University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 17, No. 3, pp. 619-637 (Fall 2024)

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6308.2204

Original article

Impact of drought stress on some growth and phytochemical characteristics of the coneflower (*Echinacea purpurea* L.)

R. Tavosi[1], M. Sayyari[2*], A. Azizi[2]

1. Former Ms.c Student of Horticultural Science Department, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2. Associated Professors, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran

Received 19 April 2023; Accepted 8 August 2023

Extended abstract

Introduction

E. purpurea is a plant that blooms in North America during the summer. It is essential for the pharmaceutical industry because it boosts the immune system and can be used for various external and internal ailments. Abiotic stresses like drought are significant problems for plant productivity. Many studies have been done on how these stresses affect agricultural plants because they cause economic losses. Drought affects plant growth and development by reducing crop growth rate, biomass accumulation, cell division and expansion, leaf size, stem elongation, root proliferation, and stomata oscillations. Although the effect of drought stress on various characteristics of coneflower has been studied in many research, few researchers have investigated the changes in the essential oil content of this important medicinal plant under drought stress. Due to a water shortage in Iran and the growing use of herbal medicines, studying how drought stress affects the composition of coneflower essential oil is crucial.

Materials and methods

This research was carried out in 2021 in the greenhouse of the Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. The study was done as a factorial based on a completely random design with two factors of drought stress (80, 60, and 40% FC) and growth stage (10 leaves, pre-flowering, and flowering stage) in three replications. Took coneflower seeds were planted in cultivation trays. After 60 days, the seeds germinated, and the seedlings were prepared and transferred to pots. The weight method was used to determine soil moisture content. The pots were weighed daily and watered to maintain the intended level of irrigation. After the drought stress period ended, the plants with their roots were transferred to the lab, and some growth, biochemical, and phytochemical characteristics were measured.

Results and discussion

The results of the analysis of variance showed that the interaction effect of irrigation levels and phenological stages was significant for the characteristics of leaf area, stem length, flower diameter, flower dry weight, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid and total phenol and flavonoid of the flower and root. The results showed that drought stress caused a significant decrease in the growth characteristics, chlorophyll a, carotenoid, and increased chlorophyll b content of coneflower in different

* Corresponding author: Mohammad Sayyari; E-Mail: m.sayyari@basu.ac.ir

© 2024, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

stages of growth. The concentration of coneflower's total phenol and flavonoid under severe drought stress increased by 37.58 and 25.67, respectively. Also, the antioxidant capacity of the coneflower flower increased under severe drought stress, but drought stress did not affect the antioxidant capacity of the roots. In addition, the results showed that more than 70% of the essential oil components at the time of applying the control in the 10-leaf and pre-flowering stage, and severe stress in all three stages of growth consisted of four compounds: Germacrene D, n-Dodecane, n-Tridecane, and n-Undecane. Compared to the control, most of the essential compounds of coneflower under severe drought stress decreased in the 10-leaf growth stages and pre-flowering but increased in the flowering stage. Severe drought stress caused a decrease in Germacrene D in the 10-leaf and flowering stages (41.6 and 41.3%, respectively) and increased it in the pre-flowering stage (77.2%). During drought conditions, plants reduce the number and area of their leaves as an adaptation strategy and first defense mechanism. Plants exposed to environmental stress can increase their stress tolerance by producing more phenol, flavonoid, and antioxidants. These non-enzymatic antioxidants help reduce the adverse effects of stress on plants. Based on the findings of various research, it can be said that Germacrene D, Spathulenol, β-Caryophyllene, and α-Humulene are the main components of the essential oil of coneflower. In agreement with our results, the research findings showed that severe drought stress (40% FC) caused a significant decrease in the phytochemical compounds of coneflower. Secondary metabolites are influenced not only by genetics but also by changing environmental patterns.

Conclusion

With increasing drought stress levels, growth characteristics, chlorophyll a, carotenoid, and root total phenolic content of coneflower decreased significantly. Also, drought stress increased stem diameter, chlorophyll b, total phenol content, total flavonoid, and antioxidant capacity of flowers. Under severe drought stress, four compounds of Germacern D, N-dodecane, N-tridecane, and N-one-decane, which are the dominant components of the root essential oil of this plant in the present study, decreased in the 10-leaf and flowering stages but increased in the pre-flowering stage. In general, it can be concluded from the current research results that applying drought stress can help improve coneflower root essential oil composition.

Keywords: Essential oil content, Germacrene D, Photosynthetic pigments, Total phenolic contents

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد هفدهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۳

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6308.2204

مقاله پژوهشی

اثر تنش خشکی بر برخی ویژگی‌های رشدی و فیتوشیمیایی گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.)

رضوانه طاووسی[۱]، محمد سیاری[۲*]، علی عزیزی[۲]

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۲. دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
جرماکرن دی
رنگیزه‌های فتوسنتزی
محتوای اسانس
محتوی فنل کل

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۵/۱۷

تاریخ انتشار:
پائیز ۱۴۰۳
۱۷(۳): ۶۱۹-۶۳۷

چکیده

در این پژوهش، اثر تنش خشکی در مراحل مختلف بر خصوصیات رشدی و فیتوشیمیایی گیاه سرخارگل موردبررسی قرار گرفت. گیاهان در مرحله ۱۰ برگی، قبل از گلدهی و گلدهی تحت تنش خشکی قرار گرفتند. آبیاری شامل سه سطح بدون تنش (شاهد)، تنش ملایم و تنش شدید (به ترتیب آبیاری در ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهمکنش سطوح آبیاری و مراحل رشد برای ویژگی‌های سطح برگ، طول ساقه، قطر گل، وزن خشک گل، کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید و فنل و فلاونوئید کل گل و ریشه معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار ویژگی‌های رشدی، کلروفیل a، کاروتنوئید و افزایش محتوای کلروفیل b گیاه سرخارگل در مراحل مختلف رشد گردید. غلظت فنل کل و فلاونوئید کل در کاپیتول، تحت تنش شدید خشکی به ترتیب به میزان ۳۷/۵۸ و ۲۵/۶۷ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل تحت تنش شدید خشکی افزایش پیدا کرد ولی تنش خشکی تأثیری بر میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ریشه نداشت. افزون بر این بیش از ۷۰ درصد اجزاء اسانس در زمان اعمال تنش ملایم در مراحل ۱۰ برگی و قبل از گلدهی و تنش شدید در هر سه مرحله رشد را چهار ترکیب جرماکرن دی، اِن‌دُدکان، اِن‌تری دکان و اِن‌اُن دکان تشکیل دادند. در مقایسه با شرایط تنش ملایم، بیش‌تر ترکیبات اسانس سرخارگل با اعمال تنش شدید در مراحل رشدی ۱۰ برگی و قبل از گلدهی کاهش یافت اما در مرحله گلدهی افزایش پیدا کردند. تنش خشکی شدید باعث کاهش ترکیب جرماکرن دی در مراحل ۱۰ برگی و گلدهی (به ترتیب به میزان ۴۱/۶ و ۴۱/۳ درصد) و افزایش آن در مرحله قبل از گلدهی (۷۷/۲ درصد) گردید.

مقدمه

گیاه دارویی سرخارگل با نام علمی *Echinacea purpurea*، از گیاهان بومی آمریکای شمالی است که از اوایل تا اواخر تابستان شکوفا شده و به دلیل اثرات تحریکی بر سیستم ایمنی بدن، ازنظر اقتصادی برای صنعت داروسازی مهم است (Wang et al., 2014). کاربرد خارجی این گیاه برای درمان زخم‌ها، سوختگی‌ها و نیش حشرات و مصرف خوراکی آن برای تسکین درد، سرفه، یبوست و مارگزیدگی مورداستفاده قرار می‌گیرد (Wang et al., 2014). همچنین به‌صورت گسترده از ریشه و اندام‌های هوایی آن نظیر برگ، ساقه و گل برای تولید ترکیبات آرایشی و بهداشتی استفاده می‌شود. ترکیبات تشکیل‌دهنده گیاه سرخار گل از طریق تقویت سیستم ایمنی بدن (افزایش تعداد گلبول‌های سفید و سلول‌های طحال و افزایش فعالیت تنفسی) باعث درمان عفونت‌های ریوی و بیماری‌های مزمن ناشی از نقص ایمنی بدن می‌گردد (Tsai et al., 2012; Blumenthal et al., 2011; Manayi et al., 2015).

مشخص شده است که پلی‌ساکاریدها، پلی‌استیلن‌ها، آلکالوئیدها، مشتقات اسید کافئیک، گلیکوپروتئین‌ها و

* نگارنده پاسخگو: محمد سیاری. پست الکترونیک: m.sayyari@basu.ac.ir

فلاونوئیدها از ترکیبات زیستی تشکیل‌دهنده اندام‌های گیاه سرخارگل می‌باشند (Landy et al., 2011; Barnes et al., 2005). افزون بر این، جرماکرن دی، اسپاتولنول، بتاکاریوفیلن و هومولون از اجزاء اصلی اسانس این گیاه دارویی می‌باشند (Mirjalili et al., 2006; Mousavi et al., 2019; Thomsen et al., 2012). بسیاری از گیاهان به‌منظور کاهش آسیب‌های ناشی از تنش، مواد مؤثره خود را در پاسخ به تنش خشکی افزایش می‌دهند (Thakur et al., 2019). اعمال تنش خشکی برای افزایش ترکیبات اسانس گیاهان دارویی به‌صورت گسترده در حال انجام است (Caser et al., 2019). افزون بر شدت تنش خشکی، مرحله رشدی که گیاه با تنش مواجه می‌شود نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در برخی از مراحل رشد، تنش خشکی بحرانی است و گیاه توانایی مقابله با تنش را ندارد، درحالی‌که در برخی دیگر از مراحل رشد، گیاه از طریق افزایش میزان متابولیت‌های ثانویه پاسخ بهتری به تنش خشکی می‌دهد و به میزان کم‌تری تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Sayyari et al., 2022).

گیاهان در طول رشد و نمو در شرایط طبیعی و زراعی در معرض تنش‌های محیطی مختلف قرار می‌گیرند. تنش‌های غیرزیستی نظیر خشکی، شوری و گرما از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و بهره‌وری گیاهان در نظر گرفته می‌شوند (Tzortzakis et al., 2020). تنش خشکی مهم‌ترین تنش غیر زیستی است که رشد و نمو گیاهان را با کاهش قابل‌توجهی در سرعت رشد محصول و تجمع زیست‌توده تحت تأثیر قرار می‌دهد (Carraro and Di Iorio, 2022). خصوصیات مختلف بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی، رشدی، مولکولی و اکولوژیکی گیاهان تحت شرایط تنش خشکی مختل (Ortiz et al., 2015) و عملکرد و کیفیت آن‌ها به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Battaglia et al., 2018). افزون بر سن و گونه گیاهی، شدت و مدت خشکی، مرحله رشد عامل مهمی است که بر پاسخ گیاه به خشکی تأثیر می گذارد. مکانیسم تحمل به تنش کم‌آبی در بین گیاهان متفاوت است. برای مقابله با شرایط نامطلوب محیطی مانند خشکی، گیاهان این قابلیت را دارند که استفاده از منابع غذایی خود را کاهش داده و رشد خود را تنظیم کنند (Bielach et al., 2017).

با ممانعت از بزرگ شدن و تقسیم سلولی، تنش خشکی رشد گیاهچه را مختل می‌کند (Jabbari et al., 2013). دلایل عمده کاهش ارتفاع گیاه در شرایط خشکی، ممانعت از بزرگ شدن سلول، افزایش ریزش برگ و اختلال در مراحل مختلف تقسیم سلول می‌باشند (Yang et al., 2021). کاهش اندازه، سطح و تعداد برگ‌ها و کاهش طول و قطر ساقه تغییرات عمده رشدی در گیاه هستند که تحت تنش خشکی اتفاق می‌افتند (Hewedy et al., 2020). همچنین درصورتی‌که گیاهان از ابتدای رشد با شرایط خشکی مواجه شوند، تعداد گل‌ها و زیست‌توده تازه و خشک آن‌ها با کاهش قابل‌توجه مواجه خواهد شد. ریشه‌ها شرایط کمبود آب خاک را تشخیص داده و چندین سیگنال مولکولی را به سمت اندام‌های هوایی می‌فرستند. اسید آبسیزیک که مهم‌ترین هورمون درگیر در تنش خشکی است با بستن روزنه‌ها و سنتز بیان ژن‌های پاسخ‌دهنده به تنش در برگ‌ها، باعث ایجاد مقاومت در برابر تنش خشکی می‌گردد (Takahashi et al., 2020). تغییرهای بیوشیمیایی ایجادشده به‌وسیله تنش کم‌آبی شامل کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی، افزایش تنظیم‌کننده‌های اسمزی و هورمون اسید آبسیزیک، تولید آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و سنتز گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن است (Hewedy et al., 2020). در گیاه سرخارگل تنش خشکی بیوسنتز کلروفیل را مهار و عملکرد فتوسنتز را کاهش داده و منجر به تولید گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن می‌شود (Khorasaninejad et al., 2018; Attarzadeh et al., 2019). گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن در جریان واکنش‌های انتقال الکترون فتوسنتزی در شرایط یک سیستم جریان الکترونی بالا با کاهش اندازه مخزن گیرنده‌های الکترون تولید می‌شوند؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین آسیب‌های تنش خشکی، کاهش میزان کلروفیل در برگ‌ها است (Azzeme et al., 2016). پراکسید هیدروژن که یکی از مهم‌ترین گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن است، تحت تنش خشکی در گیاه سرخارگل افزایش پیدا کرده و باعث بالا رفتن میزان مالون دی‌آلدئید و نشت یونی می‌شود (Hosseinpour et al., 2020). فنل‌های کل که تحت عنوان متابولیت‌های ثانویه شناخته می‌شوند از متابولیسم فنیل پروپانوئید در مسیر شیکمیک اسید در گیاهان سنتز می‌شوند و با حذف گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن و ممانعت از تجزیه هیدروپرواکسیدازها به رادیکال‌های آزاد، باعث افزایش تحمل گیاهان به شرایط تنش خشکی می‌شوند (Vogt, 2010; Razali et al., 2008). خراسانی‌نژاد و همکاران (Khorasaninejad et al., 2018) گزارش کردند که میزان فنل و فلاونوئید کل گیاه سرخارگل نیز تحت تنش خشکی با افزایش مواجه می‌گردد که با حذف

رادیکال‌های آزاد اکسیژن، باعث بهبود تحمل بهتر گیاه به شرایط خشکی می‌شود.

اگرچه تأثیر تنش خشکی بر ویژگی‌های مختلف گیاه دارویی سرخارگل در پژوهش‌های متعددی موردمطالعه قرارگرفته‌اند، ولی پژوهش‌های اندکی تغییر ترکیبات اسانس این گیاه مهم دارویی را تحت تنش خشکی موردبررسی قرار داده‌اند. گزارش‌های مختلفی در مورد تأثیر تنش خشکی بر اسانس گیاهان دارویی وجود دارد. تنش خشکی باعث افزایش میزان اسانس آویشن دنایی[1] و زیره سیاه ایرانی[2] و سرخارگل گردید (Bahreininejad et al., 2013; Saeidnejad et al., 2013; Mousavi et al., 2019). در پژوهشی که روی گیاه بادرنجبویه[3] صورت گرفت، مشخص گردید که میزان اسانس تحت تنش ملایم خشکی افزایش ولی در معرض تنش شدید خشکی به‌صورت معنی‌داری با کاهش مواجه گردید (Abbaszadeh et al., 2008). کاهش محتوای اسانس تحت تنش خشکی ممکن است به دلیل اختلال در فتوسنتز و تولید کربوهیدرات در شرایط تنش و سرکوب رشد گیاه باشد (Flexas and Medrano, 2002). نتایج پژوهشی که تأثیر تنش خشکی بر میزان ترکیبات فیتوشیمیایی گیاه سرخار گل را موردبررسی قرار داد، نشان داد که تنش شدید خشکی (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) باعث کاهش معنی‌دار ترکیبات فیتوشیمیایی نظیر شیکوریک اسید، کلروژنیک اسید و کافئیک اسید گردید (Khorasaninejad et al., 2018). با توجه به کمبود آب به وجود آمده در کشور و همچنین افزایش روزافزون استفاده از گیاهان دارویی و استفاده گسترده سرخارگل در صنعت گیاهان دارویی و نیاز کشور به تولید آن، بررسی تغییر ویژگی‌های رشدی، فیتوشیمیایی و همچنین ترکیبات اسانس ریشه گیاه سرخارگل که یکی از مهم‌ترین اندام‌های آن برای تولید ترکیبات دارویی، آرایشی و بهداشتی است در شرایط تنش خشکی ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش تأثیر تنش خشکی در مراحل مختلف رشد (۱۰ برگی، قبل از گلدهی و گلدهی) بر ویژگی‌های رشدی، بیوشیمیایی و همچنین اجزاء اسانس ریشه گیاه سرخارگل موردمطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت گلدانی در سال ۱۳۹۹ در گلخانه گروه علوم باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا انجام شد. پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل سطح آبیاری و مرحله رشد در سه تکرار انجام شد. سطوح آبیاری شامل سه سطح بدون تنش (شاهد)، تنش ملایم و تنش شدید (به ترتیب آبیاری در ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) و مراحل رشدی اعمال تنش خشکی شامل مرحله ۱۰ برگی گیاه، مرحله قبل از ظهور ساقه گل‌دهنده و شروع مرحله گل‌دهی بودند. تیمارهای تنش خشکی بر اساس روش وزنی انجام شد. پس از وزن کردن گلدان‌های خالی، در کف هر گلدان به مقدار مساوی سنگ‌ریزه جهت انجام زهکشی بهتر ریخته شد و به‌صورت هم‌وزن با مخلوط خاک مزرعه، کود حیوانی و ماسه به نسبت ۱:۱:۲ پر شدند. وزن گلدان با سنگ‌ریزه و خاک خشک ۴۸۰۰ گرم بود. گلدان‌های پلاستیکی مورداستفاده یکسان، با قطر دهانه ۱۹/۵ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر (شماره ۲۰) بودند (شکل ۱). برخی از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی خاک مورداستفاده در جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۱. طرح آزمایشی مورداستفاده در بررسی اثر تنش خشکی در مراحل مختلف فنولوژیکی بر برخی ویژگی‌های رشدی و فیتوشیمیایی گیاه دارویی سرخارگل

Fig. 1. The experimental design used in the effect of drought stress on some growth and phytochemical characteristics of coneflower in different phenological stages

تعداد ۱۰ گلدان بدون کشت گیاه جهت محاسبه رطوبت خاک در نظر گرفته شدند. در این گلدان‌ها با افزودن آب تا زمانی که آب از زهکش گلدان‌ها خارج شود، خاک هر گلدان

[1] *Thymus daenensis*
[2] *Bunium persicum*
[3] *Melissa officinalis*

به درجه اشباع رسانده و به مدت ۷۲ ساعت روی سطح مشبک قرار داده شد تا پس از زهکشی آب اضافی، گلدان به ظرفیت زراعی برسد. در این مرحله، از گلدان‌هایی که برای آزمایش خاک در نظر گرفته شده بودند، یک نمونه خاک برداشته شد و در آون ۷۵ درجه سانتی‌گراد کاملاً خشک گردید. پس از مشخص شدن درصد وزنی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی، میزان رطوبت موجود در خاک برای اعمال تیمارهای رطوبتی مختلف مشخص گردید. وزن نهایی گلدان در ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۵۸۶۰، ۵۶۰۰ و ۵۳۴۰ گرم بود.

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی خاک مورداستفاده.

Table 1. Some physical and hydrological characteristics of the used soil.

مشخصه traits	آب در دسترس Available water	نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point	ظرفیت زراعی Field capacity	بافت خاک Soil texture	رس Clay	شن Sand	سیلت Silt
Amount(%)	0.14	8.9	22.9	Sandy- loam	19.14	51.86	29

گلدان‌ها به‌صورت روزانه توزین می‌شدند. جهت اعمال صحیح سطوح آبیاری، هر تیمار رطوبتی دارای گلدان اضافی بود تا افزایش وزن بوته‌ها در طول دوره پژوهش محاسبه و به وزن گلدان‌ها افزوده شود (Khorasaninejad et al., 2018). بذرهای گیاه سرخارگل از باغ گیاهان دارویی استان همدان خریداری و در تاریخ ۱۹ بهمن ۱۳۹۸ در سینی‌های کشت کاشته شدند. در تاریخ ۱۸ اسفند ۱۳۹۸ جوانه‌زنی بذرها صورت گرفت و پس از گذشت ۶۰ روز نشاءها آماده‌شده و سپس آماده‌سازی گلدان‌ها انجام و نشاءها منتقل شدند. در هر گلدان یک عدد نشاء کاشته شد. پس از استقرار نشاءها تا رسیدن به زمان تنش که ۵۰ روز طول کشید، آبیاری به‌صورت یکسان انجام شد. تنش خشکی از زمان ده برگی نشاء آغاز و به مدت ۷ ماه در طی سه مرحله مختلف رشدی اعمال گردید. برداشت نمونه‌ها در پایان مرحله گلدهی صورت گرفت.

اندازه‌گیری ویژگی‌های رشدی

بعد از پایان ۷ ماه تنش خشکی، بوته‌ها همراه با ریشه از گلدان خارج شدند. از سطح خاک تا ابتدای گل تحت عنوان طول ساقه با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. قطر ساقه و گل‌ها نیز با کولیس اندازه‌گیری گردید. برای تعیین وزن تر اندام هوایی، ریشه و گل، از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم، استفاده شد. ریشه و گل گیاهان سرخارگل به مدت یک هفته تا خشک شدن کامل و رسیدن به وزن ثابت در شرایط سایه قرار گرفتند و سپس وزن آن‌ها با ترازوی دیجیتالی تعیین و برحسب گرم گزارش گردید. برای اندازه‌گیری سطح برگ، از هر گلدان چند برگ کاملاً بالغ و رشد کرده جدا و توسط اسکنر (HP Scanjet G2410 Photoscanner, Japan) اسکن گردید و با نرم‌افزار ImageJ آنالیز شد. میانگین سطح برگ‌های اندازه‌گیری شده هر تیمار به‌عنوان سطح برگ آن تیمار در نظر گرفته و برحسب سانتی‌متر مربع در بوته گزارش گردید.

رنگیزه‌های فتوسنتزی

برای اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی از روش پورا (Porra, 2002) استفاده شد. جذب نمونه‌ها در طول‌موج‌های ۶۶۴، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV- 1280، شیمادزو، ژاپن) قرائت گردید. درنهایت با استفاده از رابطه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ میزان کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید بر اساس میلی‌گرم در گرم وزن تازه محاسبه گردید.

$$\text{کلروفیل } a = (۱۲/۲۵ \times A_{۶۶۴}) - (۲/۵۵ \times A_{۶۴۵}) \times v/۱۰۰۰W \quad [۱]$$

$$\text{کلروفیل } b = (۲۰/۳۱ \times A_{۶۴۵}) - (۴/۹۱ \times A_{۶۶۴}) \times v/۱۰۰۰W \quad [۲]$$

$$\text{کلروفیل کل} = (۱۷/۷۶ \times A_{۶۴۵}) + (۷/۳۴ \times A_{۶۶۴}) \times v/۱۰۰۰W \quad [۳]$$

$$\text{کارتنوئید} = (۴/۶۹ \times A_{۴۷۰}) - (۰/۲۶۷ \times chla + chl\ b) \times v/۱۰۰۰W \quad [۴]$$

که در این معادلات، v: حجم نهایی عصاره و w: وزن نمونه (گرم) هستند

فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

برای اندازه‌گیری مقدار فنل کل از روش فولین-سیکالتیو استفاده شد (Tezcan et al., 2009). میزان فلاونوئید کل با استفاده از روش نورسنجی کلرید آلومینیوم تعیین گردید (Choi et al., 2002). همچنین میزان ظرفیت

آنتی‌اکسیدانی با استفاده از روش سنجش مهارکنندگی رادیکال‌های ۲ و ۲- دی فنیل پیکریل هیدرازیل (DPPH) با اندکی تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفت (Eberhardt et al., 2000). شدت جذب نمونه‌های فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی به ترتیب در طول‌موج‌های ۷۶۰، ۵۱۰ و ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV- 1280، شیماتزو، ژاپن) قرائت گردید.

استخراج، جداسازی و شناسایی ترکیبات تشکیل‌دهنده اسانس

برای استخراج اسانس از روش تقطیر با آب استفاده شد. به‌منظور استخراج اسانس، ریشه‌ها در شرایط سایه خشک شدند. مقدار معینی از ریشه گیاه سرخارگل به همراه آب مقطر (۱۰ برابر وزن نمونه) در داخل بالن ریخته شد. سپس بالن به دستگاه اسانس‌گیر (کلونجر) متصل شد و عمل تقطیر به مدت سه ساعت انجام و اسانس استخراج شد. نمونه‌های اسانس به دستگاه کروماتوگرافی تزریق شدند. جداسازی و شناسایی ترکیبات اسانس با دستگاه‌های کروماتوگرافی گازی و کروماتوگرافی متصل به طیف‌سنج جرمی (مدل A۷۸۹۰، اجیلنت، آمریکا)، در آزمایشگاه شیمی موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور انجام گرفت. ترکیبات اسانس دو سطح خشکی ۸۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی در سه مرحله رشد ۱۰ برگی، قبل از گلدهی و گلدهی شناسایی شدند.

پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل سطح آبیاری (سه سطح) و مرحله رشدی اعمال تنش خشکی (سه سطح) در سه تکرار اجرا شد. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام و میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

تعداد برگ، سطح برگ، ارتفاع بوته، طول و قطر ساقه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهمکنش سطوح آبیاری و مراحل رشد برای سطح برگ و طول ساقه در سطح یک درصد معنی‌دار شد ولی برای تعداد برگ، ارتفاع بوته و قطر ساقه معنی‌دار نشد (جدول ۲). همچنین اثر سطوح آبیاری برای تعداد برگ و ارتفاع بوته در سطح یک درصد و برای قطر ساقه در سطح پنج درصد و اثر مراحل رشد برای تعداد برگ در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). هر دو سطح تنش خشکی ملایم و شدید، باعث کاهش سطح برگ و طول ساقه گیاه سرخارگل در هر سه مرحله رشدی موردمطالعه شدند. همچنین تعداد و سطح برگ تحت تأثیر تنش ملایم و شدید خشکی به‌صورت قابل‌توجهی با کاهش مواجه شدند ولی تأثیر تنش شدید خشکی بر قطر ساقه معنی دار نبود (جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین سطح برگ و طول ساقه به ترتیب در شاهد × مرحله ۱۰ برگی (۶۳/۷ سانتی‌متر مربع در گیاه) و شاهد × مرحله گلدهی (با ۵۵/۰ سانتی‌متر) و کم‌ترین نیز در تیمار ۶۰ درصد تنش خشکی × مرحله قبل از گلدهی (۳۴/۷ سانتی‌متر مربع در گیاه) و ۴۰ درصد تنش خشکی × مرحله ۱۰ برگی (با ۱۴/۸ سانتی‌متر) مشاهده گردید (جدول ۳). افزون بر این، کم‌ترین تعداد برگ (با ۴۸/۷ در گیاه) و ارتفاع بوته (با ۵۷/۲۲ سانتی‌متر) گیاه سرخارگل در تنش شدید خشکی و کم‌ترین قطر ساقه نیز با ۵/۰۶ میلی‌متر در تنش ملایم خشکی مشاهده گردید (جدول ۳). تعداد برگ گیاه سرخارگل در سه مرحله رشدی ۱۰ برگی، قبل از گلدهی و گلدهی به ترتیب ۲۷/۶، ۳۳/۶ و ۳۹/۱ در گیاه بود (جدول ۳).

تعداد و قطر گل

اثر برهمکنش سطوح آبیاری و مراحل رشد برای قطر گل در سطح پنج درصد و همچنین اثر ساده سطوح آبیاری برای تعداد گل در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که هر دو سطح تنش ملایم و شدید خشکی به‌صورت معنی‌داری باعث کاهش تعداد گل (به ترتیب ۱۷/۶۸ و ۵۳/۷۰ درصد) شدند (جدول ۵). افزون بر این، سطوح تنش خشکی میزان قطر گل را به‌صورت معنی‌داری در هر سه مرحله رشدی کاهش دادند (جدول ۴).

تفاوت معنی‌داری بین مراحل رشدی قبل از گلدهی و گلدهی برای قطر گل در سطوح خشکی ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده نگردید. تعداد گل در سطوح خشکی ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۳/۱۱، ۲/۵۶ و ۱/۴۴ در گیاه بود (جدول ۵). بیش‌ترین میزان قطر گل نیز در تیمار ۶۰ درصد تنش خشکی×مرحله قبل از گلدهی (۹/۹ سانتی‌متر) و کم‌ترین نیز در تیمار ۴۰ درصد تنش خشکی× قبل از گلدهی (۷/۶ سانتی‌متر) مشاهده گردید (جدول ۵).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی بر تعداد برگ، سطح برگ، ارتفاع بوته، طول ساقه و قطر ساقه گیاه دارویی سرخارگل در مراحل مختلف رشد.

Table 2. Variance analysis of the effect of drought stress on the leaf number, leaf area, plant height, stem length, and stem diameter of coneflower in different phenological stages.

S.O.V	منابع تغییر	df	تعداد برگ Leaf number	سطح برگ Leaf area	ارتفاع بوته Plant height	طول ساقه Stem length	قطر ساقه Stem diameter
Replication	بلوک	2	39.90^{ns}	22536.82^{ns}	33.82^{ns}	41.35*	0.05^{ns}
Irrigation (I)	سطوح آبیاری	2	1882.95**	9381196.58**	2938.77**	2280.69**	1.52*
Phenological stage (P)	مراحل رشد	2	300.68**	2611852.10**	52.07^{ns}	94.49**	0.45^{ns}
I × P	سطوح آبیاری × مرحله رشد	4	20.90^{ns}	1933019.62**	31.69^{ns}	55.03**	0.97^{ns}
Error	خطا	16	22.17	78253.63	15.96	12.97	0.38
CV%	ضریب تغییرات	-	*14.09*	*5.98*	*10.48*	*8.67*	*11.19*

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد.

ns, *, and ** insignificant and significant at significance levels of 5 and 1%, respectively.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی (۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) بر تعداد برگ، سطح برگ، ارتفاع بوته، طول ساقه و قطر ساقه گیاه سرخارگل در مراحل مختلف رشد (ده برگی، قبل از گلدهی و گلدهی).

Table 3. Mean comparison of the effect of drought stress (80, 60, and 40% of FC) on the leaf number, leaf area, plant height, stem length, and stem diameter of coneflower in different phenological stages (10 leaf, pre-flowering, and flowering).

Treatments	ترکیب تیماری	تعداد برگ Leaf number	سطح برگ Leaf area	ارتفاع بوته Plant height	طول ساقه Stem length	قطر ساقه Stem diameter
		per plant	cm^2pl^{-1}	----------cm----------		mm
Drought stress percentage of FC (%FC)	تنش خشکی درصد ظرفیت زراعی					
80		48.7^{a}	58.12	57.22^{a}	52.63	5.77^{a}
60		31.7^{b}	38.32	35.91^{b}	32.30	5.06^{b}
40		19.9^{c}	43.88	21.29^{c}	21.25	5.76^{a}
Phenological stage (PS)	مراحل رشدی					
10 leaves	۱۰ برگی	27.6^{c}	52.55	37.64	34.31	5.68
Pre-flowering	قبل گلدهی	33.6^{b}	41.89	36.0	32.84	5.27
Flowering	گلدهی	39.1^{a}	45.87	40.76	39.04	5.63
Drought stress (%FC) × PS	برهمکنش ۲ فاکتور					
80 × 10 leaves		45.3	63.67^{a}	56.50	52.83^{a}	5.53
80 × Pre-flowering		47.7	53.46^{c}	55.00	50.10^{a}	5.42
80 × Flowering		53.0	57.21^{bc}	60.17	54.97^{a}	6.37
60 × 10 leaves		23.0	35.60^{e}	38.93	35.33^{b}	5.00
60 × Pre-flowering		34.5	34.70^{e}	30.80	27.17^{cd}	4.83
60 × Flowering		37.7	44.67^{d}	38.00	34.40^{b}	5.33
40 × 10 leaves		14.3	58.39^{b}	17.50	14.75^{e}	6.52
40 × Pre-flowering		18.7	37.52^{e}	22.27	21.25^{d}	5.57
40 × Flowering		26.7	35.72^{e}	24.10	27.75^{c}	5.20

حروف معنی‌دار فقط برای داده‌هایی قرار داده شد که بر اساس جدول تجزیه واریانس معنی‌دار شده بودند. حروف مشابه در هر ستون و گروه تیماری نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون دانکن می‌باشد.

Significance letters were placed only for the significant data based on the variance table analysis. Similar letters in each column and treatment group indicate the absence of a significant difference by using Duncan's test at $P \leq 0.05$.

وزن خشک گل و ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهمکنش سطوح آبیاری و مراحل رشد برای وزن خشک گل در سطح یک درصد و همچنین اثر ساده تیمارهای سطوح آبیاری و مراحل رشد برای وزن خشک ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که تنش شدید خشکی باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک گل گیاه سرخارگل در مراحل مختلف رشد گردید ولی تنش ملایم خشکی تأثیری بر آن نداشت (جدول ۵). همچنین میزان وزن خشک ریشه گیاه سرخارگل در تنش ملایم و شدید خشکی به ترتیب با کاهش ۷۱/۷۱ و ۵۰/۱۴ درصدی مواجه شد (جدول ۵). بیش‌ترین وزن خشک گل در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی × مرحله گلدهی (با ۶/۷ گرم در گیاه) و کم‌ترین نیز در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی ×۱۰ مرحله برگی (۱/۳ گرم در گیاه) مشاهده گردید (جدول ۵). افزون بر این، میزان وزن خشک ریشه گیاه سرخار گل در تنش ملایم و شدید خشکی به ترتیب ۱۲/۰۸ و ۷/۳۲ گرم در گیاه بود (جدول ۵).

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی بر تعداد گل، قطر گل، وزن خشک گل و وزن خشک ریشه گیاه دارویی سرخارگل در مراحل مختلف رشد.

Table 4. Variance analysis of the effect of drought stress on the flower number, flower diameter, flower dry weight, and root dry weight of coneflower in different phenological stages.

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	تعداد گل Flower number	قطر گل Flower diameter	وزن خشک گل Flower dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
Replication	بلوک	2	0.59^{ns}	31.98^{ns}	0.04^{ns}	0.94^{ns}
Irrigation (I)	سطوح آبیاری	2	6.48^{**}	422.56^{**}	35.28^{**}	125.40^{**}
Phenological stage (P)	مراحل رشد	2	0.59^{ns}	3.88^{ns}	1.80^{*}	24.20^{**}
I × P	سطوح آبیاری × مرحله رشد	4	2.12^{ns}	85.88^{*}	1.74^{*}	1.90^{ns}
Error	خطا	16	0.26	22.46	0.48	1.48
CV%	ضریب تغییرات	-	21.48	5.31	16.37	10.72

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** insignificant and significant at significance levels of 5 and 1%, respectively.

ویژگی‌های ریخت‌شناسی گیاهان در شرایط تنش خشکی، دچار تغییرات زیادی می‌گردد که برای بهبود کارایی مصرف آب از طریق فعال‌سازی واکنش‌های سازگار مفید است (Flexas et al., 2010). تنش خشکی با کاهش فشار تورژسانس باعث کاهش چشمگیر رشد و انبساط سلولی می گردد. این کاهش در رشد سلولی درنهایت منجر به کوتاه‌تر شدن گیاهان و افزایش پیری برگ می‌شود (Yang et al., 2021). در پژوهش حاضر، همه صفات رشدی گیاه سرخارگل نظیر تعداد و سطح برگ، ارتفاع گیاه، طول و قطر ساقه، تعداد و قطر گل و همچنین وزن خشک و گل ریشه تحت تنش خشکی در مراحل مختلف رشد با کاهش مواجه شدند (جداول ۳ و ۵) که این کاهش در زمان اعمال تنش در مراحل ۱۰ برگی و قبل از گلدهی بیش‌تر از مرحله گلدهی بود که با نتایج پژوهش‌های قبلی در گیاهان بالنگو (Omidi et al., 2018) و مفراح[1] (Sayyari et al., 2022) مطابقت دارد. یکی از راهکارهای گیاه در زمان وقوع تنش خشکی، کاهش تعداد و سطح برگ است. ازآنجایی‌که فتوسنتز در برگ انجام می‌شود، گیاهان با تعداد برگ بیش‌تر در شرایط تنش توانایی فتوسنتزی بالاتری دارند، اما این موضوع با تعرق بیش‌تر گیاه در این شرایط در تقابل است، بنابراین، باید بین کاهش میزان تعرق و سطح بحرانی برگ برای فتوسنتز تعادل پایداری وجود داشته باشد. وقتی این تعادل به دست نمی‌آید.

[1] *Nepeta crispa* L.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی (۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) بر تعداد گل، قطر گل، وزن خشک گل و وزن خشک ریشه گیاه سرخارگل در مراحل مختلف رشد (ده برگی، قبل از گلدهی و گلدهی).

Table 5. Mean comparison of the effect of drought stress (80, 60, and 40% of FC) on the flower number, flower diameter, flower dry weight, and root dry weight of coneflower in different phenological stages (10 leaf, pre-flowering, and flowering).

ترکیب تیماری Treatments		تعداد گل Flower number	قطر گل Flower diameter	وزن خشک گل Flower dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
		per plant	cm	----------g pl^{-1}----------	
Drought stress percentage of FC (%FC)	تنش خشکی درصد ظرفیت زراعی				
80		3.11^{a}	9.00	5.65	14.68^{a}
60		2.56^{b}	9.56	5.12	12.08^{b}
40		1.44^{c}	8.20	1.99	7.32^{c}
Phenological stage (PS)	مراحل رشدی				
10 leaves	۱۰ برگی	2.22	8.99	4.21	9.31^{c}
Pre-flowering	قبل گلدهی	2.22	8.93	3.83	11.47^{b}
Flowering	گلدهی	2.67	8.86	4.72	13.30^{a}
Drought stress (%FC) × PS	برهمکنش ۲ فاکتور				
80 × 10 leaves		3.00	8.69^{c}	5.32^{ab}	13.50
80 × Pre-flowering		3.00	9.21^{abc}	5.57^{ab}	14.55
80 × Flowering		3.33	9.11^{abc}	6.07^{a}	16.00
60 × 10 leaves		2.67	9.77^{ab}	6.00^{a}	9.43
60 × Pre-flowering		2.67	9.94^{a}	4.37^{b}	12.79
60 × Flowering		2.33	8.98^{bc}	5.00^{ab}	14.00
40 × 10 leaves		1.00	8.50^{cd}	1.31^{d}	5.00
40 × Pre-flowering		1.00	7.63^{d}	1.57^{d}	7.07
40 × Flowering		2.33	8.47^{cd}	3.10^{c}	9.90

حروف معنی‌دار فقط برای داده‌هایی قرار داده شد که بر اساس جدول تجزیه واریانس معنی‌دار شده بودند. حروف مشابه در هر ستون و گروه تیماری نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

Significance letters were placed only for the significant data based on the variance table analysis. Similar letters in each column and treatment group indicate the absence of a significant difference by using Duncan's test at P≤0.05.

مزیت کاهش تعرق با عدم دسترسی کافی به مواد جذب‌شونده، از بین می‌رود (Flexas et al., 2010). کاهش سطح برگ تحت تنش خشکی در مرحله گلدهی به این دلیل است که بخش مهمی از رشد رویشی گیاه در مرحله زایشی اتفاق می‌افتد و وجود تنش در این مرحله نیز بر تولید سطح برگ اثر می‌گذارد و باعث تسریع پیری گیاه می‌گردد (Tavakoli et al., 1989). کوتاه‌تر بودن ارتفاع بوته سرخارگل تحت تنش خشکی در مراحل مختلف رشد نشان‌دهنده این است که گیاه سرخارگل از همان ابتدای رشد، بسته به وجود منابع غذایی، میزان رشد خود را تنظیم می‌کند که با نتایج پژوهش‌های دیگر در گیاه سرخارگل هم‌خوانی دارد (Alizadeh Ahmadabadi and Khorasaninejad, 2016). سیاری و همکاران (Sayyari et al., 2022) نیز گزارش کردند که اعمال تنش خشکی در مراحل مختلف رشد گیاه مفراح، تأثیر متفاوتی بر ویژگی‌های رویشی آن گذاشت. افزون بر این، هماهنگ با نتایج موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2019)، تعداد و قطر گل تحت تنش خشکی با کاهش معنی‌داری مواجه گردید. عوامل مختلفی بر رشد ریشه‌ها تأثیرگذار هستند، ولی بر اساس نتایج پژوهش‌ها، پاسخ رشد ریشه به کمبود آب به مدت‌زمان اعمال آن و مقدار تخصیص قندها بستگی دارد (Xu et al., 2015). همچنین کاهش مقدار ماده خشک اندام‌های زیرزمینی ممکن است به دلیل کاهش غلظت نشاسته باشد (Wissuwa et al., 2005). کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه در اثر تنش خشکی هم در سرخارگل و هم در گیاهان دیگر گزارش شده است (Mahdavian et al., 2021; Khorasaninejad et al., 2018) که با یافته‌های پژوهش حاضر هماهنگی دارد.

رنگیزه‌های فتوسنتزی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر برهمکنش سطوح آبیاری و مراحل رشد برای رنگدانه‌های فتوسنتزی کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید در سطح یک درصد معنی‌دار شد ولی برای کلروفیل کل معنی‌دار نشد (جدول ۶). افزون بر این اثر ساده سطوح آبیاری و مراحل رشد نیز برای کلروفیل کل معنی دار نشدند (جدول ۶).

تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار میزان کلروفیل a کاروتنوئید و افزایش میزان کلروفیل b در گیاه سرخارگل در مراحل مختلف رشد گردید. نتایج نشان داد که تنش خشکی ملایم میزان کلروفیل a را در مراحل رشد ۱۰ برگی، قبل از گلدهی و گلدهی در مقایسه با شاهد کاهش داد (به ترتیب به میزان ۳۵، ۳۸ و ۱۶ درصد) ولی تنش خشکی شدید فقط در مرحله گلدهی کلروفیل a را به میزان ۴۰ درصد کاهش داد. مقدار کلروفیل b در هر سه مرحله رشد ۱۰ برگی، قبل از گلدهی و گلدهی به ترتیب به میزان ۱۷، ۷۴ و ۶۸ درصد در تنش خشکی ۶۰ درصد و ۳۰، ۶ و ۷۰ درصد در تنش خشکی ۴۰ درصد افزایش پیدا کرد (جدول ۷). افزون بر این، تنش خشکی ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی میزان کاروتنوئید را در مرحله رشدی ۱۰ برگی به ترتیب به میزان ۷۱ و ۶۵ درصد افزایش و در مرحله قبل از گلدهی به ترتیب به میزان ۱۹ و ۶۵ درصد کاهش داد (جدول ۷). میزان کاروتنوئید در مرحله گلدهی تحت تأثیر سطح ۶۰ درصد تنش خشکی قرار نگرفت ولی در سطح ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به میزان ۳۶ درصد با کاهش مواجه شد. بر اساس نتایج پژوهش، کم‌ترین مقدار کلروفیل a در تیمار ۶۰ درصد تنش خشکی × مرحله قبل از گلدهی (۰/۵۲۹ میلی‌گرم در گرم وزن تازه)، کم‌ترین مقدار کلروفیل b در تیمار ۸۰ درصد تنش خشکی × مرحله گلدهی (۰/۲۱۹ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) و کم‌ترین مقدار کاروتنوئید نیز در تیمار ۴۰ درصد تنش خشکی × مرحله قبل از گلدهی (۰/۰۶۶ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) مشاهده گردید (جدول ۷).

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه دارویی سرخارگل در مراحل مختلف رشد.

Table 6. Variance analysis of the effect of drought stress on the photosynthetic pigments of coneflower in different phenological stages.

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کارتنوئید Carotenoid
Replication	بلوک	2	0.02^{ns}	0.0002^{ns}	0.12*	0.0003^{ns}
Irrigation (I)	سطوح آبیاری	2	0.18**	0.04**	0.03^{ns}	0.005**
Phenological stage (P)	مراحل رشد	2	0.13**	0.01**	0.003^{ns}	0.002**
I × P	سطوح آبیاری × مرحله رشد	4	0.06**	0.01**	0.01^{ns}	0.006**
Error	خطا	16	0.005	0.0005	0.006	0.0002
CV%	ضریب تغییرات	-	8.94	6.78	13.83	12.79

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** insignificant and significant at significance levels of 5 and 1%, respectively.

کلروفیل رنگدانه اصلی دخیل در فتوسنتز است که برای جذب، انتقال و تبدیل انرژی نور مورداستفاده قرار می گیرد و ارتباط نزدیکی با فتوسنتز و عملکرد گیاهان دارد؛ به‌عبارت‌دیگر، کلروفیل می‌تواند منعکس‌کننده وضعیت رشد گیاهان و میزان تنش باشد. میزان کلروفیل در تنش‌های محیطی با کاهش مواجه می‌شود و نسبت کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید تغییر می‌کند و باعث تغییر در عملکرد فتوسنتز می‌شود (Farooq et al., 2009). با توجه به حساسیت بیش‌تر کلروفیل a به تنش خشکی و شوری نسبت به کلروفیل b، کاهش محتوای کلروفیل a بیش‌تر از کلروفیل b تحت تنش‌های خشکی و شوری انتظار می‌رود (Jaleel et al., 2009). تنش خشکی از بیان آنزیم‌های کلیدی دخیل در سنتز کلروفیل جلوگیری می کند یا باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در تخریب آن می‌گردد (Bhusal et al., 2018). در پژوهش حاضر، میزان کلروفیل a و کاروتنوئید تحت تنش خشکی کاهش معنی داری پیدا کردند که با یافته‌های پژوهش خراسانی‌نژاد و همکاران (Khorasaninejad et al., 2018) روی سرخارگل هم‌خوانی دارد، درحالی‌که تنش خشکی باعث افزایش محتوای کلروفیل b در مقایسه با شاهد گردید. نتایج

پژوهشی روی انگور نشان داد که میزان کلروفیل b تحت تنش خشکی با افزایش مواجه شد (Khandani et al., 2022) که بخشی از نتایج پژوهش حاضر را تائید می‌کند. رقم، سن گیاه و شدت تنش خشکی می‌توانند در افزایش یا حفظ میزان کلروفیل تحت تنش خشکی تأثیرگذار باشند (Tzortzakis et al., 2020).

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی (۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) بر رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه سرخارگل در مراحل مختلف رشد (ده برگی، قبل از گلدهی و گلدهی).

Table 7. Mean comparison of the effect of drought stress (80, 60, and 40 FC) on the photosynthetic pigments of coneflower in different phenological stages (10 leaf, pre-flowering, and flowering).

Treatments	ترکیب تیماری	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid
		mg.g^{-1} FW			
Drought stress percentage of FC (%FC)	تنش خشکی درصد ظرفیت زراعی				
80		0.928	0.248^{c}	1.080	0.132
60		0.664	0.380^{a}	0.972	0.133
40		0.698	0.330^{b}	1.040	0.092
Phenological stage (PS)	مراحل رشدی				
10 leaves	۱۰ برگی	0.699	0.284^{c}	1.010	0.115
Pre-flowering	قبل گلدهی	0.692	0.353^{a}	1.040	0.136
Flowering	گلدهی	0.889	0.320^{b}	1.042	0.107
Drought stress (%FC) × PS	برهمکنش ۲ فاکتور				
80 × 10 leaves		0.831^{bc}	0.246^{ef}	1.070	0.079^{d}
80 × Pre-flowering		0.845^{bc}	0.279^{de}	1.114	0.189^{a}
80 × Flowering		1.107^{a}	0.219^{f}	1.054	0.127^{bc}
60 × 10 leaves		0.536^{e}	0.287^{cd}	0.957	0.135^{bc}
60 × Pre-flowering		0.526^{e}	0.485^{a}	0.932	0.153^{b}
60 × Flowering		0.931^{b}	0.367^{b}	1.028	0.112^{c}
40 × 10 leaves		0.729^{cd}	0.321^{c}	1.002	0.130^{bc}
40 × Pre-flowering		0.704^{cd}	0.296^{cd}	1.073	0.066^{d}
40 × Flowering		0.661^{de}	0.373^{b}	1.045	0.081^{d}

حروف معنی‌دار فقط برای داده‌هایی قرار داده شد که بر اساس جدول تجزیه واریانس معنی‌دار شده بودند. حروف مشابه در هر ستون و گروه تیماری نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون دانکن می‌باشد.

Significance letters were placed only for the significant data based on the variance table analysis. Similar letters in each column and treatment group indicate the absence of a significant difference by using Duncan's test at P≤0.05.

فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل و ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهمکنش سطوح آبیاری و مراحل رشد برای فنل کل و فلاونوئید کل گل و ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شد ولی برای ظرفیت آنتی اکسیدانی گل و ریشه معنی‌دار نشد (جدول ۸). همچنین اثر ساده سطوح آبیاری برای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل در سطح یک درصد معنی‌دار شد درحالی‌که اثر ساده هر دو تیمار موردمطالعه برای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ریشه معنی‌دار نشد (جدول ۸).

در هر سه مرحله رشدی میزان فنل و فلاونوئید کل گل و ریشه گیاه سرخارگل تحت تنش خشکی ملایم کاهش پیدا کردند، درحالی‌که مقدار فنل و فلاونوئید کل گل در معرض تنش شدید خشکی به‌صورت معنی‌داری با افزایش مواجه شدند (به میزان ۳۷/۶ و ۲۵/۷ درصد به ترتیب در مراحل ۱۰ برگی، قبل از گلدهی و گلدهی). همچنین تنش شدید خشکی میزان فنل کل ریشه را در مرحله رشدی ۱۰ برگی (به میزان ۱۶/۱) و فلاونوئید کل را در مراحل رشدی ۱۰ برگی و قبل از گلدهی (به ترتیب به میزان ۱۴/۹ و ۵/۳ درصد) افزایش و در دیگر مراحل رشد کاهش داد (جدول ۹).

جدول ۸. نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی بر فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل و ریشه گیاه دارویی سرخارگل در مراحل مختلف رشد.

Table 8. Variance analysis of the effect of drought stress on the total phenol, total flavonoid, and antioxidant capacity of flower and root of coneflower in different phenological stages.

S.O.V منابع تغییر	درجه آزادی df	فنل کل گل Flower total phenol	فلاونوئید کل گل Flower total flavonoid	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل Flower antioxidant capacity	فنل کل ریشه Root total phenol	فلاونوئید کل ریشه Root total flavonoid	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ریشه Root antioxidant capacity
بلوک Replication	2	1363.31^{ns}	143.66^{ns}	3.15^{ns}	25.05^{ns}	14.67^{ns}	0.96^{ns}
سطوح آبیاری Irrigation (I)	2	83381.80**	7000.77**	88.27**	1369.84**	28.76^{ns}	17.10^{ns}
مراحل رشد Phenological stage (P)	2	3507.94^{ns}	2225.70**	32.59^{ns}	2200.90**	59.69**	0.95^{ns}
سطوح آبیاری×مرحله رشد I × P	4	3608.77*	915.05**	16.58^{ns}	1598.16**	57.52**	5.96^{ns}
خطا Error	16	980.38	79.91	9.46	130.46	8.76	6.27
ضریب تغییرات CV%	-	11.31	6.60	3.72	15.08	11.78	2.96

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** insignificant and significant at significance levels of 5 and 1%, respectively.

مقدار ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل سرخارگل نیز تحت تأثیر تنش شدید خشکی با افزایش معنی‌داری مواجه شد (جدول ۹). نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان فنل کل گل با ۳۷۷/۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن خشک در تیمار ۴۰ درصد تنش خشکی × مرحله ۱۰ برگی، بیش‌ترین میزان فلاونوئید کل گل با ۱۸۱/۹ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن خشک در تیمار ۴۰ درصد تنش خشکی × مرحله گلدهی مشاهده گردید (جدول ۹). افزون بر این، میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل گیاه سرخارگل در سطوح ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد تنش خشکی به ترتیب ۸۶/۸۰، ۸۲/۷۴ و ۸۸/۹۰ درصد بود (جدول ۹). بیش‌ترین میزان فنل کل و فلاونوئید کل ریشه نیز در تیمار ۶۰ درصد تنش خشکی × مرحله ۱۰ برگی (به ترتیب با ۴۴/۳ و ۲۱/۱ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه) مشاهده گردید (جدول ۹).

سیستم‌های حفاظتی آنتی‌اکسیدانی ازجمله آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی به‌منظور محافظت از گیاهان در برابر آسیب گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن، به وجود آمده‌اند. در یک تعادل پویا، اثر هم‌افزایی آنتی‌اکسیدان‌ها باعث تولید و خاموش کردن گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن در داخل گیاه می‌شود، بنابراین اثرهای منفی ناشی از تنش را کاهش داده و باعث سازگاری گیاهان با تنش‌های محیطی می‌شوند (Yang et al., 2021). افزایش غلظت فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان در معرض تنش‌های محیطی، یکی از راهکارهای افزایش تحمل به تنش و کاهش اثرهای منفی آن‌ها است. ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی گروهی از آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی هستند که در گیاهان تحت تنش‌های محیطی فعال شده و سبب کاهش اثرهای مخرب تنش بر گیاهان می‌شوند (Atmani et al., 2009; Khandani et al., 2019). در پژوهش حاضر، تنش شدید خشکی باعث افزایش قابل‌توجه میزان فنل و فلاونوئید کل در گل گیاه سرخارگل گردید، درحالی‌که میزان فنل ریشه را کاهش داد و تأثیری بر میزان فلاونوئید ریشه نگذاشت که احتمالاً به دلیل تأثیر بیش‌تر تنش‌های محیطی بر اندام‌های هوایی در مقایسه با اندام‌های زیرزمینی باشد (Smirnoff, 1998). در پژوهش‌های دیگری نیز که روی گیاه سرخار گل صورت پذیرفت، میزان فنل کل گیاه تحت تنش خشکی ۴۰ و ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه کاهش پیدا کرد (Khorasaninejad et al., 2018; Mousavi et al., 2019). تنش خشکی، رونویسی مولکول RNA را به‌عنوان یک سیگنال افزایش‌دهنده تولید آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز تحریک می‌کند و منجر به سنتز ترکیبات فنلی می‌شود (Lewis, 2017). در زمان مواجه با تنش‌های محیطی، ترکیبات فنلی موجود در گیاهان افزایش‌یافته و با حذف رادیکال‌های آزاد، گیاهان را در برابر تنش‌های اکسیداتیو محافظت می‌کنند. همچنین این ترکیبات، افزایش یکپارچگی غشا را با تنظیم اسمزی سلولی افزایش می‌دهند (Atmani

et al., 2009). در گیاهان مختلف، به دلیل تفاوت در تحمل به خشکی، میزان تجمع ترکیبات فنلی برای پاک‌سازی رادیکال‌های آزاد متغیر است (Boscaiu et al., 2010). افزایش میزان فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل گیاه سرخارگل تحت تنش خشکی در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است (Khorasaninejad et al., 2018; Hosseinpour et al., 2020).

جدول ۹. مقایسه میانگین تنش خشکی (۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) بر محتوای فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل و ریشه سرخارگل در مراحل مختلف رشد (ده برگی، قبل از گلدهی و گلدهی).

Table 9. Mean comparison of the effect of drought stress (80, 60, and 40 FC) on the total phenol, total flavonoid and antioxidant capacity of flower and root of coneflower in different phenological stages (10 leaf, pre-flowering, and flowering).

Treatments	ترکیب تیماری	فنل کل گل Flower total phenol	فلاونوئید کل گل Flower total flavonoid	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل Flower antioxidant capacity	فنل کل ریشه Root total phenol	فلاونوئید کل ریشه Root total flavonoid	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ریشه Root antioxidant capacity
		mg.100 g^{-1} DW		%	mg.100 g^{-1} DW		%
Drought stress	**تنش خشکی**						
percentage of FC (%FC)	**درصد ظرفیت زراعی**						
80		272.70	131.67	86.80^{b}	89.80	26.08	85.96
60		182.81	109.65	82.74^{c}	66.75	23.06	84.98
40		375.18^{a}	165. 47	88.90^{a}	70.66	26.24	83.23
Phenological stage (PS)	**مراحل رشدی**						
10 leaves	**۱۰ برگی**	297.34	152.68	88.23	74.18	27.95	84.35
Pre-flowering	**قبل گلدهی**	275.40	131.84	65.70	60.93	22.91	84.92
Flowering	**گلدهی**	257.94	121.86	84.51	92.09	24.52	84.90
Drought stress (%FC) ×PS	**برهمکنش ۲ فاکتور**						
80 × 10 leaves		331.79^{a}	162.64^{b}	88.38	82.49^{bc}	29.24^{ab}	85.49
80 × Pre-flowering		273.83^{b}	110.00^{de}	86.42	67.81^{cd}	22.28^{c}	86.71
80 × Flowering		212.48^{b}	122.37^{d}	85.60	119.10^{a}	26.71^{bc}	85.67
60 × 10 leaves		182.61^{c}	123.32^{d}	86.45	44.31^{d}	21.01^{c}	83.22
60 × Pre-flowering		180.03^{c}	103.56^{e}	79.59	63.58^{cde}	22.97^{c}	85.45
60 × Flowering		185.79^{c}	102.08^{e}	82.18	92.34^{b}	25.21^{bc}	86.23
40 × 10 leaves		377.64^{a}	172.07^{ab}	89.87	95.75^{b}	33.60^{a}	84.34
40 × Pre-flowering		372.34^{a}	181.95^{a}	91.09	51.40^{de}	23.47^{c}	82.55
40 × Flowering		375.56^{a}	141.12^{c}	85.75	64.83^{cd}	21.65^{c}	82.81

حروف معنی‌دار فقط برای داده‌هایی قرار داده شد که بر اساس جدول تجزیه واریانس معنی‌دار شده بودند. حروف مشابه در هر ستون و گروه آماری نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون دانکن می‌باشد.

Significance letters were placed only for the significant data based on the variance table analysis. Similar letters in each column and treatment group indicate the absence of a significant difference by using Duncan's test at P≤0.05.

ترکیب اسانس ریشه

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تعداد ۲۵ ترکیب توسط دستگاه کروماتوگرافی متصل به طیف‌سنج جرمی شناسایی شد (جدول ۱۰). نتایج نشان داد که بیش از ۷۰ درصد اجزاء اسانس تیمارهای ۸۰ درصد ظرفیت زراعی × مرحله ۱۰ برگی، ۸۰ درصد ظرفیت زراعی × مرحله قبل از گلدهی، ۴۰ درصد ظرفیت زراعی × مرحله ۱۰ برگی، ۴۰ درصد ظرفیت زراعی × مرحله قبل از گلدهی و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی × مرحله گلدهی را چهار ترکیب جرماکرن دی، اِن-دُدکان، اِن-تری دکان و اِن-اُن دکان تشکیل دادند اما در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی × مرحله گلدهی، چهار ترکیب غالب اسانس شامل جرماکرن دی، اِن‌دُدکان، اِن‌تری دکان و آلفافلاندرن بود (جدول ۱۰). بیش‌تر ترکیبات اسانس سرخارگل تحت تنش شدید خشکی در مراحل رشدی ۱۰ برگی و قبل ا ز گلدهی کاهش ولی در مرحله گلدهی در مقایسه با شاهد با افزایش مواجه شدند. تنش خشکی ۴۰ درصد ظرفیت زراعی

باعث کاهش ترکیب جرماکرن دی در مراحل ۱۰ برگی و گلدهی (به ترتیب به میزان ۴۱/۶ و ۴۱/۳ درصد) و افزایش آن در مرحله قبل از گلدهی (۷۷/۲ درصد) گردید (جدول ۱۰). افزون بر این، تنش خشکی باعث افزایش ترکیبات اِن-دُدکان در هر سه مرحله رشد، اِن‌تری دکان در مراحل ۱۰ برگی و گلدهی و همچنین ترکیب آلفافلاندرن در مرحله ۱۰ برگی گردید (جدول ۱۰).

جدول ۱۰. ترکیب اسانس ریشه گیاه سرخارگل و مقادیر آن‌ها (درصد) در دو سطح آبیاری (۸۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) در مراحل مختلف رشد.

Table 10. The essential oil content of the root of coneflower and their amounts (%) in two irrigation levels (80 and 40% FC) in different phenological stages.

شماره Row	ترکیب Content	شاخص ماندگاری Retention Index	80%			40%		
			ده برگی 10 leaf	قبل از گلدهی Pre-flowering	گلدهی Flowering	ده برگی 10 leaf	قبل از گلدهی Pre-flowering	گلدهی Flowering
1	α-Pinene	940	-	-	1.46	-	-	-
2	Myrcene	989	-	-	1.92	-	-	-
3	n-Decane	1000	3.91	5.44	1.56	3.73	3.29	2.38
4	α-Phellandrene	1010	1.36	-	7.78	1.68	2.51	-
5	n-Undecane	1100	6.97	8.35	3.53	8.71	7.70	6.15
6	n-Dodecane	1200	16.72	20.18	10.64	23.51	20.67	19.19
7	n-Tridecane	1300	12.66	16.51	8.55	18.80	15.59	17.34
8	-Copaeneα	1370	1.51	-	0.68	2.07	1.73	-
9	-Elemeneβ	1385	-	-	1.04	-	-	-
10	n-Tetradecane	1400	-	1.93	0.87	-	-	2.13
11	(*E*)-Caryophyllene	1415	1.94	1.18	2.36	1.10	1.46	1.32
12	-Humuleneα	1460	0.97	-	0.83	1.34	1.37	1.39
13	-Muuroleneγ	1481	2.35	3.01	0.64	1.35	2.10	3.29
14	Germacrene D	1487	33.54	16.42	43.12	19.58	29.10	25.32
15	Bicyclogermacrene	1502	2.62	1.49	2.57	1.33	1.71	1.74
16	-Cadineneγ	1520	3.65	3.06	2.38	2.10	1.92	2.98
17	-Cadineneδ	1528	2.32	2.85	-	1.64	1.21	2.40
18	Germacrene D-4-ol	1571	2.13	2.53	1.56	1.73	1.37	2.03
19	Spathulenol	1577	-	2.39	-	0.96	-	-
20	Caryophyllene oxide	1625	-	1.46	-	0.95	0.82	1.40
21	Tau-Cadinol + α-Muurolol	1650 + 1642	-	-	1.55	-	-	-
22	-Cadinolα	1659	3.84	3.68	2.57	2.75	3.02	3.18
23	Elemol acetate	1693	-	2.73	-	2.02	1.44	1.95
24	Eudesma-4(15), 7-dien-1B-ol	1700	-	1.48	-	0.94	0.71	1.05
25	Eudesm-7(11)-en-4-ol	1704	2.59	1.42	2.39	1.67	1.95	2.05

پژوهش‌های مختلفی بر اجزاء اسانس گیاه دارویی سرخارگل صورت پذیرفته است. نتایج پژوهش میرجلیلی و همکاران (Mirjalili et al., 2006) نشان داد که اجزاء اصلی اسانس گیاه سرخارگل شامل جرماکرن دی (۵۷/۰۰ درصد)، بتا-کاریوفیلن (۴/۶۰ درصد) و آلفافلاندرن (۳/۲۰ درصد) بود. هینزر و همکاران (Heinzer et al., 1988) نیز گزارش کردند که ترکیبات بورنئول، لیمونن، بورنئول استات، آلفا-فلاندرن و پنتا دکا-۸-ان -۲- وان، اجزاء اصلی اسانس گیاه سرخارگل می‌باشند. بر اساس نتایج این پژوهش‌ها و یافته‌های پژوهش‌های دیگر می‌توان گفت که جرماکرن دی، اسپاتولنول، بتاکاریوفیلن و هومولن اجزاء اصلی اسانس گیاه سرخارگل را تشکیل می‌دهند (Thomsen et al., 2012). این ترکیبات اسانس در صنایع آرایشی و دارویی مفید هستند و استفاده از گیاهان برای برخی بیماری‌های مختلف به‌عنوان گیاهان دارویی را توجیه می‌کنند. حضور این ترکیبات در گونه موردبررسی در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که گونه‌های سرخارگل ایران به گونه‌های *E. purpurea* دیگر مناطق جهان شباهت زیادی دارند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که

بیش‌تر ترکیبات اسانس سرخارگل نظیر جرماکرن دی تحت تنش شدید خشکی در مراحل رشدی ۱۰ برگی و قبل ا ز گلدهی کاهش ولی در مرحله گلدهی با افزایش مواجه شدند. متابولیت‌های ثانویه نه‌تنها تحت تأثیر ژنتیک، بلکه تحت تأثیر تغییر الگوهای محیطی نیز قرار می‌گیرند.

نتیجه‌گیری نهایی

با افزایش سطوح تنش خشکی، ویژگی‌های رشدی، کلروفیل a، کاروتنوئید و محتوای فنل کل ریشه گیاه سرخارگل به‌صورت معنی‌داری کاهش پیدا کردند. همچنین تنش خشکی باعث افزایش قطر ساقه، کلروفیل b، محتوای فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گل شد. سه ترکیب اِن-دُدکان، اِن-تری دکان و اِن-اُن دکان که از اجزاء غالب اسانس ریشه این گیاه در پژوهش حاضر می‌باشند، تحت تنش شدید خشکی کاهش یافتند. جرماکرن دی به‌عنوان ترکیب اصلی اسانس سرخارگل در گیاهان تنش ندیده (شاهد) دارای مقادیر بالاتری بود که با اعمال تنش شدید خشکی در مراحل رشدی ۱۰ برگی و گلدهی مقدار آن کاهش یافت ولی با اعمال در مرحله قبل از گلدهی با افزایش مواجه گردید. درمجموع از یافته‌های پژوهش حاضر می‌توان چنین نتیجه گرفت که اعمال تنش متوسط خشکی (اعمال تنش خشکی تا رسیدن به ظرفیت زراعی ۶ درصد) در مرحله گلدهی گیاه سرخارگل می‌تواند به بهبود ترکیبات اسانس ریشه کمک کرده و سبب افزایش برخی ترکیبات بیوشیمیایی گیاه از قبیل فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در گل‌های گیاه سرخارگل گردد.

منابع

Abbaszadeh, B., Sharifi Ashourabadi, E., Lebaschi, M., Naderi hajibagher Kandy, M., Moghadami, F. 2008. The effect of drought stress on proline contents, soluble sugars, chlorophyll and relative water contents of balm (*Melissa officinalis* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research. 23(4), 504-513. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2008.10090

Alizadeh Ahmadabadi, A., Khorasaninejad, S., 2017. The effect of humic acid pretreatment on germination of purple cornflower (*Echinacea purpurea*) plant under drought and salinity conditions. Journal of Arid Biome. 6, 97-107. [In Persian with English Summary].

Atmani, D., Chaher, N., Berboucha, M., Ayouni, K., Lounis, H., Boudaoud, H., Debbache, N., Atmani, D., 2009. Antioxidant capacity and phenol content of selected Algerian Medicinal Plants. Food Chemistry. 112, 303-309. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.05.077

Attarzadeh, M., Balouchi, H., Rajaie, M., Dehnavi, M.M., Salehi, A., 2019. Improvement of *Echinacea purpurea* performance by integration of phosphorus with soil microorganisms under different irrigation regimes. Agricultural Water Management. 221, 238-247. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.022

Azzeme, A.M., Abdullah, S.N.A., Aziz, M.A., Wahab, P.E.M., 2016. Oil palm leaves and roots differ in physiological response, antioxidant enzyme activities and expression of stress-responsive genes upon exposure to drought stress. Acta Physiologiae Plantarum. 38, 1-12. https://doi.org/10.1007/s11738-016-2073-2

Bahreininejad, B., Razmjou, J., Mirza, M., 2013. Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. International Journal of Plant Production. 7, 151-166.

Barnes, J., Anderson, L.A., Gibbons, S., Phillipson, J.D., 2005. Echinacea species (*Echinacea angustifolia* (DC.) Hell., *Echinacea pallida* (Nutt.) Nutt., *Echinacea purpurea* (L.) Moench): a review of their chemistry, pharmacology and clinical properties. Journal of Pharmacy and Pharmacology. 57, 929-954. https://doi.org/10.1211/0022357056127

Battaglia, M.L., Lee, C., Thomason, W., 2018. Corn yield components and yield responses to defoliation at different row widths. Agronomy Journal. 110, 210-225. https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0322

Bhusal, N., Bhusal, S.J., Yoon, T.M., 2018. Comparisons of physiological and anatomical characteristics between two cultivars in bi-leader apple trees (*Malus*×*domestica* Borkh.). Scientia Horticulturae. 231, 73-81. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.006

Bielach, A., Hrtyan, M., Tognetti, V.B., 2017. Plants under stress: involvement of auxin and cytokinin. International Journal of Molecular Sciences. 18, 1427. https://doi.org/10.3390/ijms18071427

Blumenthal, M., 2011. Herb sales continue growth-up 3.3% in 2010. HerbalGram. 90, 64-67.

Boscaiu, M., Sánchez, M., Bautista, I., Donat, P., Lidón, A., Llinares, J., Llul, C., Mayoral, O., Vicente, O., 2010. Phenolic compounds as stress markers in plants from gypsum habitats. Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture. 67, 44-49.

Carraro, E., Di Iorio, A., 2022. Eligible strategies of drought response to improve drought resistance in woody crops: a mini-review. Plant Biotechnology Reports. 16, 265-282. https://doi.org/10.1007/s11816-021-00733-x

Caser, M., Chitarra, W., D'Angiolillo, F., Perrone, I., Demasi, S., Lovisolo, C., Pistelli, L., Pistelli, L., Scariot, V., 2019. Drought stress adaptation modulates plant secondary metabolite production in Salvia dolomitica Codd. Industrial Crops and Products. 129, 85-96. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.068

Choi, C.W., Kim, S.C., Hwang, S S., Choi, B.K., Ahn, H.J., Lee, M.Y., Park, S.H., Kim, S.K., 2002. Antioxidant activity and free radical scavenging capacity between Korean medicinal plants and flavonoids by assay-guided comparison. Plant Science. 163, 1161-1168. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00332-1

Eberhardt, M.V., Lee, C.Y., Liu, R.H., 2000. Antioxidant activity of fresh apples. Nature. 405, 903-904. https://doi.org/10.1038/35016151

Farooq, M., Basra, S.M.A., Wahid, A., Ahmad, N., Saleem, B.A., 2009. Improving the drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) by exogenous application of salicylic acid. Journal of Agronomy and Crop Science. 195, 237-246. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00365.x

Flexas, J., Medrano, H., 2002. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. Annals of Botany. 89, 183-189. https://doi.org/10.1093/aob/mcf027

Flexas, J., Galmés, J., Gallé, A., Gulías, J., Pou, A., Ribas-Carbo, M., Tomàs, M., Medrano, H., 2010. Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for biotechnological improvement. Australian Journal of Grape and Wine Research. 16, 106-121. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00057.x

Heinzer, F., Chavanne, M., Meusy, J.P., Maître, H.P., Giger, E., Baumann, T.W., 1988. The classification of therapeutically used species of the genus *Echinacea*. Pharmaceutica acta Helvetiae. 63, 132-136.

Hewedy, O.A., Abdel Lateif, K.S., Seleiman, M.F., Shami, A., Albarakaty, F.M., M El-Meihy, R., 2020. Phylogenetic diversity of Trichoderma strains and their antagonistic potential against soil-borne pathogens under stress conditions. Biology. 9, 189. https://doi.org/10.3390/biology9080189

Hosseinpour, M., Ebadi, A., Habibi, H., Nabizadeh, E., Jahanbakhsh, S., 2020. Enhancing enzymatic and nonenzymatic response of *Echinacea* purpurea by exogenous 24-epibrassinolide under drought stress. Industrial Crops and Products. 146, 112045. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112045

Jabbari, H., Akbari, G.A., Sima, N.A.K.K., Rad, A.H.S., Alahdadi, I., Hamed, A., Shariatpanahi, M.E., 2013. Relationships between seedling establishment and soil moisture content for winter and spring rapeseed genotypes. Industrial Crops and Products. 49, 177-187. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.036

Jaleel, C.A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H.J., Somasundaram, R., Panneerselvam, R., 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. International Journal of Agriculture and Biology. 11, 100-105.

Khandani, Y., Ghazvini, R.F., Ghasemnezhad, M., Khaledian, M.R., 2019. Effects of super absorbent and regulated deficit irrigation (RDI) condition on the storage quality of Japanese plum (*Prunus salicina* cv. Santarosa). Iranian Journal of Horticultural Science. 50, 255-263. [In Persian with English Summary].

Khandani, Y., Gholami, M., Sarikhani, H., Chehregani Rad, A., 2022. Response of some vegetative and physiological traits of Iranian and foreign grape cultivars to drought stress.

Journal of Plant Process and Function. 11, 153-174. [In Persian with English Summary].

Khorasaninejad, S., Alizadeh Ahmadabadi, A., Hemmati, K., 2018. The effect of humic acid on leaf morphophysiological and phytochemical properties of *Echinacea purpurea* L. under water deficit stress. Scientia Horticulturae. 239, 314-323. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.015

Landy, N., Ghalamkari, G.H., Toghyani, M., Moattar, F., 2011. The effects of *Echinacea purpurea* L. (purple coneflower) as an antibiotic growth promoter substitution on performance, carcass characteristics and humoral immune response in broiler chickens. Journal of Medicinal Plants Research. 5, 2332-2338.

Lewis, N.G., 2017. Plant Phenolics, Antioxidants in Higher Plants. CRC press, pp. 135-169. https://doi.org/10.1201/9781315149899-6

Mahdavian, M., Sarikhani, H., Hadadinejad, M., Dehestani, A., 2021. Exogenous application of putrescine positively enhances the drought stress response in two citrus rootstocks by increasing expression of stress-related genes. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 21, 1934-1948. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00491-3

Manayi, A., Vazirian, M., Saeidnia, S., 2015. *Echinacea purpurea*: Pharmacology, phytochemistry and analysis methods. Pharmacognosy Reviews. 9, 63. https://doi.org/10.4103/0973-7847.156353

Mirjalili, M.H., Salehi, P., Badi, H.N., Sonboli, A., 2006. Volatile constituents of the flowerheads of three *Echinacea* species cultivated in Iran. Flavour and Fragrance Journal. 21, 355-358. https://doi.org/10.1002/ffj.1657

Mousavi, S., Asadi-Sanam, S., Pezhmanmehr, M., 2019. Changes in morpho-physiological characteristics and the leaf and flower essential oils yeild of coneflower (*Echinacea purpurea* L.) Moench] with sodium nitroprusside (SNP) foliar application under drought stress. Iranian Journal of Horticultural Science. 50, 375-391. [In Persian with English Summary].

Omidi, H., Shams, H., Sahandi, M.S., Rajabian, T., 2018. Balangu (*Lallemantia* sp.) growth and physiology under field drought conditions affecting plant medicinal content. Plant Physiology and Biochemistry. 130, 641-646. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.08.014

Ortiz, N., Armada, E., Duque, E., Roldán, A., Azcón, R., 2015. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi and/or bacteria to enhancing plant drought tolerance under natural soil conditions: effectiveness of autochthonous or allochthonous strains. Journal of Plant Physiology. 174, 87-96. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.08.019

Porra, R.J., 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. Photosynthesis Research. 73, 149-156.

Razali, N., Razab, R., Junit, S.M., Aziz, A.A., 2008. Radical scavenging and reducing properties of extracts of cashew shoots (*Anacardium occidentale*). Food Chemistry. 111, 38-44. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.024

Saeidnejad, A.H., Kafi, M., Khazaei, H.R., Pessarakli, M., 2013. Effects of drought stress on quantitative and qualitative yield and antioxidative activity of *Bunium persicum*. Turkish Journal of Botany. 37, 930-939. https://doi.org/10.3906/bot-1301-2

Sayyari, M., Moradi Farsa, M., Azizi, A., 2022. The effect of drought stress at different developmental stages on growth and some phytochemical parameters of *Nepeta crispa*. Journal of Crops Improvement. 24, 545-561. [In Persian with English Summary].

Smirnoff, N., 1998. Plant resistance to environmental stress. Current opinion in Biotechnology. 9, 214-219. https://doi.org/10.1016/S0958-1669(98)80118-3

Takahashi, F., Kuromori, T., Urano, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., 2020. Drought stress responses and resistance in plants: From cellular responses to long-distance intercellular communication. Frontiers in Plant Science. 11, 556972. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556972

Tavakoli, H., Karimi, M., Mosavi, S.F. 1989. Effect of irrigation regimes on vegetative and reproductive components of corn. Iranian Journal of Agriculture Science. 22, 35-46. [In Persian with English Summary].

Tezcan, F., Gültekin-Özgüven, M., Diken, T., Özçelik, B., Erim, F.B., 2009. Antioxidant activity and total phenolic, organic acid and sugar content in commercial pomegranate

juices. Food Chemistry. 115, 873-877. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.103

Thakur, M., Bhattacharya, S., Khosla, P.K., Puri, S., 2019. Improving production of plant secondary metabolites through biotic and abiotic elicitation. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants. 12, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.11.004

Thomsen, M.O., Fretté, X.C., Christensen, K.B., Christensen, L.P., Grevsen, K., 2012. Seasonal variations in the concentrations of lipophilic compounds and phenolic acids in the roots of Echinacea purpurea and Echinacea pallida. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 60, 12131-12141. https://doi.org/10.1021/jf303292t

Tsai, Y.L., Chiou, S.Y., Chan, K.C., Sung, J.M., Lin, S.D., 2012. Caffeic acid derivatives, total phenols, antioxidant and antimutagenic activities of *Echinacea purpurea* flower extracts. LWT-Food Science and Technology. 46, 169-176. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.09.026

Tzortzakis, N., Chrysargyris, A., Aziz, A., 2020. Adaptive response of a native mediterranean grapevine cultivar upon short-term exposure to drought and heat stress in the context of climate change. Agronomy. 10, 249. https://doi.org/10.3390/agronomy10020249

Vogt, T., 2010. Phenylpropanoid biosynthesis. Molecular Plant. 3, 2-20. https://doi.org/10.1093/mp/ssp106

Wang, L., Waltenberger, B., Pferschy-Wenzig, E.M., Blunder, M., Liu, X., Malainer, C., Blazevic, T., Schwaiger, S., Rollinger, j.M., Heiss, E.H., Schuster, D., Kopp, B., Bauer, R., Stuppner, H., Dirsch, V.M., Atanasov, A.G., 2014. Natural product agonists of peroxisome proliferator-activated receptor gamma (PPARγ): a review. Biochemical Pharmacology. 92, 73-89. https://doi.org/10.1016/j.bcp.2014.07.018

Wissuwa, M., Gamat, G., Ismail, A.M., 2005. Is root growth under phosphorus deficiency affected by source or sink limitations? Journal of Experimental Botany. 56, 1943-1950. https://doi.org/10.1093/jxb/eri189

Xu, W., Cui, K., Xu, A., Nie, L., Huang, J., Peng, S., 2015. Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings. Acta Physiologiae Plantarum. 37, 1-11. https://doi.org/10.1007/s11738-014-1760-0

Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., Chen, S., 2021. Response mechanism of plants to drought stress. Horticulturae. 7, 50. https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050