهرود ۱۲ Sh 12	883.33±136.14	500.50±107.82	0.31±0.01
	شاهرود ۱۳ Sh 13	872.66±138.89	497.83±108.88	0.54±0.09
	شاهرود ۲۱ Sh 21	908.33±136.70	493.16±114.88	0.39±0.03
	GN جی‌ان	935.33±136.42	523.500±108.98	0.36±0.03
	شاهرود ۶ Sh 6	888.33±135.94	483.00±105.20	3.03±0.09
	شاهرود ۷ Sh 7	931.66±136.05	462.00±103.95	3.11±0.08
50%	شاهرود ۸ Sh 8	910.00±135.99	479.33±102.51	2.19±0.05
	شاهرود ۱۰ Sh 10	907.00±135.92	481.00±101.89	2.41±0.4
	شاهرود ۱۲ Sh 12	858.00±135.97	474.33±102.51	2.36±0.3
	شاهرود ۱۳ Sh 13	811.33±140.21	464.00±102.64	4.04±0.5
	شاهرود ۲۱ Sh 21	932.33±137.59	448.00±102.37	3.53±0.2
	GN جی‌ان	899.33±135.97	491.00±102.97	2.26±0.15
	شاهرود ۶ Sh 6	802.66±132.36	450.33±96.92	13.49±2.30
	شاهرود ۷ Sh 7	845.66±132.59	434.00±96.08	13.02±1.95
	شاهرود ۸ Sh 8	843.33±132.57	545.66±96.15	9.09±1.02
	شاهرود ۱۰ Sh 10	829.33±132.41	447.33±95.76	9.34±1.23
30%	شاهرود ۱۲ Sh 12	785.00±132.98	441.66±96.75	9.27±2.66
	شاهرود ۱۳ Sh 13	685.33±133.63	417.00±95.87	15.35±3.65
	شاهرود ۲۱ Sh 21	802.33±132.34	407.00±98.06	13.59±3.21
	GN جی‌ان	815.00±132.22	476.33±95.70	9.12±2.88
	شاهرود ۶ Sh 6	695.66±132.19	418.66±90.57	32.54±5.12
	شاهرود ۷ Sh 7	729.00±132.36	397.33±92.86	31.52±4.75
	شاهرود ۸ Sh 8	785.00±132.22	435.66±91.02	20±2.56
	شاهرود ۱۰ Sh 10	720.00±132.97	417.33±91.13	21.13±4.19
	شاهرود ۱۲ Sh 12	692.66±132.25	419.66±90.85	20.06±2.74
	شاهرود ۱۳ Sh 13	601.00±132.49	364.66±91.68	38.25±6.67
10%	شاهرود ۲۱ Sh 21	684.66±132.25	373.66±90.84	35.26±4.76
	GN جی‌ان	764.66±132.21	441.33±95.35	20.01±3.67
LSD ($p \leq 0.05$)		1.25	0.85	0.52



شکل ۱- اثر سال بر وزن تر و خشک اندام هوایی بادام

Figure 1- The effect of year on the fresh and dry weight of almond arial organs (LSD, $p \leq 0.05$)



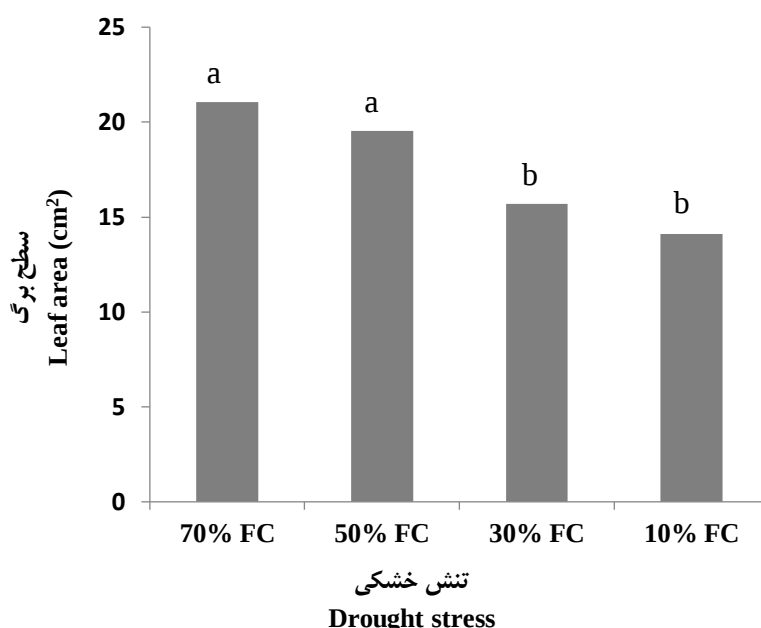
شکل ۲- اثر رقم بادام پیوند شده روی پایه GN بر سطح برگ طی دو سال

Figure 2- The effect of almond cultivar grafted on the GN rootstock on the leaf area during two years (LSD, $p \leq 0.05$) (Sh=Shahrood)

کلروفیل

بیشترین مقادیر کلروفیل a، b و کل در کمترین سطح تنش مشاهده شد. در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی، رقم شاهرود ۸^{*} بیشترین مقدار کلروفیل a (۸/۷۱ میلی گرم در گرم وزن تر) و کلروفیل کل (۱۱/۶۰ میلی گرم در گرم وزن تر) را داشت. این رقم در شدیدترین سطح تنش نیز محتوای کلروفیلی (a، b و کل) بیشتری نسبت به سایر ارقام داشت (جدول ۳).

در شرایط تنش خشکی فتوسنتز کاهش یافته (Rao et al., 2008) و نیز تقسیم و طولیل شدن سلولی نیز کم می شود (Osakabe et al., 2014). این گونه پاسخهای مورفولوژیک، یک سازوکار اجتناب از خشکی است که در این آزمایش به صورت کاهش وزن تر و خشک شاخساره و کاهش سطح برگ نمایان شد. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط رنجبر و همکاران (Ranjbar et al., 2022) همخوانی دارد.



شکل ۳- اثر سطوح مختلف خشکی بر سطح برگ ارقام بادام پیوندشده بر روی پایه GN
Figure 3- The effect of drought levels on the leaf area of almond cultivars grafted on GN rootstock (LSD, $p \leq 0.05$)

RWC را داشت، اما در شدیدترین سطح تنش، شاهرود ۸^{*} بیشترین مقدار این صفت را نشان داد. کمترین RWC متعلق به شاهرود ۱۳^{*} در تنش رطوبتی ۱۰ درصد ظرفیت زراعی بود. در سطوح دیگر تنش نیز این رقم، کمترین RWC را نشان داد (جدول ۳). براساس مطالعات انجام شده روی گیاهان مختلف، RWC می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی تحمل گیاه به خشکی و پژمردگی به کار رود (Jamalluddin et al., 2021). کاهش RWC در تنش خشکی در سیب (Liu et al., 2011)، بادام (Alimohammadi et al., 2013) و گیلان (Javadi et al., 2017) گزارش شده است. در پژوهش انجام شده توسط گوهری و همکاران (Gohari et al., 2023)، ژنوتیپ A-7-100 بادام در شرایط تنش خشکی بیشترین مقدار RWC را داشت که بیانگر توانایی بیشتر این ژنوتیپ در جذب و نگهداری آب است. در پژوهش دیگری، کمترین RWC در ارقام بادام فرانسیس، مامایی و سفید در اواخر دوره تنش دیده شد که با پژمردگی و ریزش برگ همراه بود (Karimi et al., 2015). به گزارش رنجبر و همکاران (Ranjbar et al., 2022) مقدار RWC تحت شرایط تنش و در ترکیب پیوندی K13-40 روی پایه بادام تلخ شماره ۳۲ تا ۴۴ درصد کاهش یافت. در تحقیق حاضر، بیشترین کاهش RWC در شاهرود ۱۳^{*} با کاهش ۳۶/۸۵ درصدی بود. کمترین کاهش RWC نیز در پایه GN با کاهش ۲۰/۹۴ درصدی مشاهده شد که همسو با نتایج رنجبر و همکاران (Ranjbar et al., 2022) است.

در تنش‌های ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، شاهرود ۱۳^{*} مقادیر بیشتری از کلروفیل a را نشان داد. کمترین مقدار کلروفیل a و کل در شاهرود ۲۱^{*} و در شدیدترین سطح تنش به ترتیب با میانگین ۴/۸۹ و ۶/۳۷ میلی گرم در گرم وزن تر مشاهده شد. این رقم در سایر سطوح تنش نیز مقادیر کلروفیل a و کل کمتری نسبت به سایر ارقام داشت (جدول ۳). در شدیدترین سطح تنش نیز شاهرود ۸^{*} بیشترین مقدار این کلروفیل a و b را داشت. شاهرود ۱۳^{*} و شاهرود ۲۱^{*} کمترین محتوای کلروفیل b و کل را در شرایط تنش شدید (رطوبت ۱۰ درصد ظرفیت زراعی) نشان دادند. در شرایط تنش خشکی، کلروپلاست‌ها تخریب شده و محتوای کلروفیل کاهش می‌یابد (Schlemmer et al., 2005). پیش‌ماده اصلی کلروفیل و پرولین، گلوتامات است، افزایش تولید پرولین در تنش خشکی کاهش سنتز کلروفیل را نیز به دنبال دارد (Aspinall & Paleg, 1981). کاهش معنی‌دار غلظت کلروفیل برگ تحت تنش خشکی در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است (Schlemmer et al., 2005; Gohari et al., 2023).

محتوای نسبی آب برگ (RWC)

در این تحقیق، بیشترین درصد RWC متعلق به شاهرود ۷^{*} و در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی با میانگین ۷۸/۷ درصد دیده شد. این رقم در رطوبت‌های ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی نیز بیشترین

جدول ۳- اثر تنش خشکی و رقم پیوندشده روی پایه GN روی برخی از خصوصیات فیزیولوژیک بادام

Table 3- The effect of drought stress and cultivar grafted on the GN rootstock on some physiological characteristics of almond

تنش خشکی (درصد ظرفیت زراعی) Drought stress (% field capacity)	رقم/ پایه Cultivar/ rootstock	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل کل Total Chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW) I	محتوای نسبی آب برگ Relative water content (%)
70%	شاهرود ۶ [*] Sh 6	7.14±0.39	2.72±0.24	9.87±0.54	74.61±0.46
	شاهرود ۷ [*] Sh 7	6.53±0.52	2.42±0.21	8.96±0.23	78.70±0.52
	شاهرود ۸ [*] Sh 8	8.71±0.27	2.34±0.08	11.06±0.24	76.93±0.51
	شاهرود ۱۰ [*] Sh 10	6.83±0.34	2.28±0.26	9.11±0.35	74.90±0.53
	شاهرود ۱۲ [*] Sh 12	7.72±0.27	2.39±0.11	10.11±0.11	68.53±0.45
	شاهرود ۱۳ [*] Sh 13	7.42±0.47	2.24±0.37	9.67±0.13	66.15±0.59
	شاهرود ۲۱ [*] Sh 21	6.36±0.40	2.08±0.45	8.45±0.09	71.23±1.05
	جی ان GN	8.31±0.17	2.59±0.16	10.90±0.26	73.83±0.65
	شاهرود ۶ [*] Sh 6	6.57±0.46	2.25±0.18	8.83±0.08	69.50±0.51
	شاهرود ۷ [*] Sh 7	5.85±0.35	2.09±0.21	7.94±0.32	73.74±0.60
50%	شاهرود ۸ [*] Sh 8	8.27±0.29	2.26±0.10	10.54±0.14	71.80±0.89
	شاهرود ۱۰ [*] Sh 10	6.85±0.28	2.27±0.12	9.13±0.13	71.28±0.93
	شاهرود ۱۲ [*] Sh 12	7.41±0.19	2.20±0.09	9.62±0.52	66.44±0.43
	شاهرود ۱۳ [*] Sh 13	6.22±0.35	2.05±0.35	8.27±0.21	59.99±0.64
	شاهرود ۲۱ [*] Sh 21	5.96±0.29	1.93±0.17	7.89±0.32	73.83±1.71
	جی ان GN	8.20±0.25	2.37±0.14	10.58±0.41	70.52±0.42
	شاهرود ۶ [*] Sh 6	5.92±0.68	2.10±0.12	8.02±0.25	61.73±0.68
	شاهرود ۷ [*] Sh 7	5.35±1.92	1.93±0.13	7.28±0.13	66.38±0.84
	شاهرود ۸ [*] Sh 8	7.75±0.28	2.17±0.07	9.93±0.07	65.76±1.18
	شاهرود ۱۰ [*] Sh 10	6.12±0.59	2.09±0.08	8.22±0.12	64.27±0.96
30%	شاهرود ۱۲ [*] Sh 12	7.05±0.15	2.03±0.18	9.09±0.36	59.99±1.45
	شاهرود ۱۳ [*] Sh 13	6.06±0.42	1.79±0.13	7.85±0.62	49.86±2.04
	شاهرود ۲۱ [*] Sh 21	6.60±0.47	1.70±0.26	8.31±24	61.67±0.69
	جی ان GN	7.43±1.85	2.40±0.07	9.38±0.21	63.01±0.45
	شاهرود ۶ [*] Sh 6	5.63±0.50	1.92±0.11	7.55±0.52	51.30±0.34
	شاهرود ۷ [*] Sh 7	4.97±0.64	1.68±0.21	6.65±0.58	54.79±0.64
	شاهرود ۸ [*] Sh 8	7.48±0.37	2.07±0.08	9.56±0.45	60.27±0.52
	شاهرود ۱۰ [*] Sh 10	5.52±0.98	1.88±0.23	7.40±0.61	53.72±1.69
	شاهرود ۱۲ [*] Sh 12	6.40±0.70	1.97±0.10	8.37±0.32	51.07±0.35
	شاهرود ۱۳ [*] Sh 13	5.52±1.05	1.41±0.17	6.94±0.14	41.77±1.13
10%	شاهرود ۲۱ [*] Sh 21	4.89±0.68	1.47±0.13	6.37±0.16	50.19±0.64
	جی ان GN	7.23±0.52	2.01±0.38	9.25±0.24	58.37±0.39
LSD ($p \leq 0.05$)		0.25	0.18	0.05	0.56

نشت یونی

در این پژوهش، رقم شاهرود ۱۳^{*} در شدیدترین سطح تنش، بیشترین نشت یونی را نشان داد (۶۶/۹۹ درصد). این رقم در تنش-های ۳۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز بیشترین مقدار این صفت را نشان داد. در شاهد، بیشترین نشت یونی در شاهرود ۶^{*} و ۱۳^{*} مشاهده شد. کمترین نشت یونی در شاهرود ۱۰^{*} و در تیمار ۷۰ درصد ظرفیت

زراعی دیده شد. پایه GN در سایر سطوح تنش، کمترین نشت یونی را داشت (جدول ۴). نشت یونی کمتر در شرایط تنش رطوبتی با حفظ تمامیت غشاهای سلولی همراه است و یکپارچگی غشاء سلولی در برگ گیاهان متحمل به کاهش آب، حفظ خواهد شد (Karimi et al., 2013). افزایش EL در ارقام شاهرود ۱۳^{*} و شاهرود ۶^{*} نشان دهنده حساسیت بیشتر این ارقام به آسیب غشاء در شرایط تنش

مشاهده شد. در تنش‌های ۵۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی، شاهرود ۲۱ و در تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، شاهرود ۶ بیشترین مقدار MDA را نشان داد. کمترین مقدار این صفت در تیمار رطوبتی شاهد و در شاهرود ۱۲ با میانگین ۱۱/۸۲ میکرومول بر گرم وزن تر مشاهده شد. در تنش‌های رطوبتی ۳۰ و ۱۰ درصد زراعی، رقم شاهرود ۸ کمترین MDA را داشت (جدول ۴).

است. کریمی و همکاران (Karimi et al., 2013) نیز افزایش معنی-دار EL در ارقام سفید، مامایی و فرانیس را به دلیل حساسیت بیشتر این ارقام به آلودگی دانستند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

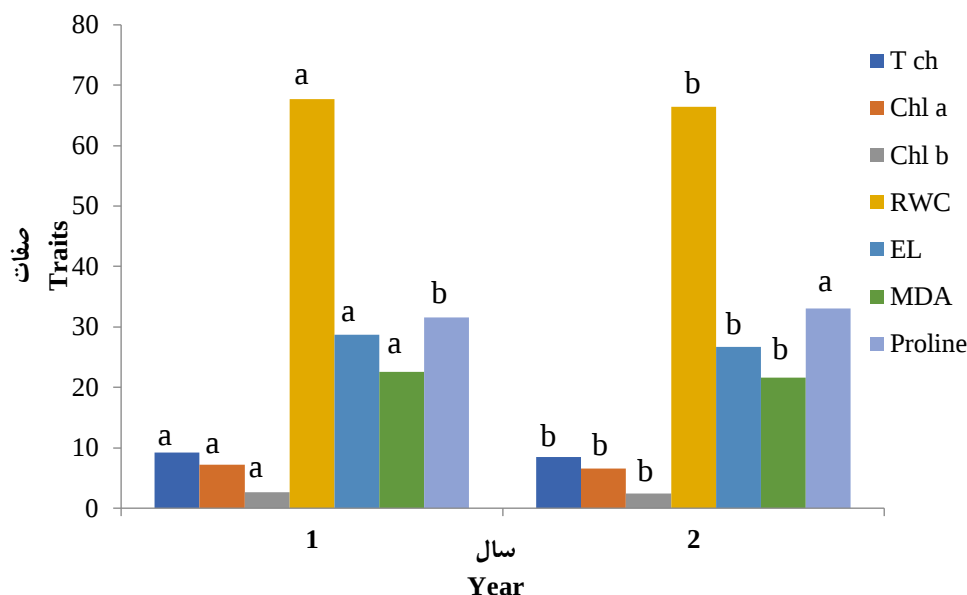
مالون‌دی‌آلدئید (MDA)

نتایج نشان داد که بیشترین مقدار MDA در شاهرود ۱۳ و در تنش رطوبتی شدید با میانگین ۴۱/۷۵ میکرومول بر گرم وزن تر

جدول ۴- اثر تنش خشکی و رقم پیوندشده روی پایه GN روی برخی از خصوصیات فیزیولوژیک بادام

Table 4- The effect of drought stress and cultivar grafted on GN rootstock on some physiological characteristics of almond

تنش خشکی (درصد ظرفیت زراعی) Drought stress (% field capacity)	رقم/ پایه Cultivar/ rootstock	نشت یونی Electrolyte leakage (%)	مالون‌دی‌آلدئید MDA ($\mu\text{mol.g}^{-1}$ FW)	پرولین Proline (mg.g^{-1} FW)
70%	شاهرود ۶ Sh 6	15.62±0.07	12.77±0.91	26.46±2.25
	شاهرود ۷ Sh 7	13.34±0.08	12.89±0.88	19.81±0.27
	شاهرود ۸ Sh 8	13.01±0.09	12.01±0.85	25.03±0.23
	شاهرود ۱۰ Sh 10	12.39±0.11	13.95±0.95	22.85±0.19
	شاهرود ۱۲ Sh 12	14.28±0.08	11.82±0.88	25.97±0.70
	شاهرود ۱۳ Sh 13	14.72±0.08	14.58±0.86	24.70±0.33
	شاهرود ۲۱ Sh 21	14.46±0.08	15.98±0.87	19.39±0.77
	جی‌ان GN	12.84±0.06	11.85±0.88	24.03±0.38
50%	شاهرود ۶ Sh 6	17.37±1.56	13.21±1.88	32.08±0.72
	شاهرود ۷ Sh 7	19.18±1.46	13.48±1.90	25.00±0.73
	شاهرود ۸ Sh 8	18.37±1.56	13.51±1.92	27.19±1.06
	شاهرود ۱۰ Sh 10	17.35±1.49	14.56±1.90	29.84±0.28
	شاهرود ۱۲ Sh 12	19.14±1.45	13.18±1.96	29.16±0.57
	شاهرود ۱۳ Sh 13	24.15±1.45	15.39±1.95	28.02±0.71
	شاهرود ۲۱ Sh 21	18.48±1.45	16.49±1.89	25.73±0.26
	جی‌ان GN	16.39±1.52	13.31±1.94	31.10±0.67
30%	شاهرود ۶ Sh 6	37.97±1.23	21.55±1.11	38.80±1.10
	شاهرود ۷ Sh 7	39.19±1.46	17.55±1.03	34.68±0.34
	شاهرود ۸ Sh 8	38.61±1.33	16.84±1.04	33.03±0.72
	شاهرود ۱۰ Sh 10	34.57±1.29	17.47±1.02	39.82±0.96
	شاهرود ۱۲ Sh 12	34.48±1.45	16.85±1.02	36.83±0.16
	شاهرود ۱۳ Sh 13	57.44±4.90	20.45±1.35	36.00±0.35
	شاهرود ۲۱ Sh 21	41.03±1.85	21.42±1.14	31.73±0.28
	جی‌ان GN	33.62±1.24	17.53±1.04	38.22±1.09
10%	شاهرود ۶ Sh 6	55.28±1.34	36.08±0.98	63.17±1.16
	شاهرود ۷ Sh 7	54.63±1.22	38.22±0.97	51.79±0.30
	شاهرود ۸ Sh 8	44.60±1.33	25.13±0.97	59.89±0.24
	شاهرود ۱۰ Sh 10	48.53±1.27	25.75±0.97	54.82±1.31
	شاهرود ۱۲ Sh 12	44.31±1.26	26.76±1.09	51.97±0.80
	شاهرود ۱۳ Sh 13	66.99±1.23	41.75±1.05	57.30±2.12
	شاهرود ۲۱ Sh 21	59.73±1.19	38.95±0.98	47.74±1.23
	جی‌ان GN	43.94±1.23	25.75±0.96	52.80±0.23
LSD ($p \leq 0.05$)		0.84	1.02	0.51



شکل ۴- اثر سال روی برخی از صفات فیزیولوژیک بادام

Figure 4- The effect of year on some physiological traits of almond (LSD, $p \leq 0.05$)

(T ch=Total Chlorophyll, Chl a=Chlorophyll a, Chl b=Chlorophyll b, RWC=Relative water content, EL=Electrolyte leakage, MDA= Malondialdehyde)

شاهد و در شاهرود ۲۱⁺ با میانگین ۱۹/۳۹ میلی گرم در گرم وزن تر دیده شد (جدول ۴). تجمع پرولین در شرایط تنش خشکی در ژنوتیپ‌های بادام مورد بررسی توسط گوهری و همکاران (Gohari *et al.*, 2023) نیز گزارش شد و ژنوتیپ‌هایی که پرولین بیشتری تولید کردند، تحمل متوسط تا بالایی را به تنش خشکی نشان دادند. پرولین در سازگاری با تنش نقش‌های متعددی را بازی می‌کند. این ماده گیاه را در برابر تنش اکسیداتیو ایجادشده توسط گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) حفاظت می‌کند (Gohari *et al.*, 2023). کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2013) نشان دادند که تجمع پرولین و کربوهیدرات‌های محلول در تنظیم اسمزی بادام نقش مهمی دارند. گزارش شده است که تنش خشکی تولید پرولین را در بیشتر ارقام و ژنوتیپ‌های بادام تحریک می‌کند (Arzani *et al.*, 2010). در پژوهشی، بیشترین مقدار پرولین در شرایط تنش خشکی مربوط به ژنوتیپ K13-40 روی پایه GF677 (Ranjbar *et al.*, 2022) و در پژوهش دیگری توسط اعظمی و همکاران (Aazami *et al.*, 2022) گزارش شده است که رقم نان پاریل بیشترین محتوای پرولین را با میانگین ۴۱۵/۳ میکروگرم در گرم وزن تر داشت. رقم آذر در شاهد نیز کمترین مقدار پرولین (۱۹۶ میکروگرم در گرم وزن تر) را نشان داد که کمتر از مقادیر گزارش شده در تحقیق حاضر بود.

نتیجه گیری

تحمل به تنش خشکی نتیجه برهم کنش صفات ریخت‌شناختی و فیزیولوژیکی گیاه است، بنابراین ترکیبی از صفات مختلف که رابطه

در بروز تنش خشکی، تنش اکسیداتیو در سلول‌ها و بافت‌ها اتفاق می‌افتد که منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدها می‌شود. محصول نهایی پراکسیداسیون لیپیدها، MDA است که به عنوان شاخصی برای آسیب اکسیداتیو غشاء سلولی به کار می‌رود (Jaafar *et al.*, 2012). رنجبر و همکاران (Ranjbar *et al.*, 2022) گزارش کردند که بیشترین مقدار MDA در شرایط تنش خشکی مربوط به ارقام سوپرنا (۴۶/۵ نانومول بر گرم وزن تر) و K13-40 (۴۵/۲۹ نانومول بر گرم وزن تر) روی پایه بادام تلخ شماره ۳۲ بود که به ترتیب افزایش ۷۶/۴۷ و ۷۵/۴۳ درصدی را در مقایسه با شاهد داشت. در تحقیق حاضر، بیشترین اختلاف در مقدار MDA بین سطوح رطوبتی ۷۰ و ۱۰ درصد ظرفیت زراعی در شاهرود ۱۳⁺ با افزایش ۱۸۶/۳۵ درصد و کمترین اختلاف در شاهرود ۱۰⁺ با افزایش ۸۴/۵۸ درصدی دیده شد. در پژوهش دیگری، کلیه ارقام بادام در شرایط تنش خشکی افزایش تجمع MDA را نشان دادند که با نتایج این پژوهشگران مطابقت دارد.

پرولین

نتایج نشان داد که شاهرود ۶⁺ در تنش رطوبتی شدید بیشترین محتوای پرولین را تولید کرد (۶۳/۱۷ میلی گرم در گرم وزن تر). این رقم در سطوح رطوبتی ۵۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نیز بیشترین محتوای پرولین را داشت. در تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین پرولین متعلق به شاهرود ۱۰⁺ بود. کمترین پرولین در تیمار رطوبتی

قرار گرفت. سایر ارقام نیز حدفاصل این دو گروه قرار گرفتند. براساس نتایج نهایی، می‌توان در مطالعات آینده از ارقام متحمل به‌منظور ارزیابی امکان کشت این ارقام در مناطق با مشکل کم‌آبی استفاده کرد.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی مصوب (شماره پروژه: ۲۴-۴۲-۳۳-۰۳۳-۹۶۰۴۱۸) می باشد، بدین وسیله نگارندگان مقاله از همکاری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی چهارمحال و بختیاری در انجام پروژه تحقیقاتی سپاسگزاری می‌نمایند.

مستقیم با تحمل به خشکی دارند، می‌تواند به‌عنوان معیارهای گزینش برای غربال کردن رقم متحمل استفاده گردد. طبق نتایج این پژوهش، رقم شاه‌رود ۱۳^{*} با داشتن کمترین وزن تر و خشک، سطح برگ کمتر، کمترین مقدار کلروفیل b و RWC و بیشترین ریزش برگ، نشت یونی و محتوای MDA در شدیدترین سطح تنش به‌عنوان حساس‌ترین رقم شناخته شد. پس از آن، رقم شاه‌رود ۶^{*} از حساسیت بالایی برخوردار بود. رقم شاه‌رود ۸^{*} به‌دلیل داشتن وزن تر و خشک اندام هوایی بالا، کمترین مقدار ریزش برگ، بیش‌ترین محتوای کلروفیل a، b و کل، بیشترین مقدار RWC و کمترین مقدار MDA در شدیدترین سطح خشکی به‌عنوان متحمل‌ترین رقم به خشکی شناخته شد. رقم شاه‌رود ۱۲^{*} پس از شاه‌رود ۸^{*} جزء ارقام متحمل

References

1. Aazami, M.A., Rasouli, F., & Panahi Tajaragh, R. (2022). Evaluation of almond cultivars for the morphological, physiological and nutritional traits under water deficit conditions. *Journal of Elementology*, 27, 423-436. <https://doi.org/10.5601/jelem.2022.26.4.2189>
2. Alimohammadi, A., Shiran, B., Martínez-Gómez, P., & Ebrahimie, E. (2013). Identification of water-deficit resistance genes in wild almond *Prunus scoparia* using cDNA-AFLP. *Scientia Horticulturae*, 159, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.04.023>
3. Alizadeh, A. (1995). *Principles of Applied Hydrology*. Publication of Imam Reza International University, Mashhad, Iran, 963 pp. (in Persian)
4. Aspinall, D., & Paleg, L.G. (1981). *Proline Accumulation: Physiological Aspects*. p. 205-241. In: L.G. Paleg & D. Aspinall (eds.), *The physiology and biochemistry of drought resistance in plants*. Academic Press, Sydney, New York, London.
5. Arzani, K., Yadollahi, A., A Ebadi., & Wirthensohn, M. (2010). The relationship between bitterness and drought resistance of almond (*Prunus dulcis* Mill.). *African Journal of Agricultural Research*, 5(9), 861-866.
6. Babadaei, R., Mousavi, A., & Jafarpour, M. (2018). *Guide to Almond Production*. Publication of Khorasan Azad University, Isfahan, Iran, 280 p. (in Persian)
7. Barzegar, K., Yadollahi, A., Imani, A., & Ahmadi, N. (2012). Response to drought stress of almond cultivars and genotypes grown under field conditions. *International Journal of Agriculture: Research and Review*, 2(3), 205-210.
8. Bates, L.S., Waldren, R.P., & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
9. Blum, A., & Ebercon, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. *Crop Science*, 21, 43-47. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100010013x>
10. Cheng, L., Han, M., Yang, L.M., Yang, L., Sun, Z., & Zhang, T. (2018). Changes in the physiological characteristics and baicalin biosynthesis metabolism of *Scutellaria baicalensis* Georgi under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 122, 473-482. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.030>
11. De Herralde, F. (2000). Integral study of the eco physiological responses to water stress: Characterization of almond varieties. *Nucis-Newsletter*, 9, 20-21.
12. Elfeel, A.A., & Al-Namo, M.L. (2011). Effect of imposed drought on seedlings growth, water use efficiency and survival of three arid zone species (*Acacia tortilis* subsp raddiana, *Salvadora persica* and *Leptadenia pyrotechnica*). *Agriculture and Biology Journal of North America*, 2, 493-498. <http://doi.org/10.5251/abjna.2011.2.3.493.498>
13. Fathi, H., Amiri, M., Imani, A., Nikbakht, J., & Hajilou, J. (2019). Investigation on the changes of some biochemical traits of almond genotypes leaves under drought stress on the GN15 rootstock. *Journal of Plant Process and Function*, 8(29), 15-30.
14. Gholami, A., Sharafi, S., & Abbasdokht, H. (2010). Effects of salinity and drought levels in seed germination of five crop species. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 68, 935-938.
15. Gispert, J.R., & Vargas, F.J. (2011). Assessment of drought tolerance in almond varieties. *Acta Horticulture*, 912, 121-127. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.912.17>

16. Gohari, S., Imani, A., Talaei, A.R., Abdossi, V., & Asghari, M.R. (2023). Physiological responses of almond genotypes to drought stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 70, 1-11. <https://doi.org/10.1134/S1021443723601751>.
17. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125, 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
18. Isaakidis, A., Sotiropoulos, T., Almaliotis, D., Therios, I., & Stylianidis, D. (2004). Response to severe water stress of the almond *Prunus amygdalus*. 'Ferragnes' grafted on eight rootstocks. *New Zealand Journal Crop and Horticultural Science*, 32, 355-362. <https://doi.org/10.1080/01140671.2004.9514316>
19. Jaafar, H.Z.E., Ibrahim, M.H., & Karimi, E. (2012). Phenolics and flavonoids compounds, phenylalanine ammonia lyase and antioxidant activity responses to elevated CO₂ in *Labisia pumila* (Myrsinaceae). *Molecules*, 17, 6331-6347. <https://doi.org/10.3390/molecules17066331>
20. Jamalluddin, N., Massawe, F.J., Mayes, S., Ho, W.K., Singh, A., & Symonds, R.C. (2021). Physiological screening for drought tolerance traits in vegetable amaranth (*Amaranthus tricolor*) germplasm. *Agriculture*, 11, 994. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100994>
21. Javadi, T., Rohollahi, D., Ghaderi, N., & Nazari, F. (2017). Mitigating the adverse effects of drought stress on the morpho-physiological traits and anti-oxidative enzyme activities of *Prunus avium* through β -amino butyric acid drenching. *Scientia Horticulturae*, 218, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.019>
22. Karimi, S., Yadollahi, A., & Arzani, K. (2013). Responses of almond genotypes to osmotic stress induced *in vitro*. *Journal of Nuts*, 4(4), 1-7. <https://doi.org/10.22034/jon.2013.515700>
23. Karimi, S., Yadollahi, A., Arzani, K., Imani, A., & Aghaalkhani, M. (2015). Gas-exchange response of almond genotypes to water stress. *Photosynthetica*, 53, 29-34. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0070-0>
24. Kovalikova, Z., Jiroutova, P., Toman, J., DobroVolna, D., & Drbohlavova, L. (2020). Physiological responses of apple and cherry *in vitro* culture under different levels of drought stress. *Agronomy*, 10, 1689. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111689>
25. Lichtenthaler, H.K., & Wellburn, A.R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591.
26. Liu, C., Liu, Y., Guo, K., Fan, D., Li, G., Zheng, Y., Yu, L., & Yang, R. (2011). Effect of drought on pigments, osmotic adjustment and antioxidant enzymes in six woody plant species in Karst habitats of southwestern China. *Environmental and Experimental Botany*, 71, 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.11.012>
27. López-López, M., Espadador, M., Testi, L., Lorite, I.J., Orgaz, F., & Fereres, E. (2018). Water use of irrigated almond trees when subjected to water deficits. *Agricultural Water Management*, 195, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.001>
28. Mansourmoghaddam, M., Rousta, I., Zamani, M., Mokhtari, M.H., Karimi Firozjaei, M., & Alavipanah, S.K. (2021). Study and prediction of land surface temperature changes of Yazd city: Assessing the proximity and changes of land cover. *Journal of Remote Sensing and GIS for Natural Resources*, 12, 127.
29. Moradi, H., Esna-Ashari, M., & Ershadi, A. (2019). Evaluation of some physiological responses to drought stress in grafted and ungrafted almond rootstocks. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 50(2), 311-323. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.246776.1356>
30. Mousavi, A., Tatari, M., Mehnatkesh, A.M., & Haghighati, B. (2009). Vegetative growth response of young seedlings of five almonds cultivars to water deficit. *Seed and Plant Improvement Journal*, 25, 551-567. (in Persian with English abstract)
31. Nie, W., Gong, B., Chen, Y., Wang, J., Wei, M., & Shi, Q. (2018). Photosynthetic capacity, ion homeostasis and reactive oxygen metabolism were involved in exogenous salicylic acid increasing cucumber seedlings tolerance to alkaline stress. *Scientia Horticulturae*, 235, 413-423. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.011>
32. Okunlola, G.O., Olatunji, O.A., Akinwale, R.O., Tariq, A., & Adelusi, A.A. (2017). Physiological response of the three most cultivated pepper species (*Capsicum spp.*) in Africa to drought stress imposed at three stages of growth and development. *Scientia Horticulturae*, 224, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.06.020>
33. Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L.S.P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1-7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>
34. Ranjbar, A., Imani, A., Piri, S., & Abdoosi, V. (2022). Grafting commercial cultivars of almonds on accurate rootstocks mitigates adverse effects of drought stress. *Scientia Horticulturae*, 293, 110725. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110725>
35. Rao, P.B., Kaur, A., & Tewari, A. (2008). Drought resistance in seedlings of five important tree species in Tarai region of uttarakhand. *Tropical Ecology*, 49, 43-49.

36. Safavi, E., Yadegari, M., Mousavi, S.A., & Haghighati, B. (2023). Investigation the different levels of drought stress on almond cultivars. *Journal of Horticultural Science*, 37(2), 523-540. <https://doi.org/10.22067/jhs.2022.77478.1184>
37. Sarker, U., & Oba, S. (2018). Drought stress effects on growth, ROS markers, compatible solutes, phenolics, flavonoids, and antioxidant activity in *Amaranthus tricolor*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 186, 999-1016. <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2784-5>
38. Schlemmer, M.R., Francis, D.D., Shanahan, J., & Schepers, J.S. (2005). Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Agronomy Journal*, 97, 106-112. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0106>
39. Sinha, R., Zandalinas, S.I., Fichman, Y., Sen, S., Zeng, S., Gómez-Cadenas, A., Joshi, T., Fritschi, F.B., & Mittler, R. (2022). Differential regulation of flower transpiration during abiotic stress in annual plants, *New Phytologist*, 235, 611. <https://doi.org/10.1111/nph.18162>
40. Zhang, C., Shi, S., Liu, Z., Yang, F., & Yin, G. (2019). Drought tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties is associated with enhanced anti-oxidative protection and declined lipid peroxidation. *Journal of Plant Physiology*, 232, 226-240. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.10.023>