Journal of
Plant Environmental Physiology
Print ISSN: 2423-7671
Online ISSN: 2783-4689
Phycological Society of Iran

Change in Physiological Characteristics, Amino Acids and Performance of *Echinacea purpurea* L. Under Brassinolide and Surfactant in Response to Drought Stress

Esmail Nabizadeh

Department of Agrothechnology, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.E-mail:nabizadeh.esmaeil@gmail.com

Article type:
Research article

Article history
Received:01.05.2023
Revised: 24.07.2023
Accepted: 04.08.2023
Published:22.09.2024

Keywords
Essential Oil
Foliar Spraying
Proline
Sarhargol
Soluble Sugars

Abstract

Drought, one of the major ecological limiting factors, has a significant effect on the growth and secondary metabolic process of medicinal plants. Water stress reduces the size, density, leaf surface of the plant and reduces the biomass, and not only changes the plant structurally, but also leads to fluctuations in their secondary chemical compounds. The present study was carried out to investigate the effect of using brassinolides and surfactant on drought stress tolerance on Sarkhargol medicinal plant at Islamic Azad University of Mahabad during 2017 - 2018. The studied factors include dryness at three irrigation levels of 70, 120 and 170 mm, evaporation from class A pan as the main factor, surfactant consumption at two levels (0 and 0.5 lit/ha) and 24-epibrassinolide at three levels (0, 0.01 and 0.1 µmol) were as secondary factors. According to the results of the present study, drought stress had a decisive role in reducing soluble sugars, relative water content, phosphorus element, plant height, amchlorid and yield components of *Echinacea* medicinal plant, as well as the main effects of brassinolide, surfactant solution and drought stress according to the content of soluble sugars, proline, glycine betaine, amino acids, lysine and methionine. They had due to the limitation of water resources, irrigation after 120 mm, use of brassinolide and surfactant can have a positive role in removing the damages of drought stress. In addition, brassinolide and surfactant led to increased tolerance to drought stress in Sarhargol medicinal plant, which led to relative resistance to drought and stability of the yield of dry matter of the plant and its essential oil.

Cite this article as: Nabizadeh, E. (2023). Change in Physiological Characteristics, Amino Acids and Performance of *Echinacea purpurea* L. Under Brassinolide and Surfactant in Response to Drought Stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 19(3): 46-64.

©The author(s)

Publisher: Islamic Azad University, Gorgan branch

Doi: 10.83078/iper/.2024.984449

فیزیولوژی محیطی گیاهی
شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۷۶۷۱
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۶۸۹
PSI
انجمن جلبک شناسی ایران
Phycological Society of Iran
دانشگاه آزاد اسلامی
واحد گرگان

تغییر در خصوصیات کمی و کیفی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) تحت براسینولید و سورفکتانت در پاسخ به تنش خشکی

اسمعیل نبی زاده

گروه آگروتکنولوژی ، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران، رایانامه: nabizadeh.esmaeil@gmail.com

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳
تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

واژه‌های کلیدی:
اسانس
پرولین
سرخارگل
قندهای محلول
محلول‌پاشی

چکیده

خشکسالی، یکی از عوامل محدود کننده عمده اکولوژیکی، تأثیر بسزایی بر رشد و فرآیند متابولیک ثانویه گیاهان دارویی دارد. تنش آبی باعث کاهش اندازه، تراکم، سطح برگ گیاه و زیست توده می‌شود و نه تنها گیاه را از نظر ساختاری تغییر می‌دهد، بلکه منجر به نوسانات ترکیبات شیمیایی ثانویه آنها می‌شود. مطالعه حاضر به بررسی تأثیر استفاده از براسینولیدها و سورفکتانت بر تحمل تنش خشکی در گیاه دارویی سرخارگل در دانشگاه آزاد اسلامی مهاباد طی سال های ۱۳۹۷-۱۳۹۶ پرداخته است. عوامل مورد مطالعه شامل خشکی در سه سطح آبیاری ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متری تبخیر از تشتک کلاس A به عنوان فاکتور اصلی، مصرف سورفکتانت در دو سطح (۰ و ۰/۵ لیتر در هکتار) و ۲۴-اپی براسینولید در سه سطح (۰ (شاهد)، ۰/۰۱ و ۰/۱ میکرومول) به‌عنوان فاکتور فرعی بودند. بر اساس نتایج مطالعه حاضر، تنش خشکی نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش قندهای محلول، محتوای نسبی آب، عنصر فسفر، ارتفاع بوته، عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی سرخارگل داشت، همچنین اثرات اصلی براسینولید، محلول سورفکتانت و تنش خشکی با توجه بر محتوای قندهای محلول، پرولین، گلیسین بتائین اسیدهای آمینه، لیزین و متیونین معنی‌دار بودند. براسینولید و سورفکتانت منجر به افزایش تحمل به تنش خشکی در گیاه دارویی سرخارگل شد که منجر به مقاومت نسبی به خشکی و پایداری عملکرد ماده خشک گیاه و اسانس آن گشت. با توجه به محدودیت منابع آبی، آبیاری پس از ۱۲۰ میلی متر، استفاده از براسینولید و سورفکتانت می‌تواند نقش مثبتی در رفع خسارات تنش خشکی داشته باشد.

استناد: نبی زاده، اسمعیل (۱۴۰۳). تغییر در خصوصیات کمی و کیفی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) تحت براسینولید و سورفکتانت در پاسخ به تنش خشکی. *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۱۹(۳)، ۶۴-۴۶.

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان
© نویسندگان.
Doi: 10.83078/iper/.2024.984449

مقدمه

گیاهان دارویی و ادویه‌ای به‌عنوان گیاهان اقتصادی مورد استفاده انسان در نظر گرفته می‌شوند که مواد بیوشیمیایی خاص و مفید را با مقادیر بسیار کم ذخیره می‌کنند (Heidarpour et al., 2020). گیاه دارویی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) گیاهی علفی و چند ساله که از خانواده آستراسه و بومی آمریکای شمالی است. علاوه بر این، به‌طور سنتی برای درمان سرماخوردگی، سرفه، عفونت دستگاه تنفسی و برخی التهابات در طول قرن‌ها استفاده می شد. کل اندام این گیاه حاوی مواد مؤثره ارزشمندی است (Omidbaigi, 2005). اثر تنش خشکی بر عملکرد و بهره‌وری گیاهان به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته و برای تعداد زیادی از گیاهان گزارش شده است (Gupta et al., 2020). اگرچه این گیاه بومی مناطق نیمه خشک است، دمای بالا و تنش آبی باعث کاهش رشد رویشی شده و باعث آسیب به گیاه و کاهش عملکرد می‌شود (AlHuqail et al., 2020). متابولیسم اسیدهای آمینه نقش مهمی در تحمل تنش خشکی در گیاهان دارد. برخی از اسیدهای آمینه در سنتز پروتئین‌ها یا به عنوان منبع نیتروژن (Showler and Castro, 2010) یا پیش-ساز بیوسنتزی برای ترکیبات ثانویه استفاده می‌شوند (Rampino et al., 2006). تجمع سریع پرولین آزاد یک پاسخ معمولی به تنش خشکی است. هنگامی که گیاه برنج در معرض تنش خشکی در خاک قرار می-گیرند، بسیاری از مقادیر بالایی از پرولین را جمع می-کنند که در برخی موارد چندین برابر مجموع تمام اسیدهای آمینه دیگر است (Lum et al., 2014). تجمع اسیدهای آمینه مانند گلیسین، پرولین، آلانین و والین فشار اسمزی گونه‌های فعال اکسیژن را سم‌زدایی می-کند و pH داخل سلولی تنظیم کرد (Ahmed et al., 2013). علاوه بر این، گلیسین بتائین به عنوان یک تنظیم کننده اسمزی در سلول‌های اکثر گیاهان مانند اسفناج، جو، گندم و سورگوم افزایش می‌یابد (Yang et al., 2003). متیونین و لیزین به عنوان اسیدهای آمینه ضروری در سلول‌های گیاهی در نظر گرفته می-شوند که میزان سنتز آنها تا حد زیادی تحت شرایط تنش خاصی در برخی از بافت‌های گیاهی تنظیم می-شود. علاوه بر این، آنها فرآیندهای سلولی ضروری مانند تقسیم سلولی و دیواره سلولی، کلروفیل و سنتز غشا را تنظیم می‌کنند (Roje, 2006). تغییر در غلظت عناصر غذایی بسیار مهم و حفظ تعادل آنها در گیاه ضروری تلقی می‌شود، زیرا مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر به ترتیب نقش مهمی در حفظ راندمان مصرف آب دارند و نقش پتاسیم در کنترل تلفات آب گیاه مهم است (Sardans and Peñuelas, 2008). پتاسیم می‌تواند متابولیسم گیاه را تحت شرایط تنش کنترل کند زیرا به عنوان کوفاکتور یا فعال کننده آنزیم عمل می‌کند. تنش خشکی کارایی جذب مواد مغذی معدنی را از طریق تأثیرگذاری بر دسترسی، انتقال و توزیع مواد مغذی معدنی در گیاهان مختل می‌کند (Hu and Schmidhalter, 2005).

استفاده از سورفکتانت به عنوان یکی از رویکردهای اصلاح روش‌های آبیاری برای افزایش بهره‌وری آب در مزرعه محسوب می‌شود که در دو دهه اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است. سورفکتانت نفوذ خاک به آب را تا دو برابر شرایط عادی و بدون سورفکتانت تسهیل می‌کند (Yaang, 2008). بر اساس نتایج مطالعه پاسخ شبدر برسم (*Trifolium alexandrinum* L.) و ریحان (*Ocimum basilicum* L.) به سیستم‌های کم آبیاری تحت تأثیر سورفکتانت، کیفیت گیاه دارویی ریحان افزایش یافت (Chaichi et al., 2015).

همچنین استفاده از تنظیم کننده‌های رشد به عنوان مکانیسم دیگری برای افزایش تحمل گیاه در نظر گرفته می شود. براسینوستروئیدها به عنوان مشتقات آلفا-کلستان در نظر گرفته می‌شوند و از طریق مسیر

مووالونات در گیاهان سنتز می‌شوند (Wei and Li, 2016). علاوه بر این، بسته به تولید و افزایش رونویسی ژن‌های مسئول پاسخ به تنش برای بهبود تحمل به تنش در گیاهان تیمار شده با براسینوستروئید، تحمل گیاه را به طیف وسیعی از تنش‌های محیطی از جمله خشکی، شوری، سرما و گرما افزایش می‌دهند (Ahmadi and Omidi, 2018). بنابراین، براسینوستروئیدها باعث محافظت از گیاه در شرایط تنش و افزایش مقاومت می‌شوند (Ahmadi Mousavi et al., 2006). در تحقیقی نشان داده شد گیاهان گوجه فرنگی و برنج تیمار شده با براسینوستروئیدها تحت تنش دمای پایین در مقایسه با گیاهان شاهد رشد بهتری داشتند. با توجه به نتایج برخی مطالعات، این ترکیبات دارای اثرات فیزیولوژیکی متفاوتی بر روی گیاهان بوده و باعث تحریک رشد آنها می‌شود (Özdemir et al., 2004). علاوه بر این، براسینوستروئیدها سازگاری گیاهان مختلف را با شرایط محیطی نامطلوب افزایش می‌دهند (Bajguz, 2000). استفاده از براسینولید در شمعدانی به دلیل افزایش سرعت فتوسنتز برگ و در نهایت زیست توده اندام‌های هوایی منجر به افزایش رشد شد (Swamy and Rao, 2009). براسینواستروئیدها منجر به تحریک رشد و ایجاد ژن‌های فعال در استرس، تغییر رونویسی و بیان ژن و افزایش محتوای متابولیت‌های سازگار، ظرفیت و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شوند (Zhang et al., 2008)، که همگی اثرات تنش را کاهش می‌دهند.

با توجه به موارد ذکر شده، مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر استفاده از براسینولید و سورفکتانت بر برخی از صفات فیزیولوژیکی، اسیدهای آمینه موثر بر تحمل به خشکی و افزایش عملکرد سرخارگل انجام شد.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایشی و شرایط رشد گیاه

مطالعه حاضر به صورت آزمایشی مزرعه‌ای در مهاباد (عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ٤٤ درجه و ۳ دقیقه شرقی، ارتفاع ۱۳٥٤ متری از آب دریا) واقع در استان آذربایجان غربی، در سال زراعی ۹۷-۱۳۹٦ انجام شد. مهاباد دارای آب و هوای نیمه خشک، بافت خاک رسی-سیلتی و میانگین بارندگی سالانه ۳٥٤ میلی‌متر است. این طرح آزمایشی در ۳ تکرار به‌صورت کرت‌های خرد شده بر اساس طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل رژیم آبیاری به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح آبیاری پس از تبخیر ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متری از تشتک تبخیر کلاس A و محلول سورفکتانت به‌عنوان اولین زیر فاکتور در دو سطح (۰ و ۰/۵ لیتر در هکتار) بود. آب مقطر به عنوان شاهد استفاده شد و بر اساس طرح برای محلول‌پاشی کرت‌ها استفاده شد. مقدار آب لازم برای هر کرت اصلی پس از محاسبه هر روز تبخیر انجام شده (ساعت ٦ عصر) بر اساس رابطه ذیل محاسبه گردید (Alizadeh, 2008):

$$Vw= [(FC-SM).BD.D.A]$$

که در آن Vw = حجم آب مورد استفاده در هر آبیاری (برحسب لیتر)، FC = درصد وزنی رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی، SM= درصد وزنی رطوبت در هنگام نمونه‌برداری ، BD= وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، D= عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه (متر) و D.A = مساحت کرت اصلی (مترمربع).

محلول پاشی با هورمون استروئیدی A مشتق از براسینولید در سه سطح (۰ (شاهد)، ۰/۰۱ و ۰/۱ میکرومول) به عنوان دومین عامل فرعی پس از استقرار نشاءها در مرحله شش و هفت برگی در

مزرعه انجام شد. سورفکتانت غیریونی مورد استفاده شامل ۱۰ درصد آلکیل پلی گلیکوزید، ۷ درصد کوپلیمر بلوک اکسید اتیلن-پروپیلن اکسید و ۸۳ درصد آب بود (Chaichi et al., 2015). بذور گیاه دارویی سرخارگل گونه پوپوراً از مؤسسه پاکان بذر اصفهان تهیه شد. برای ضدعفونی بذور گیاه دارویی سرخارگل با قارچ‌کش کاربوکسین تیرام به نسبت ۲ در هزار به این صورت که ۲ سی‌سی از قارچ‌کش در ۱۰۰۰ سی‌سی حل و بذور در محلول قارچ‌کش به مدت ۱ ساعت غوطه‌ور شدند. سپس بذور خشک و به منظور تهیه نشاء در خزانه کشت گردید . کاشت نشاءدر مزرعه، در کرت‌هایی به مساحت ۲/۵ متر مربع به صورت جوی و پشته و با رعایت فاصله بین خطوط ۵۰ و فاصله دو بوته بر روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر، انجام شد، علاوه بر این، علف‌های هرز در طول دوره رشد به صورت مکانیکی کنترل شدند. در پایان دوره رشد (گلدهی کامل نشاءها بعد از ۱۳۹ روز پس از کاشت) از هر کرت ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای هر خط به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته و از باقی‌مانده برای نمونه‌برداری‌ها استفاده شد.

محتوای نسبی آب (RWC)

محتوای آب برگ با پنج نمونه برگ روی گیاه اندازه-گیری شد، برگ‌های بالایی (جوان‌ترین) که در هر تکرار پس از تکمیل رشد رویشی گرفته شد، در حالت آماس اندازه‌گیری شد و بلافاصله وزن تر برگ-ها اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین وزن آماس، برگ‌ها به مدت ۱۵ ساعت در آب مقطر با شدت نور کم (به-منظور جلوگیری از کاهش وزن در اثر تنفس) قرار داده شدند. سپس برگ‌ها در این شرایط وزن شده و به مدت ٤٨ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و وزن خشک آنها با ترازو ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. RWC از معادله (۱) به دست آمد (Xu and Leskovar, 2015).

$$RWC= [(Wf-Wd)/(Wt-Wd)] \times 100 \quad ٪ \quad (۱)$$

که در آن، Wf وزن تازه برگ، Wt وزن تورژی برگ، و Wd وزن خشک برگ است.

اندازه‌گیری عملکرد و اجزای عملکرد

در طی رسیدگی فیزیولوژیکی، ۱۰ بوته به طور تصادفی از نقاط مختلف هر کرت برداشت شد، ارتفاع آنها از سطح زمین تا آخرین جوانه انتهایی اندازه‌گیری شد، تعداد شاخه‌های فرعی از اصلی شمارش و میانگین‌گیری شد و در نهایت برآورد نسبی کل طرح محاسبه و نوشته شد. مساحت ۱ متر مربع از هر کرت برداشت، خشک شد تا عملکرد بیولوژیکی تعیین شود.

تعیین غلظت کل اسیدهای آمینه آزاد

غلظت کل اسیدهای آمینه آزاد از طریق روش ارائه شده توسط هوانگ و ادر (Hwang and Edere, 1975) اندازه‌گیری شد. در این راستا، نمونه‌ها همگن شده و در بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH= ٦/٨) استخراج شدند. نمونه‌های رویی سانتریفیوژ شده و به معرف نین‌هیدرین (محلول ۵:۱ رقیق شده ۳۵۰ میلی‌گرم نین هیدرین در ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول) اضافه شدند و به مدت ۷-٤ دقیقه در حمام آب با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. پس از سرد شدن در حمام آب سرد، جذب نمونه ها در طول موج ۵۷۰ نانومتر خوانده شد. همچنین منحنی استاندارد با استفاده از غلظت‌های مختلف گلیسین رسم شد.

تعیین محتوای اسیدهای آمینه لیزین و متیونین

غلظت اسیدهای آمینه لیزین و متیونین از طریق روش ارائه شده توسط Ferrel و همکاران (١٩٦٩) اندازه-گیری شد. برای این منظور از اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال برای استخراج استفاده شد و با استفاده از اسپکتروفتومتر میزان جذب لیزین و متیونین به ترتیب در طول موج ۵۷۰ و ۵۱۰ نانومتر تعیین شد. علاوه بر

این، غلظت با در نظر گرفتن نمونه‌های استاندارد آنها برآورد شد (Lošák et al., 2010).

تعیین محتوای پرولین و گلیسین بتائین

محتوای پرولین با استفاده از واکنش نین هیدرین اندازه‌گیری شد (Bates et al., 1973). بخشی (۰/۵ گرم) از اندام هوایی با ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد (وزنی/حجمی) همگن شد و از کاغذ صافی واتمن (شماره ۲) عبور داده شد. معرف نین هیدرین (۲ میلی‌لیتر) و اسید استیک (۲ میلی‌لیتر) به ۲ میلی‌لیتر از عصاره صاف شده اضافه شد. سپس مخلوط به مدت ۱ ساعت در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب داغ قرار داده شد. مخلوط واکنش با ٤ میلی‌لیتر تولوئن استخراج شد و جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر در برابر تولوئن به عنوان بلانک با استفاده از اسپکتروفتومتر قرائت شد. محتوای پرولین با استفاده از ال-پرولین (سیگما) به عنوان منحنی استاندارد محاسبه شد. محتوای گلایسین بتائین از طریق روش ارائه شده توسط گراتین و گریو (Grattan and Grieve, 1992) اندازه‌گیری شد. در این راستا ۰/۵ گرم پودر برگ خشک وزن شده، ۲۰ میلی-لیتر آب مقطر اضافه شده و در شیکر ٤٨ با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. علاوه بر این، ۱ میلی-لیتر عصاره گیاهی با ۱ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۲ نرمال مخلوط شده و در حمام آب یخ قرار داده شد. همچنین ۰/۲ میلی‌لیتر یدید پتاسیم و ید به مخلوط واکنش اضافه شد، مخلوط شد و با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای صفر درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. در نهایت میزان جذب آن در ٣٦٥ نانومتر خوانده شد.

اندازه‌گیری محتوای قندهای محلول کل

در این آزمایش ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره تهیه شده از استانداردها با ۳ میلی‌لیتر معرف آنترون مخلوط و به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب داغ قرار داده شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها، جذب آنها در طول موج ٦٢٥ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر قرائت شد. به-منظور رسم منحنی، ۰، ۲۰، ٤٠، ٦٠، ٨٠، ۱۰۰ و ۱۲۰ قسمت در میلیون گلوکز خالص تهیه شد و در معرض تیمارهای مورد نظر مشابه نمونه‌های اصلی قرار گرفت (Irigoyen et al., 1992).

اندازه‌گیری سدیم، فسفر و پتاسیم

با توجه به اندازه‌گیری مواد مغذی معدنی، نمونه‌ها ابتدا از طریق خاکستر خشک در کوره خشک شدند و ابتدا هضم شدند. هم‌چنین میزان فسفر موجود در نمونه‌های هضم شده با استفاده از روش Murphy و Riley (١٩٦٢) تعیین شد. علاوه بر این، غلظت پتاسیم موجود در خاک از طریق استات آمونیوم یک نرمال با استفاده از فیلم فتومتر (Corning 450) اندازه‌گیری شد و محاسبات بر اساس وزن خشک انجام شد (Knudsen et al., 1983).

تحلیل آماری: به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌های مربوطه از آنالیز واریانس دوطرفه در SPSS نسخه ۲۰ استفاده شد. همچنین این آزمایش در سه تکرار اجرا شد و مقایسه میانگین‌ها براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد محاسبه شدند.

نتایج

متابولیت‌های سازگار

بر اساس نتایج، اثرات اصلی براسینولید، محلول سورفکتانت و تنش خشکی با توجه به قندهای محلول، پرولین، گلیسین بتائین، اسیدهای آمینه، لیزین و متیونین معنی‌دار بود (جدول ۱). بنابراین، محتوای متابولیت‌های سازگار فوق تحت تنش شدید خشکی بجز محتوای قندهای محلول به ترتیب با میزان ١٨٠/٢٤، ٤٣/٩٥، ٢٨/١٦، ٣١/٧٨ و ٧٧/٥٠ درصد

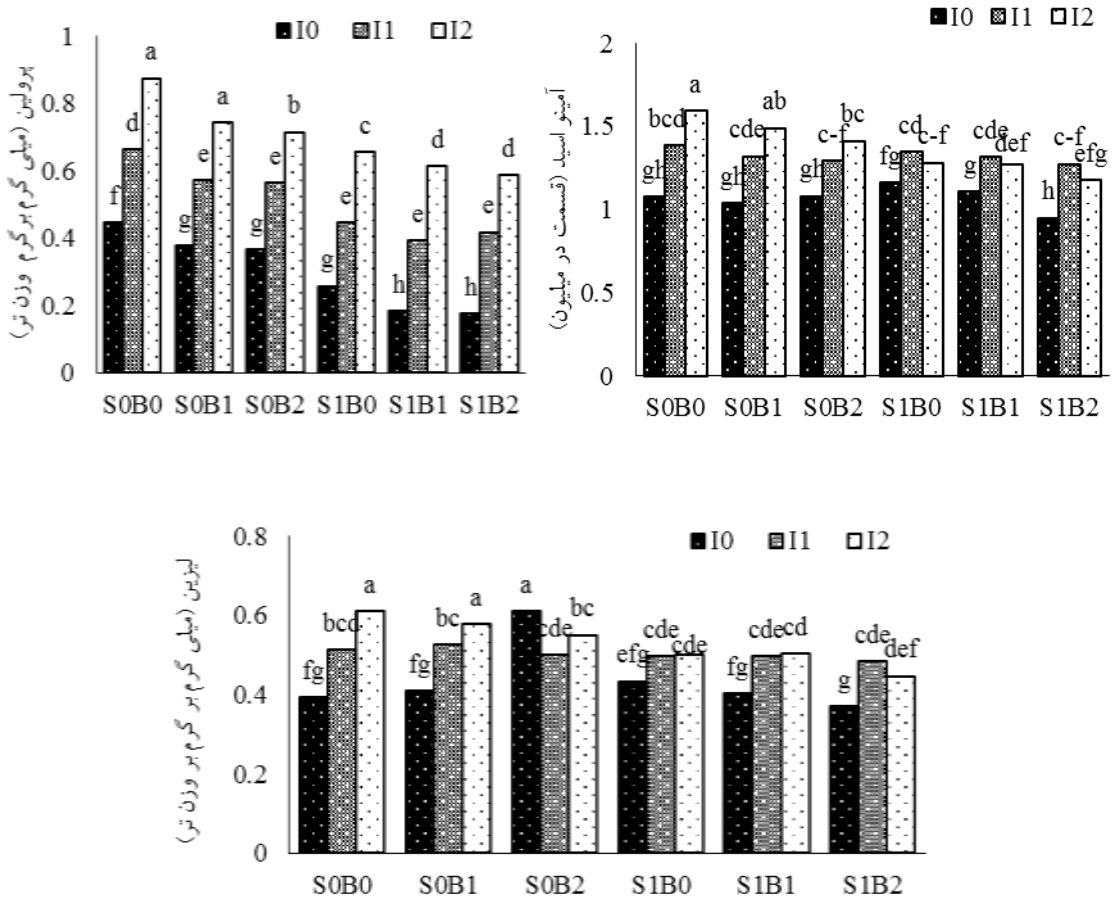
نسبت به شاهد (بدون تنش) افزایش یافت. تنش خشکی منجر به کاهش قندهای محلول در گیاه سرخارگل شد که با افزایش تنش به میزان قابل توجهی تشدید شد. علاوه بر این، محلول‌پاشی سورفکتانت منجر به افزایش تولید قندهای محلول شد که تا حدودی منجر به بهبود توانایی مقابله با تنش خشکی در سرخارگل شد (جدول ٤). گیاهان محلول-پاشی شده با محلول براسینوستروئید و سورفکتانت منجر به تولید میزان لیزین و آمینواسید با فعالیت بیشتر تحت تنش خشکی شدند (شکل ۱).

جدول ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) خصوصیات مختلف سرخارگل تحت براسینولید، سورفاکتانت و آبیاری

ضریب تغییرات	درجه آزادی	قندهای محلول	پرولین	گلایسین بتائین	آمینواسید	لیزین	متیونین	محتوای نسبی آب
بلوک (**B**)	۲	۰/۰۰۲٤*	۰/۰۰۰۳٦ ns	۰/۰۰۲٦**	۰/۰٦۲**	۰/۰٦٥۹**	۰/۰۰۷۳ ns	۸/۳۸ ns
آبیاری (**I**)	۲	۰/۱۰۳۳**	۰/۸۹۹۱**	۰/۰٦٤**	۰/٤۷٦**	۰/٥۲۱۲**	۰/٥٦٥**	۸۱۲/۸٤**
خطا (**B*I**)	٤	۰/۰۰۰٦۹ns	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۰۱٤**	۰/۰۲٤۸**	۰/۰٥٤۲**	۰/۰۰۲٤ ns	۲/۱۸٤ ns
سورفکتانت (**S**)	۱	۰/۰۰۸۰**	۰/۱٥۱۱٥**	۰/۰۱۰٥**	۰/۱۱۰۳٤**	۰/۱۲۷۷**	۰/۱۲۷**	۱۳۸/۲۰۸**
I*S	۲	۰/۰۰۳۹٥**	۰/۰۱۳۷۸**	۰/۰۰۱٥**	۰/۰۹٤٥**	۰/۰٦۷۳**	۰/۰۱۷۹*	٥٤/۸۹**
خطا **I*S(I)**	٦	۰/۰۰۰۳۷ns	۰/۰۰۰٦ ns	۰/۰۰۰٤ ns	۰/۰۰۰۳٦۷ ns	۰/۰۰۲٦ ns	۰/۰۰۳ ns	۱۲/۲٤۳*
براسینواستوئید (**Br**)	۲	۰/۰۰٥٦۸۹**	۰/۰۳۷۱**	۰/۰۰۳۳**	۰/۰٥۳۳**	۰/۰۳۱۹**	۰/۱۰٤۲**	۳٦/۹٥**
I*Br	٤	۰/۰۰۰٤٥٥ns	۰/۰۰۲۰٦**	۰/۰۰۰۲ ns	۰/۰۰۱٦ ns	۰/۰۰٤۹ ns	۰/۰۱۳٥*	۱٤/۷۸*
S*Br	۲	۰/۰۰۰۰۰٤ns	۰/۰۰٤٥**	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۰٦٥*	۰/۰۰٤۲ ns	۰/۰۱۲۷ ns	۳۷/۸٤٥**
I*S*Br	٤	۰/۰۰۰٥٤ns	۰/۰۰۱۸۹**	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۰۹٤**	۰/۰۰٦٦*	۰/۰۰٥٤ ns	۱۱/۰۹۱*
خطا	۲٤	۰/۰۰۰٦	۰/۰۰۳٤	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۷٥	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰٤۱	۳/۷۹

ns، غیر معنی‌دار، *معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

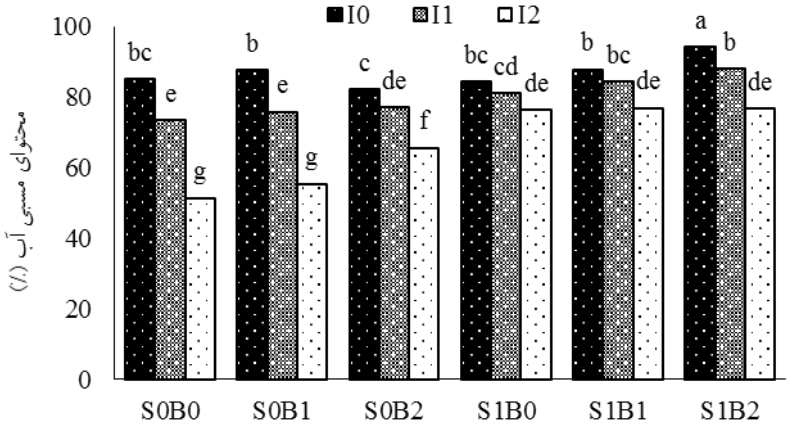
روند صعودی محتوای پرولین در سرخارگل تحت تنش خشکی در سطوح غلظت‌های محلول‌پاشی براسینولید و سورفکتانت مشهود بود. علاوه بر این، غلظت ۰/۱ میکرومولار براسینولید و محلول‌های سورفکتانت محتوای پرولین در گیاه سرخارگل را در سطوح مختلف تنش خشکی تنظیم کرد (شکل ۱). بر این اساس، براسینوستروئید نقش موثری در تجمع پرولین به‌عنوان جزء مهم واکنش‌های حفاظتی سرخارگل در پاسخ به تنش خشکی داشت. علاوه بر این، برهمکنش تنش خشکی در محلول سورفکتانت با غلظت ۰/۱ میکرومول براسینولید نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار پرولین در مقایسه با شاهد (I0) بود. علاوه بر این، گیاهان محلول‌پاشی نشان دهنده مقاومت نسبی به تنش خشکی بودند. محتوای گلیسین در تمام گیاهان براسینولید و سورفکتانت در مقایسه با شاهد یک کمتر بود (جدول ٤).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی، براسینوستروئید و سورفکتانت بر پرولین، اسیدهای آمینه و لیزین. آبیاری: I1، I2 و I3 = به ترتیب ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر از تشتک تبخیر کلاس A. سورفکتانت با غلظت‌های S0=0 و لیتر/هکتار S1 = 0.5. براسینوستروئید با غلظت‌های B0=0، B1=0.01 و B2=0.1 میکرومولار. میانگین‌ها با حروف مشابه فاقد تفاوت آماری براساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ هستند.

محتوای نسبی آب (RWC)

محتوای نسبی آب یکی از مهم‌ترین ویژگی های تعادل آبی گیاه است. محتوای نسبی آب نقش مهمی در تنظیم هدایت روزنه‌ای و در نتیجه سرعت فتوسنتز گیاه دارد. کاهش رشد و فعالیت ریشه و افزایش تبخیر و تعرق از جامعه گیاهی به عنوان عوامل مؤثر در کاهش محتوای نسبی آب شناخته شده است (Khorasaninejad et al., 2018). با توجه به نتایج، تیمارهای آزمایشی محتوای نسبی آب را تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۱) و استفاده از محلول سورفکتانت و براسینوستروئید منجر به افزایش محتوای نسبی آب برگ (۹٤/۲۰ درصد) در شرایط بدون تنش شد (شکل ۲).



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری، براسینوستروئید و سورفکتانت بر RWC. آبیاری: I1، I2 و I3 = به ترتیب ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر از تشتک تبخیر کلاس A. سورفکتانت با غلظت‌های S0=0 و S1 = 0.5 lit/ha. براسینوستروئید با غلظت‌های B0=0، B1=0.01 و B2=0.1 میکرومولار. میانگین‌ها با حروف مشابه فاقد تفاوت آماری براساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ هستند.

مواد مغذی معدنی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش خشکی، براسینوستروئید و تیمار سورفاکتانت بر عناصر معدنی فسفر، سدیم و پتاسیم برگ معنی‌دار بود (جدول ۲). بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین میزان پتاسیم (۰/۲۰ درصد) در تیمار مربوط به سطح دوم تنش خشکی (I1) مشاهده شد که با تیمارهای سورفکتانت و براسینوستروئید در یک گروه قرار گرفت، در حالی که کمترین آن مربوط به تیمار شاهد بود. همچنین با افزایش تنش خشکی میزان عنصر فسفر کاهش یافت و عنصر سدیم افزایش نشان داد و در محلول‌پاشی سورفکتانت و براسینوستروئید میزان عناصر فسفر و سدیم افزایش یافت (جدول ٤).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) خصوصیات مختلف سرخارگل تحت براسینولید، سورفاکتانت و آبیاری

ضریب تغییرات	درجه آزادی	پتاسیم	سدیم	فسفر	درصد اسانس	عملکرد اسانس	ارتفاع بوته
بلوک (B)	۲	۰/۰۰۰۲٦**	۰/۰۱٤۸٦**	۰/۰۲۲۲**	۱۱/۳٦۲**	۳۷۷۸/۸**	۵/۱۷**
آبیاری (I)	۲	۰/۰۰۰۰۳۵*	۰/۰۰۱۲۸٦**	۰/۰۰۰۰۱۸*	۰/۱۳۷۲ ns	۷۰۸۸/۲**	۷۵۹/٤٤**
خطا (B*I)	٤	۰/۰۰۰۰۱۹ ns	۰/۰۰۰٦۲۸*	۰/۰۰۰۵۹ ns	۰/۷٤٦ ns	٤٦۲/۹*	۱/۰۱ ns
سورفکتانت (S)	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۹۱*	۰/۰۰۰۰۲۳*	۰/۰۱۰۰۰٤**	۰/۰۰۲۹ ns	۱۷۹۰/۵**	۲۰۰/۲۹**
I*S	۲	۰/۰۰۰۰۱۱ ns	۰/۰۰۰۰۲۸ ns	۰/۰۰۲۰۵ ns	۰/۱۱۱۲۹ ns	۳٤۵/۱ ns	٤۸/۵۷**
خطا I*S(I)	٦	۰/۰۰۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۱۹ ns	۰/۰۰۱٦۷ ns	۰/۳۸۹۰ ns	۳۰۹/۲ ns	۱/۵۷ ns
براسینواستوئید (Br)	۲	۰/۰۰۰۰۰۰٦۹**	۰/۰۰۰۵۸۲*	۰/۰۰۰۳۳۹*	۰/۱۵۱٦ ns	۱٦٤/۹ ns	٦٤/۸٦**
I*Br	٤	۰/۰۰۰۰۰۷۲ ns	۰/۰۰۰۲۰۸ ns	۰/۰۰۲۵۹ ns	۰/۱۵۳۰ ns	٦٤/۰ ns	۹/۵۵**
S*Br	۲	۰/۰۰۰۰۱۵ ns	۰/۰۰۰۱۲ ns	۰/۰۰۱۵۸ ns	۰/۸۷۵۷ ns	۱۱٦۰/۱*	۱٤/۷۵**
I*S*Br	٤	۰/۰۰۰۰۰۱۹ ns	۰/۰۰۰۰۸٦ ns	۰/۰۰۰۲٤ ns	۰/۳۸۸۲ ns	۱۷۷/۸ ns	۲٦/۵۵**
خطا	۲٤	۰/۰۰۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۱٦	۰/۰۰۱۰۷	۰/۳۱۲۷	۱٤٤/۹۰	۰/۷٦٦

ns، غیر معنی‌دار، *معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

عملکرد و اجزای عملکرد

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که تیمارهای مختلف و اثر متقابل آنها بر عملکرد و اجزای عملکرد مانند ارتفاع بوته (جدول ۳)، شاخه‌های جانبی و گلدار، عملکرد ساقه، برگ و گل معنی‌دار بود (جدول ۳). بر اساس مقایسه میانگین صفات مذکور، حداکثر ارتفاع بوته، شاخه‌های گلدار، عملکرد ساقه، برگ و گل مربوط به سطح اول آبیاری (I0) بود که با سطح دوم سورفکتانت و سطح سوم براسینوستروئید قرار گرفتند. ارتفاع بوته، شاخه‌های جانبی و گلدار با افزایش تنش خشکی به طور معنی‌داری کاهش یافت که کمترین ارتفاع بوته در سطح تنش شدید (I2) مشاهده شد. علاوه بر این، افزایش قابل توجهی در ارتفاع گیاهان محلول براسینوستروئید و سورفاکتانت در مقایسه با شاهد (بدون محلول‌پاشی) مشاهده شد. حداکثر ارتفاع بوته (۶۵/۲ سانتی‌متر) در تیمار شاهد با ۰/۱ میکرومولار براسینولید و ۰/۵ لیتر در هکتار سورفکتانت به دست آمد، در حالی که حداقل آن در تنش شدید بدون براسینولید و سورفکتانت تعیین شد (شکل ۳). گیاهان محلول‌پاشی شده با تیمارهای براسینولید و سورفکتانت اثرات نامطلوب ناشی از تنش خشکی را با توجه به تولید شاخه جانبی تعدیل کردند. علاوه بر این، محلول‌پاشی با محلول براسینولید و سورفکتانت منجر به تولید گیاهان می‌شود که در سطوح مختلف تنش خشکی، شاخه‌های گلدار بیشتری ایجاد می‌کنند. بر اساس نتایج، اثر سه گانه کاربرد براسینولید، محلول سورفکتانت و تنش خشکی بر ساقه، برگ و گل معنی‌دار بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که حداکثر عملکرد ساقه، برگ و گل در تیمار همراه با ۰/۱ میکرومولار براسینولید و سورفکتانت در مقایسه با تیمار شاهد به دست آمد (شکل ٤).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) خصوصیات مختلف سرخارگل تحت براسینولید، سورفاکتانت و آبیاری

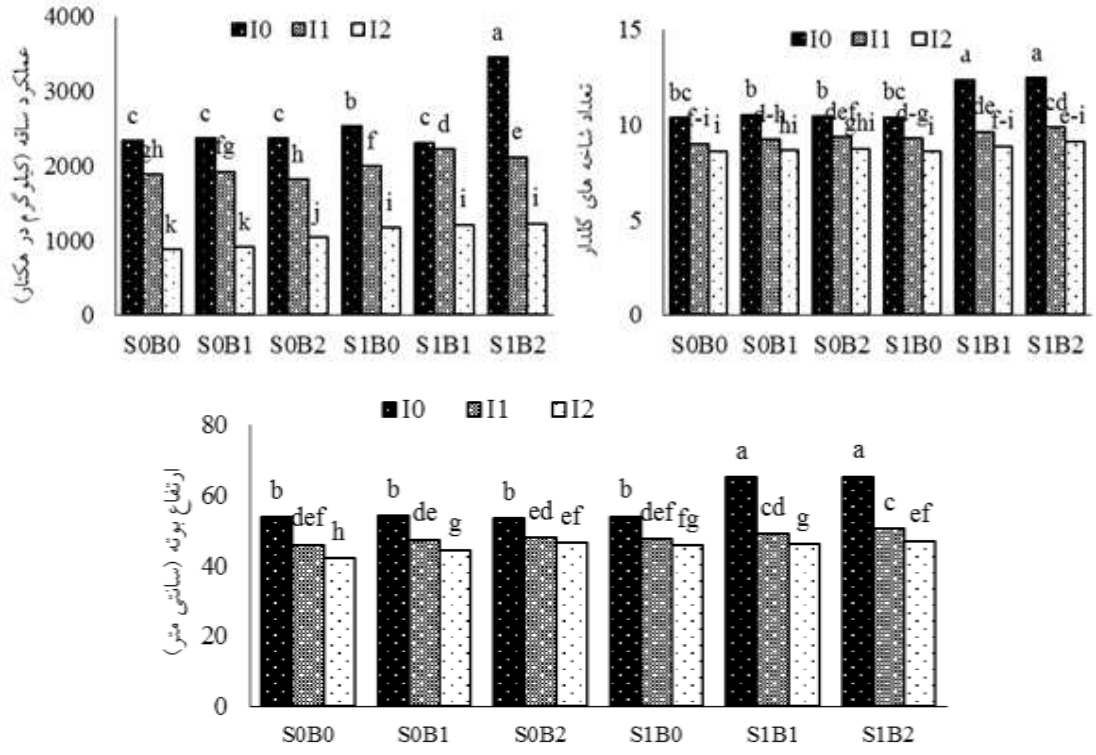
ضریب تغییرات	درجه آزادی	شاخه جانبی	شاخه گلدار	عملکرد ساقه	عملکرد برگ	عملکرد گل	عملکرد زیستی
بلوک (B)	۲	۲/۱۷۷**	۱/٤۷**	۷۰۰۸/۳ ns	۲۰۷٦٦/۳ ns	٦۹٦۳٦/۹ns	۱۸٤۲٤۳/۹ ns
آبیاری (I)	۲	۱٦/٦۲**	۲٦/۲۲**	۱۰۱٦۱٦٦٥/٤**	۱۸۰٥۷۳٥۹/٤**	۸۳۹۲٤۸۲/٥**	۱۰٦٤٦۸٤۰٤/٦**
خطا (B*I)	٤	۰/۲۲٥ ns	۰/۱۰۲۸*	۱٥۳۱/٤ ns	۲٦۸٥۰/۸ ns	۹۳۸٥۷/۸ ns	۲٤۸٦۱۱/٥ ns
سورفکتانت (S)	۱	۲/۹۸۷**	٥/۱۷**	۱۲۱٦۱۸۲/۳**	٦۰۷۱٤٤٤/۸**	۱٦۸٤۰۳۹/۹**	۲۳٦٦۳۷٥۹/۳**
I*S	۲	۲/۳٤۲**	۱/٥۹**	۳۸٤٤٦/٦**	۱۲٥۳۱۷٦/٦**	۱٦٤۲۹۱/۹*	۱۲۹۹۲۰۳/۱**
خطا I*S(I)	٦	۰/۱۳۱ ns	۰/۰٦٦۹ ns	۱۸٤۹/۸ ns	۲۱۹۸۳/۲ ns	۸۱۳۲۷/٦ns	۲۰۰۷۸۹/۷ ns
براسینواستوئید (Br)	۲	۲/۷٥۷**	۲/۰٥**	۲۲۳۱۹٥/۱**	۱۱۳٦۱۹/۸**	۲۹۳٥۳/۹ns	۹٥۸۳۷۹/۷*
I*Br	٤	۲/۹۳**	۰/۳۹۷٦**	۱۹۱۳۸۷/٤**	۹۹۷۱۸/٦**	٤٤۱۱٥/۹ns	۹۰۱٦۳۳/۹**
S*Br	۲	۲/۳٥۸**	۰/۹۸۸٦**	۱٦۲۳۲٥/۳**	۲۹۰۲۹٤/٦**	٥۰۰۲۹۲/۹**	۲۷۱۸۹٦٥/۰**
I*S*Br	٤	۰/۱۷۱٤ ns	۰/٤٦٥۷**	۱۹۷٦۰۷/۳**	۳۲۹۹۲۸/۹**	٤۸۲٤۱۸/۳**	۲۹۲٥٥٥۹٦/۰**
خطا	۲٤	۰/۱۱۱۰	۰/۰۳٥۹	۳٤۱۰/٥	۲۱۸۷٦/۹	۷۹٦۱۱/٦	۲۰۰۱۱۷/٤

ns، غیر معنی‌دار، *معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر برهمکنش براسینولید (B)، سورفکتانت (S) و آبیاری (I) بر قندهای محلول، گلیسین بتائین، متیونین، RWC، پتاسیم، سدیم و فسفر اکیناسه.

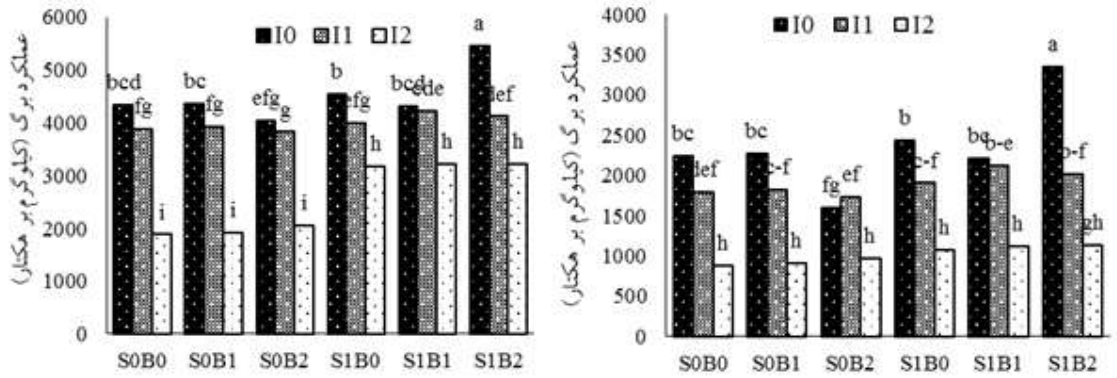
تیمار	سطوح	قندهای محلول (میکرومول بر گرم)	گلایسین بتائین (میکرومول بر گرم)	متیونین (قسمت در میلیون)	محتوای نسبی آب (٪)	فسفر (٪)	سدیم (٪)	پتاسیم (٪)
آبیاری	I_0	۰/٤۰c	۰/۲٤b	۰/٤٤c	۸۸/۵۵a	۰/۱٤a	۰/۸٤b	۰/۱۸b
	I_1	۰/٤۷b	۰/۳٤a	۰/٦۹b	۷۷/۹٦b	۰/۱۲b	۰/۸٤b	۰/۲۰a
	I_2	۰/۵۵a	۰/۳۵a	۰/۷۸a	۷٦/۰۸a	۰/۱۲b	۰/۸۵a	۰/۱۸b
سورفکتانت	S_0	۰/٤٦b	۰/۳۳۱a	۰/۵۹b	۷۹/۲٦b	۰/۱٤a	۰/۸٤b	۰/۱۷b
	S_1	۰/٤۹a	۰/۳۰۳b	۰/٦۸a	۸۲/٤٦a	۰/۱۵a	۰/۹۵a	۰/۱۹a
براسینولید	B_0	۰/٤۹a	۰/۳۲a	۰/۵۵b	۷۹/۲b	۰/۱b	۰/۸۳a	۰/۱۸a
	B_1	۰/٤۷ab	۰/۳۱ab	۰/٦٦a	۸۱/٤a	۰/۱۳a	۰/۸٤a	۰/۱۸a
	B_2	۰/٤٦b	۰/۳۰b	۰/۷۰a	۸۱/۹a	۰/۱۳a	۰/۸٤a	۰/۱۹a

آبیاری: I1، I2 و I3 = به ترتیب ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر از تشتک تبخیر کلاس A. سورفکتانت با غلظت‌های S0=0 و لیتر/هکتار S1 = 0.5. براسینوستروئید با غلظت‌های B0=0، B1=0.01 و B2=0.1 میکرومولار. میانگین‌ها با حروف مشابه فاقد تفاوت آماری براساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ هستند.



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری، براسینوستروئید و سورفکتانت بر شاخه گل تعداد و عملکرد ساقه. آبیاری: I1، I2 و I3 = به ترتیب ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر از تشتک تبخیر کلاس A. سورفکتانت با غلظت‌های S0=0 و لیتر/هکتار S1 = 0.5.

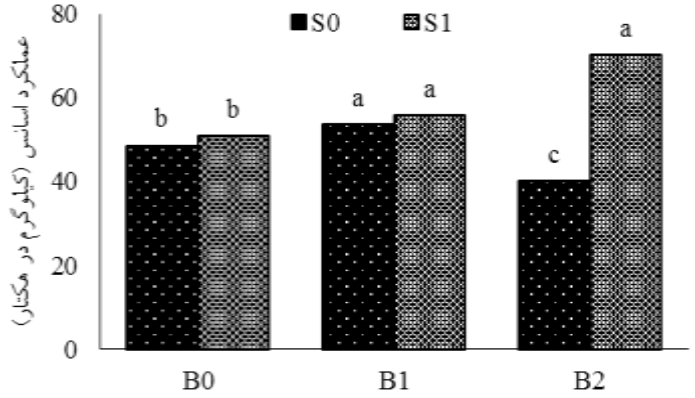
براسینوستروئید با غلظت‌های B0=0، B1=0.01 و B2=0.1 میکرومولار. میانگین‌ها با حروف مشابه فاقد تفاوت آماری براساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ هستند.



شکل ٤. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری، براسینوستروئید و سورفکتانت بر عملکرد برگ و عملکرد گل. آبیاری: I1، I2 و I3 = به ترتیب ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر از تشتک تبخیر کلاس A. سورفکتانت با غلظت‌های S0=0 و لیتر/هکتار0.5 = S1. براسینوستروئید با غلظت‌های B0=0، B1=0.01 و B2=0.1 میکرومولار. میانگین‌ها با حروف مشابه فاقد تفاوت آماری براساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ هستند.

عملکرد و درصد اسانس

گیاه سرخارگل قادر به تحمل خشکسالی دیررس بود، اگرچه تنش خشکی منجر به کاهش تولید ماده خشک شد. تولید ماده خشک با افزایش فتوسنتز در برگ‌ها در شرایط رطوبتی مطلوب افزایش می‌یابد. علاوه بر این، استفاده از محلول براسینولید و سورفکتانت منجر به افزودن ماده خشک شد. بر اساس نتایج مطالعه حاضر، تفاوت معنی‌داری در کسر حجمی اسانس مشاهده نشد (جدول ۳). استفاده از سورفکتانت و براسینولید باعث افزایش عملکرد اسانس (۷۰/۱۸ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با شاهد شد (شکل ۵).



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل براسینوستروئید و سورفکتانت بر عملکرد اسانس. آبیاری پس از تبخیر ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی-متر از تشتک تبخیر کلاس A. سورفکتانت با غلظت‌های S0=0 و لیتر/هکتار S1 = 0.5. براسینوستروئید با غلظت‌های B0=0، B1=0.01 و B2=0.1 میکرومولار. میانگین‌ها با حروف مشابه فاقد تفاوت آماری براساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ هستند.

بحث

طبق نتایج مطالعه حاضر، تنش خشکی کاهش صفات مورفولوژیکی، عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی سرخارگل را در پی داشت و همچنین شاخص‌های فیزیولوژیکی برای مقاومت در برابر تنش خشکی در این گیاه با افزایش روبرو شدند. برای کاهش اثرات

سوء تنش خشکی محلول‌پاشی با تیمارهای براسینوستروئید و سورفاکتانت می‌تواند این اثرات را کاهش دهد و افزایش در صفات کمی و کیفی سرخارگل را در پی داشته باشد. طبق یافته‌های بسیاری از محققین تجمع قندهای محلول را در طی پاسخ به تنش خشکی و نقش آنها در افزایش مقاومت به خشکی در گیاهان گزارش کردند (Basu et al., 2007; Hoekstra et al., 2001)، که در این پژوهش نیز بدست آمد. در شرایط تنش خشکی، قندهای محلول از سلول در برابر آسیب‌های اکسیداتیو محافظت می‌کنند، همراه با تنظیم اسمزی و کاهش پتانسیل آب می‌باشد. علاوه بر این، آنها نقش مؤثرتری در محافظت از غشای سلولی و پروتئین‌ها در این شرایط ایفا می‌کنند (Hoekstra et al., 2001). اسیدهای آمینه پیش‌ساز پروتئین‌های مختلف و همچنین اسیدهای آمینه دیگر هستند که نشان می‌دهد افزایش غلظت اسید آمینه در گیاهان ارزش غذایی آنها را افزایش می‌دهد (Haghighi et al., 2020). حداکثر و حداقل میزان اسیدهای آمینه به ترتیب در زمان استفاده از براسینولید و سورفکتانت در شرایط تنش شدید و عدم استفاده از آنها در شرایط آبیاری کامل به دست آمد. اعمال خشکی در مزرعه منجر به افزایش معنی‌دار میزان پرولین گیاه سرخارگل شد. چندین مطالعه تجمع پرولین را در برگ گیاهان تحت تنش خشکی گزارش کردند (Gomes et al., 2010). پرولین نقش ویژه‌ای در تنظیم فشار اسمزی ایفا می‌کند و از اکسیداسیون داخلی سلول‌ها در شرایط تنش جلوگیری می‌کند، که منجر به افزایش تجمع پرولین در گیاهان تحت تیمار با تنش شدید می‌شود (Bayer, 2007). گیاهان محلول‌پاشی شده با محلول براسینوستروئید و سورفکتانت منجر به تولید میزان لیزین با فعالیت بیشتر تحت تنش خشکی شدند.

پاسخ گیاهان به تنش‌های زیستی منجر به تشکیل آنزیم‌های بیوسنتز کننده پلی‌فنل اکسیداز و آنتی-اکسیدان می‌شود (Soroori et al., 2022). طی پژوهشی گیاه دارویی استویا در شرایط تنش خشکی، با کاهش رشد و افزایش تجمع مواد محلول در سلول-ها روبرو شد که موجب دسترسی بیشتری به آب پیدا کرد که به دنبال آن تنظیم اسمزی رخ می‌دهد (Maleki et al., 2022). محتوای نسبی آب برگ با در نظر گرفتن نقش سورفکتانت و براسینوستروئید در رشد ریشه گیاه و افزایش توانایی جذب رطوبت خاک افزایش یافت. با کاهش محتوای آب در خاک، گیاه از طریق افزایش مواد اسمزی درون بافت‌ها، محتوای آب بدن خود را به حداقل می‌رساند تا با نیروی بیشتری وارد آب شود، که منجر به کاهش آب درون بافت‌ها در شرایط تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش می‌شود، که با نتایج به دست آمده توسط Ahmadi و Omidi (۲۰۱۸) مطابقت دارد. توسعه طرح‌های کشت بهینه مستلزم درک واکنش عملکردی گیاه به مواد مغذی معدنی برای سازگاری آنها با مراحل مختلف رشد است (Shiponi and Bernstein, 2021). علاوه بر این، کاهش رطوبت خاک باعث کاهش سرعت رهاسازی عناصر غذایی از محیط خاک به سطح جذب ریشه می‌شود. تثبیت فسفر و پتاسیم در خاک در شرایط کم آبی یکی دیگر از دلایل کمبود آن در گیاه است (Ghaffari Nejad et al., 2020). جذب فسفر در شرایط کمبود رطوبت کاهش می‌یابد، اگرچه در خاک‌های مختلف به دلیل توانایی متنوع آنها در تثبیت فسفر متفاوت است. تغییرات در محتوای فسفر و پتاسیم در شرایط کمبود آب در مطالعات مختلف از جمله کاهش پتاسیم (Alian et al., 2000) و افزایش پتاسیم (Iannucci et al., 2002) گزارش شده است. علاوه بر این، رشد کلی گیاه مانند فعالیت جذبی ریشه‌ها تحت تنش کاهش می‌یابد، بنابراین

پتاسیم نمی‌تواند از سطح کلوئیدهای رسی جذب شود و در نتیجه جذب این عناصر غذایی کاهش می‌یابد (Khorasaninejad et al., 2018). غلظت عناصر غذایی مورد نیاز برای رشد در طول تنش کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر غیرمستقیم حجم آب – خاک بر جذب عناصر غذایی است که در مقایسه با تأثیر مستقیم تنش آبی بر رشد گیاه از اهمیت بیشتری برخوردار است (Ghaffari Nejad et al., 2020). بر اساس نتایج مطالعه حاضر، استفاده از سورفکتانت و براسینوستروئید باعث افزایش تجمع پتاسیم و غلظت این یون معدنی در گیاه می‌شود. با توجه به نقش پتاسیم به عنوان اسمولیت غیر آلی تنظیم کننده روزنه در برگ، در این گیاه در شرایط نامساعد رطوبتی نسبت به سایر اسمولیت‌ها سهم بیشتری دارد. از آنجایی که کاهش فشار اسمزی و در نتیجه تقسیم و نمو سلولی به ویژه در ساقه و برگ یکی دیگر از نشانه‌های کمبود آب محسوب می‌شود، کوچک‌تر شدن اندازه برگ یا ارتفاع بوته اولین اثر محسوس خشکسالی بر گیاهان محسوب می‌شود (Selah Varzi et al., 2008).

بر اساس نتایج تحقیق حاضر، ارتفاع بوته و تعداد برگ با افزایش شدت تنش خشکی کاهش یافت. با توجه به ارزیابی اثر تنش خشکی بر صفات مورفولوژیکی آویشن، توسط بابایی و همکاران (Babaee et al., 2010) اثر قابل توجه و کاهشی تنش خشکی را بر پارامترهای رشد و عملکرد اندام‌های رویشی مانند ارتفاع بوته و برگ دریافتند. این نتیجه ممکن است ناشی از وجود یک رابطه متضاد بین براسینولیدها و اسید آبسیزیک باشد (Zhaang et al., 2009) احتمالاً به دلیل کاهش اثر بازدارندگی رشد هورمون براسینولید در شرایط تنش می‌باشد (Agami, 2013).

گیاه یک سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی قوی برای محافظت از غشای سلولی و سایر اندام‌ها از آسیب اکسیداتیو ناشی از ROSها ایجاد می‌کند (Maia et al., 2010)، که فعالیت هر یک از این آنزیم‌ها از طریق یک سری ژن‌های خاص کنترل می‌شود. در این راستا، بسیاری از محققان گزارش کردند که براسینولیدها مقاومت گیاهان را در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از ROCs تحت تنش از طریق تأثیر بر بیان ژن‌های مسئول کنترل فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش می‌دهند (Baajguz and Hayat, 2009). عملکرد گیاه در شرایط تنش خشکی احتمالاً به دلیل کاهش سطح فتوسنتز کننده و تولید کلروفیل و افزایش انرژی مصرفی گیاه به منظور افزایش غلظت شیره سلولی و موارد مشابه کاهش یافت. فرآیندهای طبقه بندی مواد و توزیع موقت زیست توده را می‌توان به عنوان یکی از دلایل احتمالی کاهش عملکرد در گیاهان تیمار شده با تنش خشکی در نظر گرفت (Kage et al., 2004). کاهش فتوسنتز و عدم انتقال مواد فتوسنتزی را می‌توان از دیگر دلایلی دانست که تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفته و باعث اشباع شدن برگ‌ها توسط این مواد و محدود شدن فتوسنتز می‌شود. تنش خشکی باعث تسریع پیری برگ‌ها و کاهش سطح آنها می‌شود که منجر به کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Taiz and Zeiger, 2006). نتایج مشابهی در مطالعات مختلف در مورد تأثیر خشکسالی بر وضعیت آب و عملکرد برخی از گیاهان دارویی و معطر مانند *Foeniculum vulgare* Mill.، *Pimpinella anisum*، *Erica carnea* و *Satureja hortensis* گزارش شده است (Heidari, 2015; Ghilavizadeh et al., 2021)، که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد. تیمار سرخارگل با براسینولید و محلول سورفکتانت منجر به عملکرد بهینه آن شد. براسینولید اثرات تنش‌را در

گیاهان کاهش می‌دهد و به حفظ، بقا و تولید عملکرد اقتصادی آنها کمک می‌کند (Zhang et al., 2008).

بر اساس نتایج مطالعات قبلی، آبیاری مطلوب منجر به انباشت اسانس (Figueiredo et al., 2008) و عدم تأثیر بر درصد اسانس می‌شود (Khazaie et al., 2008). هم‌چنین درصد و عملکرد اسانس در گیاه سیاهدانه با افزایش فواصل آبیاری کاهش یافت (Farhoudi and Modhej, 2018). بر اساس نتایج این تحقیق، محلول براسینولید و سورفکتانت منجر به تحریک سیستم دفاعی گیاه سرخارگل و مقاومت نسبی آن در برابر تنش خشکی و افزایش عملکرد ماده خشک گیاهی و اسانس شد. در حالی که افزایش تنش همیشه نمی‌تواند درصد اسانس را اضافه کند زیرا گیاه بیشتر مواد فتوسنتزی خود را برای تولید تنظیم کننده-های اسمزی برای تنظیم پتانسیل آب در سلول تحت تنش‌های بالا مصرف می‌کند (Rezaei Chiyaneh et al., 2013). کاهش عملکرد اسانس به دلیل کاهش رطوبت خاک ممکن است با اثر نامطلوب تنش کم آبی بر رشد، رویشی و عملکرد گیاه مرتبط باشد زیرا عملکرد اسانس تابعی از درصد اسانس و عملکرد گیاه در نظر گرفته می‌شود (Farhoudi and Modhej, 2018).

نتیجه‌گیری نهایی

گیاهان دارویی مانند سایر گیاهان تحت تأثیر تنش‌های محیطی زنده و غیر زنده قرار می‌گیرند. مواد فعال در اندام‌های گیاهی مانند برگ‌ها، ساقه‌ها و گل‌ها ذخیره و انباشته می‌شوند. بر اساس نتایج، گیاه سرخارگل عملکرد مناسبی نسبت به تنش خشکی دارد و عملکرد بیولوژیکی و عملکرد ضروری آن در حضور استروئید براسینولید و محلول سورفکتانت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تجمع بیشتر متابولیت‌های سازگار گیاهی مانند پرولین، گلیسین بتائین، قندها و عنصر پتاسیم در حضور براسینولید و سورفکتانت منجر به تقویت ساختارهای درون سلولی و تضمین بقای سرخارگل در شرایط تنش خشکی و کاهش تنش اسمزی سلولی می‌شود. کاهش پتانسیل اسمزی به منظور کاهش از دست دادن رطوبت در گیاه و حفظ رطوبت نسبی برگ و فشار اسمزی سلول در اسیدهای آمینه مانند متیونین و لیزین می‌باشد. با توجه به محدودیت منابع آبی، استفاده از براسینولید و سورفکتانت می‌تواند نقش مثبتی در رفع خسارات تنش خشکی داشته باشد.

Reference

Agami, R.A. (2013). Alleviating the adverse effects of NaCl stress in maize seedlings by pretreating seeds with salicylic acid and 24-epibrassinolide. South African Journal Botany. 88: 171–177. DOI: 10.1016/j.sajb.2013.07.019.

Ahmadi Mousavi, E.A.S., Manouchehri Kalantari, K. and Torkzadeh, M. (2006). Effects of 24-epibrassinolide on lipid peroxidation, proline, sugar and photosynthesis pigments content of canola (*Brassica napus* L.) under water stress. Irannian Journal Bioloy. 18: 295-306.

Ahmadi, K. and Omidi, H. (2018). The effect of drought stress on physiological traits, peroxidase activity and grain yield of five populations of *Lallemantia royleana* Benth. Irannian Journal Med Aromatic Plants Research. 34: 412–429. DOI: 10.22092/ijmapr.2018.115298.2128.

Ahmed, I.M., Cao, F., Han, Y., Nadira, U.A., Zhang, G. and Wu, F. (2013). Differential changes in grain ultrastructure, amylase, protein and amino acid profiles between *Tibetan wild* and cultivated barleys under drought and salinity alone and combined stress. Food Chemistry. 141: 2743–2750. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.05.101.

Al-Huqail, A., El-Dakak, R.M., Sanad, M.N., Badr, R.H., Ibrahim, M.M., Soliman, D. and

Khan, F. (2020). Effects of climate temperature and water stress on plant growth and accumulation of antioxidant compounds in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) leafy vegetable. Scientifca 2020. DOI: 10.1155/2020/3808909.

Alian, A., Altman, A. and Heuer, B. (2000). Genotypic difference in salinity and water stress tolerance of fresh market tomato cultivars. Plant Science. 152: 59–65.

Alizadeh, A. (2008). Soil - water - plant relation ship (Book in pearsian).Published by Ferdowsi university Mashhad. 470.Pp.

Baajguz, A. and Hayat, S. (2009). Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. Plant Physiology Biochemistry. 47: 1–8. DOI: 10.1016/j.plaphy.2008.10.002.

Babaee, K., Amini Dehaghi, M., Modares Sanavi, S.A.M. and Jabbari, R. (2010). Water deficit effect on morphology, prolin content and thymol percentage of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). Iran J Med Aromat Plants Resarch. 26: 239–251. DOI: 10.22092/ijmapr.2010.6939.

Bajguz, A. (2000). Effect of brassinosteroids on nucleic acids and protein content in cultured cells of *Chlorella vulgaris*. Plant Physiology Biochemistry. 38: 209–215. DOI: 10.1016/S0981-9428(00)00733-6

Basu, P.S., Ali, M. and Chaturvedi, S.K. (2007). Osmotic adjustment increases water uptake, remobilization of assimilates and maintains photosynthesis in chickpea under drought. Indian Journal of Experimental Biology. 45: 261-267.

Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant Soil. 39: 205–207. DOI: 10.1007/BF00018060.

Bayer, C. (2007). Proper proline management needed for effective results. *Journal Med Chemistry*. *18*, 10–25.

Chaichi, M.R., Nurre, P., Slaven, J. and Rostamza, M. (2015). Surfactant application on yield and irrigation water use efficiency in corn under limited irrigation. Crop Science. 55: 386–393. DOI: 10.2135/cropsci2013.10.0706.

Farhoudi, R. and Modhej, A. (2018). Effect of drought stress on seed yield, essential oil yield and ability of reactive oxygen species scavenging in *Nigella sativa* L. ecotypes. Iran Journal Med Aromat Plants Resarch. 34: 510–526. DOI: 10.22092/ijmapr.2018.116805.2224.

Ferrel, R.E., Fellers, D.A. and Shepherd, A.D. (1969). Determination of free lysine and methio-nine in amino acid-fortified wheat. Cereal Chemistry. 46: 614–620.

Figueiredo, A.C., Barroso, J.G., Pedro, L.G. and Scheffer, J.J.C. (2008). Factors affecting secondary metabolite production in plants: volatile components and essential oils. Flavour Fragr Journal. 23: 213–226. DOI: 10.1002/ffj.1875.

Ghaffari Nejad, S.A., Nourgholipour, F. and Gheybi, M.N. (2020). Biostimulants and their roles in plant physiology, nutrient absorption, and tolerance to abiotic stresses. Manag Journal. 8(1): 47–67. DOI: 10.22092/lmj.2020.122310.

Ghilavizadeh, A., Hadidi Masooleh, E., Zakerin, H.R. and Valadabadi, S. A. (2021). Effect of drought stress and different concentrations of salicylic acid on yield, yield components and essential oil of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). Journal of Agroecology. 13(1): 89-101. DOI: 10.22067/jag.v12i3.77417

Gomes, F.P., Oliva, M.A., Mielke, M.S., Almeida, A.A.F. and Aquino, L.A. (2010). Osmotic adjustment, proline accumulation and cell membrane stability in leaves of *Cocos nucifera* submitted to drought stress. Scientia Horticulturae. 126: 379–384. DOI: 10.1016/j.scienta.2010.07.036.

Grattan, S.R., and Grieve, C.M. (1992). Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments. Agric Ecosyst Environ. 38: 275–300. DOI: 10.1016/0167-8809(92)90151-Z.

Gupta, A., Rico-Medina, A. and Cano-Delgado, A.I. (2020). The physiology of plant responses to drought. Science. 368: 266–269. DOI: 10.1126/science.aaz7614

Haghighi, M., Saadat, Sh. and Abbey, L. (2020). Effect of exogenous amino acids application on growth and nutritional value of cabbage under drought stress. Scientia Horticulturae. 272: 109561. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109561.

Heidari, N. (2015). Effects of drought stress on photosynthesis, its parameters and relative water content of anise (*Pimpinella anisum* L. Journal Plant Resarch Iran Journal Biology. 27: 829–839.

Heidarpour, O., Esmaeeli pour, B., Soltani, A. and Khorramdel, S. (2020). Effect of vermicompost on morphophysiological, biochemical and yield characteristics of summer Savory *(Satureja hortensis* L.) under different irrigation regimes. Journal of Agroecology. 12(3): 507-522. DOI: 10.22067/jag.v12i3.79634.

Hoekstra, F.A., Golovina, E. A. and Buitink, J. (2001). Mechanisms of plant desiccation tolerance. Trends Plant Science. 6, 431–438. DOI: 10.1016/S1360-1385(01)02052-0.

Hu, Y. and Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. Journal Plant Nutr Soil Science. 168: 541–549.

Hwang, M.N. and Ederer, G.M. (1975). Rapid hippurate hydrolysis method for presumptive identification of group B streptococci. Journal Clin Microbiology. 1: 114 LP – 115.

Iannucci, A., Russo, M., Arena, L., Di Fonzo, N. and Martiniello, P. (2002). Water deficit effects on osmotic adjustment and solute accumulation in leaves of annual clovers. European Journal of Agronomy. 16: 111–122. DOI: 10.1016/S1161-0301(01)00121-6.

Irigoyen, J.J., Einerich, D.W. and Sánchez- Díaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativd*) plants. Physiology Plant. 84: 55–60.

Kage, H., Kochler, M. and Stützel, H. (2004). Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions: measurement and simulation. European Journal of Agronomy. 20: 379–394. DOI: 10.1016/S1161-0301(03)00061-3.

Khazaie, H.R., Nadjafi, F. and Bannayan, M. (2008). Effect of irrigation frequency and planting density on herbage biomass and oil production of thyme (*Thymus vulgaris*) and hyssop (*Hyssopus officinalis*). Industrial Crops and Products. 27: 315–321. DOI: 10.1016/j.indcrop.2007.11.007.

Khorasaninejad, S., Ahmadabadi, A.A. and Hemmati, Kh. (2018). The effect of humic acid on leaf morphophysiological and phytochemical properties of *Echinacea purpurea* L. under water deficit stress. Scieence Horticulturae. 239: 314-323. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.03.015.

Knudsen, D., Peterson, G.A. and Pratt, P.F. (1983). Lithium, sodium, and potassium. Methods Soil Anal Part 2 Chem Microbiol Prop. 9: 225–246. DOI: 10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c13.

Lošák, T., Hlušek, J., Filipčík, R., Pospíšilová, L., Maňásek, J., Prokeš, K., Buňka, F., Kráčmar, S., Mårtensson, A. M. and Orosz, F. (2010). Effect of nitrogen fertilization on metabolisms of essential and non-essential amino acids in field-grown grain maize (*Zea mays* L.). Plant, Soil Environment. 56: 574-579. DOI: 10.17221/288/2010-PSE.

Lum, M.S., Hanafi, M.M., Rafii, Y.M. and Akmar, A.S.N. (2014). Effect of drought stress on growth, proline and antioxidant enzyme activities of upland rice. Journal Animal Plant Science. 24, 1487–1493.

Maia, J.M., De Macedo, C.E.C., Voigt, E.L., Freitas, J.B.S. and Silveira J.A.G. (2010). Antioxidative enzymatic protection in leaves of two contrasting cowpea cultivars under salinity. Biology Plant. 54:159–163. DOI: 10.1007/s10535-010-0026-y.

Maleki, M., Sobhanian, H., Yazdanpanah, E., Maleki, A. (2022). The effect of salicylic acid on the yield of vegetative organs and active ingredients of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) under drought stress. Journal of Plant Environmental Physiology, 17(66):89-107. DOI: 10.30495/iper.2022.1952614.1773.

Murphy, J. and Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta. 27: 31–36. DOI: 10.1016/S0003-2670(00)88444-5.

Omidbaigi, R. (2005). Production and processing of medicinal plants. Beh-Nashr: Mashhad 210–225.

Özdemir, F., Bor M, Demiral, T. and Türkan, İ. (2004). Effects of 24-epibrassinolide on seed

germination, seedling growth, lipid peroxidation, proline content and antioxidative system of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity stress. Plant Growth Regulation. 42: 203–211. DOI: B:GROW.0000026509.25995.13.

Rampino, P., Pataleo, S., Gerardi, C., Mita, G. and Perrotta, C. (2006). Drought stress response in wheat: physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes. Plant Cell Environment. 29: 2143–2152. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2006.01588.x.

Rezaei Chiyaneh, E., Zehtab Salmasi, S., Golezani Ghassemi, K. and Delazar, A. (2013). Effect of irrigation treatments on yield and yield components of three fennel (*Foenicolum vulgare* L.) landraces. Journal Agriculture Science Sustain Prod. 22: 57–71.

Roje, S. (2006). S-Adenosyl-L-methionine: beyond the universal methyl group donor. Phyto. 67: 1686–1698. DOI: 10.1016/j.phytochem.2006.04.019.

Sardans, J. and Peñuelas, J. (2008). Drought changes nutrient sources, content and stoichiometry in the bryophyte *Hypnum cupressiforme* Hedw. growing in a Mediterranean forest. Journal of Bryology. 30: 59–65. DOI: 10.1179/174328208X281987.

Selah Varzi, Y., Tehrani, A. and Gazanchian, A. (2008). Physiomorphological changes under drought stress and rewatering in endemic and exotic turfgrasses. Iranian Journal of Horticultural Science and Technology. 9: 193–204.

Shiponi, S. and Bernstein, N. (2021). Response of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.) genotypes to P supply under long photoperiod: Functional phenotyping and the ionome. Industrial Crops and Products. 161: 113154. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.113154.

Showler, A.T. and Castro, B.A. (2010). Influence of drought stress on Mexican rice borer (*Lepidoptera*: *Crambidae*) oviposition preference in sugarcane. Crop Protection. 29: 415–421. DOI: 10.1016/j.cropro.2009.07.014.

Song, J.T., Lu, H. and Greenberg, J.T. (2004). Divergent roles in *Arabidopsis thaliana* development and defense of two homologous genes, aberrant growth and death2 and agd2-like defense response protein1, encoding novel aminotransferases. Plant Cell. 16, 353–366. DOI: 10.1105/tpc.019372.

Soroori, S., Danaee, E., Hemmati, K. and Ladan Moghadam, A. (2022). Effect of spermidine foliar application on some morphophysiological traits and secondary metabolites of marigold (*Calendula officinalis* L.) under drought stress. Journal of Plant Environmental Physiology 17(66): 108-125. DOI: 10.30495/iper.2022.690251.

Swamy, K.N. and Rao, S.S.R. (2009). Effect of 24-epibrassinolide on growth, photosynthesis, and essential oil content of *Pelargonium graveolens* (L.) Herit. Russian Journal Plant Physiology. 56:616–620. DOI: 10.1134/S1021443709050057

Taiz, L. and Zeiger, E. (2006). Plant Physiology Sinauer Associates. Inc., Publ. 764p.

Wei, Z., and Li, J. (2016). Brassinosteroids regulate root growth, development, and symbiosis. Mol Plant. 9: 86–100.

Xu, Ch. and Leskovar, D.I. (2015). Effects of A. nodosum seaweed extracts on spinach growth, physiologyand nutrition value under drought stress. *Scientia Horticulturae. 183*, 39–47.

Yaang, X. (2008). Effects of a nonionic surfactant on plant growth and physiology. PhD Thesis, Faculty of University, Auburn of Alabama.

Yang, W., Rich, P.J., Axtell, J.D., Wood, K.V., Bonham, C.C., Ejeta, G., Mickelbart, M.V. and Rhodes, D. (2003). Genotypic variation for glycinebetaine in sorghum. Crop Science. 43: 162–169. DOI: 10.2135/cropsci2003.1620.

Zhaang, S., Cai, Z. and Wang, X. (2009). The primary signaling outputs of brassinosteroids are regulated by abscisic acid signaling. Proceedings of the National Academy of Sciences. 106: 4543–4548. DOI: 10.1073/pnas.0900349106.

Zhang, M., Zhai, Z., Tian, X., Duan, L. and Li, Z. (2008). Brassinolide alleviated the adverse effect of water deficits on photosynthesis and the antioxidant of soybean (*Glycine max* L.). Plant Growth Regulation. 56: 257–264. DOI: 10.1007/s10725-008-9305-4.