

Effects of silicone on yield, morphophysiological, and phytochemical properties of *Hyssopus officinalis* under irrigation regimes

A. Shafitali¹, S. Khorasaninejad^{2*} and A.R. Shahbazi³

1 MSc. graduated in Medicinal and Aromatic Plants, Dept. Horticultural Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2* Corresponding author, Associted Prof., Dept. Horticultural Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: khorasaninejad@gau.ac.ir

3 MSc. graduated in Medicinal and Aromatic Plants, Dept. Horticultural Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources Gorgan, Iran.

Extended Abstract

Background and purpose:

Water shortage is one of the most important environmental factors that may reduce the growth and yield of many agricultural crops. Silicon, as the second most abundant element in the earth's crust, plays a vital role in resisting biotic and abiotic stresses in plants. Considering the increasing problems of water scarcity in Iran and the need to know about drought tolerant plants and the treatments to help increase this tolerance, this research aimed to study the effect of silicon on yield, morpho-physiological, and phytochemical characteristics of hyssop (*Hyssopus officinalis*) under irrigation regimes in a pot experiment in the Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Methodology:

A factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications (each replication included two pots). Drought stress levels included: [(D1) 100% field capacity (FC), (D2) 75% FC, (D3) 50% FC, and (D4) 25% FC] during three months. Different silicon levels of [(S1) zero (control), (S2) 0.75, (S3) 1.5, and (S4) 2.25 mg/liter] were also sprayed four times, once every three weeks. At full flowering stage, the tested traits including root and shoot length, fresh and dry weight of root and shoot, leaf area, chlorophyll and carotenoid content, total phenol, total flavonoid, antioxidant activity, percentage of essential oil were evaluated.

Results:

The results showed that different irrigation regimes had a significant effect on all the measured traits except aerial weight and internode length. So, drought stress decreased the fresh and dry weight of the root, the leaf area, and the number of branches. Whereas, drought stress increased the amount of total phenol and the percentage of essential oil. Also, the silicon effects were significant on all the measured traits except the number of flowers. Increasing the silicon concentration caused an increase in the plant leaf area and the essential oil percentage.

Conclusion:

Increasing the concentration of silicon in foliar spraying caused an increase in the yield components of the hyssop plant under water stress conditions. At the same time, this treatment was able to increase the production of plant secondary metabolites, including total phenolic compounds, flavonoids, essential oil percentage, and as a result, increase the percentage of free radical inhibition. These results indicate the

improving effects of silicon on hyssop performance as a medicinal plant under drought stress conditions. According to the result, the concentration of silicon was 1.5 mg/liter was most effective.

Keywords: Antioxidant activity, Chlorophyll, Essential oil percent, Total flavonoids, Total phenol.

اثر سیلیسیم بر عملکرد و برخی ویژگی‌های مورفولوژیک و فیتوشیمیایی زوفا (*Hyssopus officinalis*) تحت رژیم‌های آبیاری

امین شفیع‌تالی^۱، سارا خراسانی‌نژاد^{۲*}، علیرضا شهبازی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^{۲*} نویسنده مسئول مکاتبات، دانشیار، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

پست الکترونیک: khorasaninejad@gau.ac.ir

۳- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده

سابقه و هدف: کمبود آب از مهمترین عوامل محیطی کاهش رشد و عملکرد بسیاری از محصولات کشاورزی در ایران و دنیاست. سیلیسیم، به‌عنوان دومین عنصر فراوان در پوسته زمین، نقش مهمی را در ایجاد مقاومت به تنش‌های زنده و غیرزنده در گیاهان ایفا می‌کند. با توجه به مشکلات کم‌آبی روزافزون در ایران و نیاز به شناخت گیاهان متحمل به خشکی و تیمارهای کمک به افزایش این تحمل، این تحقیق با هدف بررسی اثر سیلیسیم بر عملکرد و برخی ویژگی‌های مورفولوژیک و فیتوشیمیایی زوفا (*Hyssopus officinalis*) تحت رژیم‌های آبیاری به‌صورت آزمایش‌گلدانی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، به اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها: آزمایش‌گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، در سه تکرار (هر تکرار شامل دو گلدان بود) انجام شد که سطوح مختلف تنش خشکی شامل چهار سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی در طی سه ماهه، در چهار سطح مختلف سیلیسیم، صفر (شاهد)، ۰/۷۵، ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر به‌صورت محلول‌پاشی برگ‌ها در چهار نوبت، هر سه هفته یک‌بار، صورت پذیرفت. در زمان گلدهی کامل، اجزای عملکرد، صفات مورفولوژیک و فیتوشیمیایی شامل طول ریشه و طول ساقه، وزن تر و خشک ریشه و وزن خشک زی‌توده، سطح برگ، فنل‌کل، فلاونوئیدکل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، درصد اسانس مورد ارزیابی قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری نشان داد که رژیم‌های مختلف آبیاری دارای اثر معنی‌داری روی همه صفات اندازه‌گیری‌شده به‌جز وزن‌تر اندام‌هوایی و طول میان‌گره بود به‌طوری‌که تنش خشکی باعث کاهش وزن تر و خشک ریشه، کاهش سطح برگ و نیز کاهش تعداد شاخه فرعی گردید و با افزایش سطح خشکی میزان فنل‌کل و نیز درصد اسانس افزایش یافت. همچنین با بررسی اثر سیلیسیم در شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری اثر معنی‌داری روی افزایش کلیه صفات اندازه‌گیری‌شده مشاهده شد. به‌طوری‌که با کاربرد سیلیسیم، وزن تر و خشک ریشه، طول ریشه و طول ساقه و تعداد میانگره‌ها، فنل‌کل، فلاونوئیدکل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و درصد اسانس، تحت تاثیر تنش خشکی، افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: افزایش غلظت سیلیسیم در محلول‌پاشی سبب افزایش اجزای عملکرد گیاه زوفا در شرایط تنش کم‌آبی گردید. هم‌زمان این تیمار توانست سبب افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه گیاه شامل مجموع ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی، درصد اسانس و در نتیجه افزایش درصد مهار رادیکال‌های آزاد گردد. این نتایج بیانگر خاصیت بهبود دهنده سیلیسیم روی عملکرد گیاه دارویی زوفا در شرایط تنش خشکی می‌باشد. با توجه به غلظت‌های مورد استفاده سیلیسیم، مشاهده شد مؤثرترین غلظت سیلیسیم ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: درصد اسانس، فلاونوئیدکل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فنل‌کل، طول ریشه

مقدمه

تغییرات مداوم در شرایط محیطی، باعث ایجاد شرایط نامطلوب و استرس‌زا مانند شوری، خشکی، دمای بالا شدید و شرایط غرقابی می‌شود که باعث تأثیر نامطلوب بر رشد و نمو گیاه می‌گردد (Rahman *et al.*, 2021). گیاهان در معرض تنش‌های مختلف محیطی قرار می‌گیرند که مهم‌ترین آنها تنش خشکی است. خشکی اشاره به وضعیتی دارد که در آن کاهش ظرفیت آب گیاه باعث ایجاد اختلال در فعالیت‌های طبیعی گیاه شود. با توجه به فراگیر بودن این تنش، پرداختن به این موضوع می‌تواند حائز اهمیت باشد (Sanginabadi & Khorasaninejad, 2016). این تنش می‌تواند باعث بازدارندگی فرایندهای تقسیم و رشد سلولی و بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش جریان دی‌اکسیدکربن به درون مزوفیل برگ شود و نیز باعث از دست دادن تورژسانس سلولی، آسیب به سیستم فتوسنتزی و کاهش میزان رشد می‌گردد (Madani *et al.*, 2019). به طوری که در گیاه دارویی استویا مشخص شد با اعمال خشکی شدید، ارتفاع بوته، طول اندام هوایی، وزن تر و نیز خشک اندام هوایی، زیست‌توده تر و خشک به جز تعداد شاخه جانبی و تعداد میانگره کاهش یافت (Zarei *et al.*, 2021). تنش خشکی همچنین توان جذب نیتروژن، دسترسی گیاه به نیتروژن و نیز فعالیت آنزیم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن، بیشتر شامل نیترات ردوکتاز و گلوتامین سنتتاز را کاهش می‌دهد و باعث کاهش فتوسنتز و در نتیجه کاهش تولید در گیاه می‌شود. همچنین سنتز متابولیت‌های ثانویه و متابولیسم گیاه تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد (Amiri *et al.*, 2015). در سطح گیاه، پاسخ به تنش خشکی پیچیده است، زیرا انعکاسی از مجموع اثرهای تنش و پاسخ‌های مربوطه در تمام سطوح پایین سازمانی، در فضا و زمان است (Shalata & Neumann, 2001). خشکی به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور کنترل‌کننده عملکرد محصولات، تقریباً روی همه فرایندهای رشد گیاه

تأثیرگذار است و باعث کاهش رشد و کاهش بیومس در بیشتر گیاهان می‌شود (Bagheri *et al.*, 2017). به طوری که در پژوهشی مشخص شد با افزایش تنش خشکی روی اسطوخودوس انگلیسی (*Lavandula angustifolia*)، وزن تر ساقه و وزن تر و خشک ریشه، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت که این تغییرات معنی‌دار گزارش شدند (Gorgini Shabankareh *et al.*, 2021a).

گیاهان به‌منظور مقابله با تنش خشکی، پاسخ‌ها و سازش‌های متنوعی را در سطوح مختلف نشان می‌دهند (Willson *et al.*, 2008). از جمله سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی گیاهان تحت تنش خشکی، افزایش سطوح ترکیبات فنلی است که این ترکیبات به‌عنوان پالاینده‌های گونه‌های واکنشگر اکسیژن عمل کرده و باعث ثبات غشاهای سلولی و مانع از پراکسیداسیون لیپیدها می‌شوند (Chang *et al.*, 2002). امروزه نقش متابولیت‌های ثانویه در سیستم دفاعی گیاهان ثابت شده است، اما هنوز بررسی سازوکار تأثیر استرس‌های محیطی بر تولید این مواد به‌طور واضح قابل‌درک نیست. شواهد زیادی نشان می‌دهد که در شرایط تنش تولید برخی از این ترکیب‌ها تا چندین برابر افزایش می‌یابد (Efeoğlu *et al.*, 2009). از جمله متابولیت‌های ثانویه می‌توان به ترکیب‌های فنلی - فلاونوئیدها اشاره کرد. فلاونوئیدها به‌دلیل نقش آنتی‌اکسیدانی خود به‌طور مستقیم با وارد شدن در واکنش‌های احیایی و به‌طور غیرمستقیم به‌وسیله شلاته کردن آهن باعث جلوگیری از تنش اکسیداتیو می‌شوند و مانند بسیاری دیگر از پلی‌فنل‌ها جمع‌کننده رادیکال‌های آزاد هستند، زیرا به‌عنوان گروه‌های قوی الکترون‌دهنده و پروتون‌دهنده عمل می‌کنند (Seyoum *et al.*, 2003) در همین راستا ثابت شده فلاونوئیدها توان پاک‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن را دارند و می‌توانند از تنش‌های اکسیداتیو جلوگیری کنند. بررسی میزان

وزن خشک گیاه است (Hodson et al., 2005). علاوه بر سیلیسیم که توسط ریشه جذب گیاه می‌شود، کود سیلیسیم نیز می‌تواند به صورت محلول‌پاشی استفاده شود تا باعث افزایش تولید ماده خشک گیاهی گردد (De souza junior, 2021; Hussain et al., 2021). کاربرد سیلیکون منجر به افزایش کمپلکس لیگنین - سیلیکون - کربوهیدرات در دیواره سلول‌های اپیدرم برنج می‌گردد (Nascimento et al., 2018). همچنین سیلیسیم باعث افزایش محتوی کلروفیل و بهبود فتوسنتز در شرایط تنش خشکی می‌شود (Gong et al., 2005). همچنین در گیاه گاوزبان دارویی (*Echium amoenum*) تیمار ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم باعث تأثیرات مثبتی بر وزن تر اندام هوایی و محتوای کلروفیل گیاه شد (Torabi et al., 2013). سیلیسیم با افزایش میزان بیان و فعالیت آنزیم‌های ضد اکسنده تحت تأثیر تنش خشکی و نیز با کاهش محتوای رادیکال‌های آزاد در سلول، مانع از خسارت‌های اکسنده به سلول‌های گیاه جو و افزایش میزان تجمع پرولین در هنگام تنش خشکی در این گیاه شد (Hadad and Moshiri, 2010).

زوفا با نام علمی *Hyssopus officinalis* که به خانواده نعناعیان (Lamiaceae) تعلق دارد، گیاهی خشبی، چندساله، به صورت درختچه با ساقه‌های چهارگوش کوتاه به ارتفاع ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متر است. این گیاه بیشتر به صورت بوته‌ای و ریشه‌های مستقیم با انشعابات فراوان است. برگ‌های این گیاه نیز صاف، کوچک، باریک، نوک‌تیز و معطر است که از نقاط مختلف ساقه بدون دم‌برگ به‌طور متقابل خارج می‌شوند (Kochaki et al., 2008). زوفا از کلمه یونانی آژوب به معنای گیاه مقدس گرفته شده است و یکی از مهمترین ۱۳۰ گونه گیاهی است که برای معطر کردن نوشابه‌ها در قدیم از آن استفاده می‌شد و در بیشتر فرماکوپه‌های معتبر از پیکر رویشی زوفا به‌عنوان دارو نام برده شده است

فلاونوئید کل کلزا (*Brassica napus*) در شرایط تنش آبی نشان داد که این ماده به‌عنوان متابولیت ثانویه در گیاه افزایش یافت (Sangtarash et al., 2009) و مقدار فلاونوئید در اثر افزایش تنش خشکی در گیاه کتان بالا رفت (Jubany-Mari et al., 2010).

گیاهان دارویی مخازن غنی از متابولیت‌های ثانویه یعنی مواد مؤثره اساسی بسیاری از داروها هستند. مواد مذکور با هدایت فرایندهای ژنتیکی ساخته می‌شوند اما عوامل محیطی نیز بر روی آنها تأثیرگذار است (Omidbeigi, 2009). تأثیرات تنش خشکی در کاهش عملکرد اسانس در گیاه همیشه‌بهار (*Calendula officinalis*) گزارش شده است (Khalid et al., 2012). همچنین در گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea*) تنش خشکی منجر به بروز تغییراتی در رشد شد که این تغییرات ممکن است رشد را مهار کرده و عملکرد را کاهش دهد (Abadi et al., 2017). در گیاه اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia*) تنش خشکی تولید اسانس را تحریک کرد. در این شرایط نوعی چالش در گیاه برای رشد و دفاع از خود در شرایط تنش به وجود می‌آید و باعث تولید مقادیر بالای ترین به‌علت تخصیص کمتر کربن برای رشد می‌شود (Gorgini Shabankareh et al., 2021b). همچنین در گیاه مرزه خوزستانی تنش خشکی اثر معنی‌داری بر مقدار ترکیبات اصلی اسانس داشت (Shariat et al., 2018; Gorgini Shabankareh and Khorasaninejad, 2017).

سیلیسیم دارای عملکردهای اکولوژیکی مختلفی است و با مجموعه‌ای از فرایندهای گیاهی و نیز در تعاملات بینابینی با محیط زیست و سایر موجودات زنده عمل می‌کند (Coskun et al., 2019). میزان سیلیکون در خاک، یک تا ۴۵ درصد از وزن خشک خاک را شامل می‌شود (Sommer et al., 2006) و شکل محلول سیلیکون در خاک، به صورت اسیدسیلیسیک بوده، میزان سیلیکون در گیاهان ۰/۱ تا ۱۰ درصد

(D1) ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، (D2) ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، (D3) ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و (D4) ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و فاکتور دوم، محلول سیلیسیم در چهار غلظت (S1) صفر (شاهد)، (S2) ۰/۷۵، (S3) ۱/۵، (S4) ۲/۲۵ میلی گرم بر لیتر) بود که در سه تکرار، در محوطه پژوهشی با سقف پلاستیکی موقت (به دلیل جلوگیری از ریزش آب باران) انجام گردید. برای بررسی وضعیت خاک مورد استفاده در گلدان‌های آزمایش، نمونه‌ای از خاک مذکور جهت انجام تجزیه‌های مربوطه به آزمایشگاه ارسال گردید (جدول ۱).

هر واحد آزمایشی متشکل از ۲ گلدان بوده و در مجموع ۹۶ گلدان استفاده شد. همچنین علاوه بر این تعداد گلدان، برای تعیین میزان تبخیر از سطح خاک در هر تیمار، در هر بلوک یک گلدان اضافی حاوی خاک و بدون گیاه نگهداری شد. گلدان‌های مورد استفاده یک‌دست، با وزن و شکل یکسان، از نوع پلاستیکی، با قطر دهانه ۲۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی متر بودند. اعمال تیمارهای تنش بر اساس روش وزنی بود. ابتدا در کف هر یک از گلدان‌ها به مقدار مساوی سنگ ریزه (برای انجام زهکشی) ریخته شد و با استفاده از ترازو به صورت هم وزن از خاک (به نسبت ۳ خاک باغچه، ۱ ماسه بادی، ۱ ورمی کمپوست) پر شدند، در داخل هر گلدان از ۸ کیلوگرم خاک استفاده شد. سپس با افزودن آب، خاک هر گلدان را به درجه اشباع رسانده و به مدت ۴۸ ساعت روی سطح مشبک قرار داده شد تا هر گلدان پس از زهکشی آب اضافی به ظرفیت زراعی مزرعه برسد. در این مرحله گلدان‌ها به سرعت وزن شده و خاک آنها در دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۴۸ ساعت کاملاً خشک گردید. در ادامه پس از مشخص شدن درصد وزنی رطوبت خاک در ظرفیت زراعی، میزان رطوبت موجود در خاک برای اعمال تیمارهای رطوبتی مختلف مشخص شد. برای کنترل وزن خشک بوته‌ها، هر تیمار رطوبتی دارای گلدان اضافی بود تا وزن خشک بوته‌ها به وزن خشک گلدان‌ها اضافه شده و مقدار صحیحی از آب در زمان اعمال تیمارهای رطوبتی به هر گلدان اختصاص یابد (Mozaffari et al., 2016).

(Khajehhosseini et al., 2022). برگ‌ها و سرشاخه‌های گلدار آن دارای اسانس است. اسانس زوفا دارای خواص ضدباکتریایی و ضدقارچی است و در صنایع مختلف کاربرد فراوانی دارد (Džamić et al., 2013) که مقدار اسانس در پیکر رویشی زوفا متفاوت و بین ۰/۳ تا ۱ درصد می‌باشد. از مواد دیگر موجود در پیکر رویشی زوفا می‌توان به فلاونوئید، تانن و مواد تلخ و مواد دیگری مانند (دیوزمین) و (هیسوپین) و ترکیبات موسیلاژی اشاره کرد (Pakseresht et al., 2016).

گیاهان در طی رشد در زیستگاه خود به‌طور پیوسته تحت عوامل مختلف اقلیمی و خاکی قرار می‌گیرند. در این رابطه باید الگوهای بومی را به‌خوبی شناسایی کرده و براساس اطلاعات بدست آمده از آن الگو، گیاه دارویی مورد نظر را تحت شرایط مناسب، کشت نمود (Naseri et al., 2012; Najjarfirozjaee et al., 2014). از مهم‌ترین مسائل حال حاضر کشور، خشکی و کمبود آب و تاثیر آن بر کشاورزی و تولید محصولات کشاورزی است. از آنجایی که با توجه به مطالعات پیشین روی اثر سیلیسیم بر افزایش تحمل گیاهان به شرایط تنشی به‌ویژه تنش‌های اسمزی شامل تنش‌های شوری و خشکی (Zare et al., 2018)، سازوکار و نحوه اثر این عنصر به‌عنوان یک عنصر مفید روی گیاه دارویی زوفا شناخته شده نیست از این رو در این تحقیق سعی شده است با بررسی حد تحمل این گیاه به ظرفیت‌های زراعی مختلف در کل دوره رشد فعال سالانه گیاه، به مطالعه نحوه اثر بخشی سیلیسیم و نقطه اثر آن در گیاه پرداخت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت گلدانی فاکتوریل بر پایه دو فاکتور در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان طی سال زراعی ۹۶-۹۷ اجرا شد. فاکتور اول شامل رژیم‌های آبیاری در چهار سطح

جدول ۱- نتایج حاصل از تجزیه خاک مورد استفاده در آزمایش گلدانی

Table 1. The results of soil analysis used in a pot experiment

Acidity pH	Soil salinity EC*10ds/m.	saturation %	TNV %	N %	OC%	Phosphorus (Pava) ppm	potassium (Kava)ppm	Clay %	Silt %	Sand %	Soil testure L-S
7.74	1.062	36.42	27	0.11	1.0	11.9	191	6	42	52	L-S

اندازه‌گیری طول ریشه و ساقه: برای اندازه‌گیری طول ریشه و ساقه، ریشه و اندام هوایی توسط قیچی جدا شد، سپس طول ریشه و طول میان‌گره و طول ساقه با خط‌کش با دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه: پس از برداشت گیاه، ریشه و اندام هوایی از هم جدا و خاک از ریشه شسته شدند و به کمک ترازو وزن تر و بعد وزن خشک (آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت) اندازه‌گیری و ثبت شد.

اندازه‌گیری سطح برگ: برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ از هر گلدان ۲۰ برگ به‌طور تصادفی انتخاب شد و سطح برگ آنها توسط دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (Leaf area meter) اندازه‌گیری و میانگین آنها محاسبه شد.

تهیه عصاره متانولی: برای این منظور یک گرم از بافت خشک شده اندام هوایی و ریشه را وزن کرده و با ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد در داخل ظروف یکسان ریخته و با ورقه آلومینیومی پوشانده شد. به مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار داده شد و بعد از آن از کاغذ صافی عبور داده و برای انجام سایر آزمایش‌ها در یخچال و در یک محیط تاریک قرار داده شد (Beheshti et al., 2023; Mozaffari et al., 2017).

اندازه‌گیری محتوای فنل کل: میزان فنل کل به روش Folin Ciocalteu اندازه‌گیری شد. ابتدا ۲۰ میکرولیتر از عصاره برداشته و ۱/۱۶ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۰۰ میکرو فولین‌سیوکالتو به آن اضافه شد، سپس ۳۰۰ میکرولیتر کربنات سدیم یک مولار به محلول افزوده و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام بخار ۴۰ درجه سانتی‌گراد در تاریکی قرار داده شد. برای تهیه نمونه شاهد متانول خالص جایگزین عصاره متانولی گردید. سپس نمونه‌ها در طول موج ۷۶۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UNICO2800) قرائت

نشا مورد نیاز برای انجام آزمایش از شرکت زرین‌گیاه ارومیه تهیه شد. پس از آماده‌سازی گلدان‌ها، تعداد سه عدد نشا را در داخل هر یک از گلدان‌ها کاشته و بلافاصله آبیاری انجام شد و پس از استقرار نشاها نیز آبیاری به مدت دو هفته به صورت مساوی ادامه یافت، از این مرحله به بعد، تیمارهای آبیاری با توزین روزانه گلدان اضافی بدون گیاه و اضافه کردن آب مصرفی بر اثر تبخیر اعمال شد. در حقیقت کاهش وزن هر یک از گلدان‌های حاوی گیاه نشان‌دهنده میزان آب مصرفی از طریق تبخیر بود (هر گلدان روزانه وزن شده و مقدار آب مورد نیاز محاسبه و با استفاده از استوانه مدرج اضافه شد).

پس از گذشت دو هفته (روی گیاهان با طول اندام هوایی ۱۵ سانتی‌متر) و استقرار کامل گیاهان و با شروع رژیم‌های آبیاری، محلول‌پاشی با چهار سطح مختلف سیلیسیم (۰، ۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر) به مدت سه ماه و هر سه هفته یک بار (در مجموع در چهار نوبت) انجام شد (Khorasaninejad et al., 2023). پس از سه ماه از شروع کشت و کامل شدن رشد رویشی، با شروع گلدهی گیاهان بیرون آورده شدند و شاخص‌های مختلف رشد و عملکرد از قبیل طول ریشه و طول ساقه، وزن تر و خشک ریشه و وزن خشک زی‌توده، سطح برگ، فنل کل، فلاونوئیدکل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، درصد اسانس سنجش گردید. برای اندازه‌گیری خصوصیات مورفولوژیک و اجزای عملکرد از هر گلدان یک بوته کامل برداشت و پس از انجام مراحل پاک‌سازی و تمیز کردن بوته‌ها از خاک و سایر مواد به آزمایشگاه گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز دانشکده تولید گیاهی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان منتقل گردید.

اندازه‌گیری درصد اسانس: برای استخراج اسانس قسمت‌های رویشی گیاه را که قبلاً در محیط سایه، خشک شده بود توسط دستگاه خردکن به صورت قطعات ریز درآورده و میزان ۵۰ گرم از هر نمونه برای استخراج اسانس وزن شد. در ادامه برای استخراج اسانس گیاه نمونه‌های گیاهی از روش تقطیر با آب و با استفاده از دستگاه کلونجر اقدام به اسانس‌گیری شد. تعیین درصد اسانس با اندازه‌گیری مقدار وزن خشک نمونه گیاهی مورد استفاده برای اسانس‌گیری به وسیله دستگاه کلونجر انجام شد، سپس محاسبه مقدار اسانس حاصل از استخراج با استفاده از رابطه (۲) اقدام به محاسبه درصد اسانس در گیاه گردید.

$$\text{Equ. 2} \quad \text{درصد اسانس} = \frac{\text{وزن اسانس (گرم)}}{\text{وزن خشک گیاه (گرم)}} \times 100$$

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ تجزیه و تحلیل آماری شده و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون LSD در سطح پنج درصد انجام شد. نمودارها توسط نرم‌افزار Excel رسم گردید.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنش خشکی بر تمام پارامترهای مورفولوژیک به جز وزن تر گیاه و طول میانگره معنی‌دار شد (جدول ۲). همچنین تأثیر سیلیسیم بر تمام پارامترهای مورفولوژیک معنی‌دار شد (جدول ۲). اثر متقابل خشکی و سیلیسیم بر تمام پارامترهای مورفولوژیک معنی‌دار بود ($P < 0.01$) (جدول ۲).

برای پارامترهای فیتوشیمیایی نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تنش خشکی، سیلیسیم و اثر متقابل خشکی و سیلیسیم بر صفات فیتوشیمیایی زوفا معنی‌دار بود ($P < 0.01$) (جدول ۳).

گردید. برای رسم منحنی کالیبراسیون از غلظت‌های متفاوت اسیدگالیک (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) در متانول ۸۰ درصد استفاده گردید. این مقدار برای یک گرم در لیتر محاسبه شد. فنل‌کل بر حسب میلی‌گرم اسیدگالیک در ۱۰۰ گرم برگ خشک به دست آمد (Mcdonald *et al.*, 2001).

اندازه‌گیری محتوای فلاونوئید کل: برای محاسبه فلاونوئید از روش آلومینیوم‌کلرید استفاده شد. به صورتی که ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره متانولی با ۱/۵ میلی‌لیتر متانول، ۰/۱ میلی‌لیتر آلومینیوم‌کلرید ۱۰ درصد در اتانول، ۰/۱ میلی‌لیتر استات پتاسیم یک مولار و ۲/۸ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد. برای تهیه شاهد، متانول خالص جایگزین عصاره متانولی گردید. محلول حاصل ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار داده شد و بعد در طول موج ۴۱۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد (Chang *et al.*, 2002). برای رسم منحنی استاندارد از غلظت‌های مختلف استاندارد کوئرستین (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) استفاده شد.

اندازه‌گیری محتوای فعالیت آنتی‌اکسیدانی: برای اندازه‌گیری میزان مهار رادیکال‌های آزاد DPPH (دی‌فنیل پیکریل هیدرازیل)، ابتدا یک میلی‌لیتر از عصاره متانولی با یک میلی‌لیتر DPPH با غلظت ۰/۱ میلی‌مولار مخلوط شد. برای نمونه شاهد یک میلی‌لیتر متانول خالص به جای یک میلی‌لیتر عصاره متانولی قرار داده شد و برای بلانک از متانول خالص استفاده شد. بعد از ۳۰ دقیقه تاریکی، نمونه‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شدند. اعداد به دست آمده از جذب نمونه توسط رابطه (۱) به درصد مهار رادیکال آزاد تبدیل شد (Miliascas *et al.*, 2002).

$$\text{Equa 1} \quad \text{DPPH} = \frac{(As - Ac)}{Ac} \times 100$$

در این رابطه AS و AC به ترتیب برابر با عدد جذب کنترل و نمونه است. اعداد بدست آمده برابر با درصد مهار رادیکال‌های آزاد در عصاره متانولی (۰/۱ ppm) نمونه‌ها می‌باشد (Miliascas *et al.*, 2002).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر سیلیسیم بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک زوفا تحت تنش خشکی

Table 2. Analysis of variance of the effect of silicon and drought stress on morpho-physiological traits of *Hyssopus officinalis*

Sov.	df	MS							
		Plant Biomes	Root fresh weight	Root dry weight	Internode lenght	Number of Branch	Root lenght	Shoot height	Leaf area
Replication	2	0.0125	0.001	0.110	0.16	0.39	3.66	6.77	0.059
Irrigation (I)	3	6.770**	3.6**	1.339**	0.109	31.4**	14.42**	231.5**	0.95**
Silicon (S)	3	3.813**	0.37**	0.644*	0.69*	13.57**	9.06*	145.72**	0.9**
I × S	9	4.783**	0.94**	0.123*	0.706**	14.09**	16.32**	123.44**	0.184*
Error	30	0.022	0.021	0.111	0.23	1.66	2.19	5.94	0.09
CV%		3.677	7.45	25.44	22.65	16.32	12.49	7.58	24.84

* and ** significant at 5 and 1% probability level, respectively.

*، ** = به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سیلیسیم بر ویژگی‌های فیتوشیمیایی زوفا تحت تنش خشکی

Table 2. Analysis of variance of the effect of silicon and drought stress phytochemical traits of *Hyssopus officinalis*

Sov.	df	MS			
		Antioxidant activity	Total flavonoid	Total Phenol	Essential oil percentage
Replication	2	0.64	5.145	0.592	0.019
Irrigation (I)	3	301.107**	255.373**	161.416**	0.835**
Silicon (S)	3	309.995**	187.596**	228.389**	0.313**
I × S	9	101.767**	79.097**	413.186**	1.147**
Error	30	0.800	20.380	1.072	0.0076
CV%		3.01	22.919	1.915	7.706

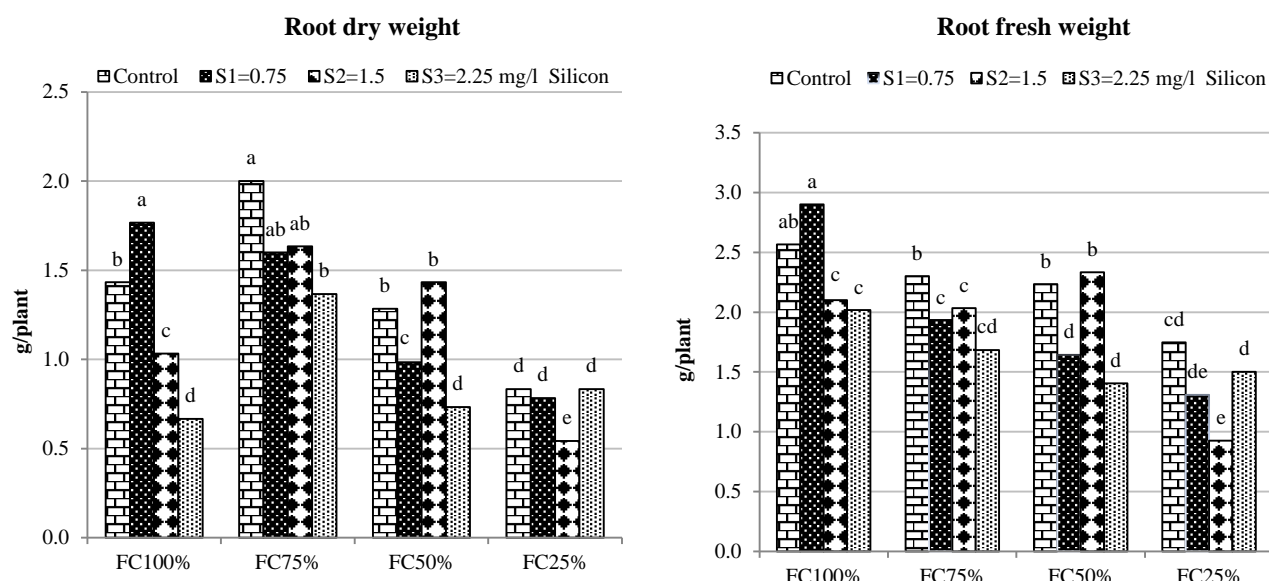
* and ** significant at 5 and 1% probability level, respectively.

*، ** = به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

مقایسه میانگین‌ها

بیشترین میزان وزن تر (۲/۱۵ گرم) و خشک ریشه (۱/۶ گرم) مربوط به سطوح شاهد و سیلیسیم با غلظت ۰/۷۵ میلی‌گرم بر لیتر بود (شکل ۱). مشابه این نتایج در پژوهش دیگری روی بررسی اثر سیلیسیم روی گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) در محیط‌های کشت مختلف به‌دست آمد و صرف‌نظر از نوع محیط کشت، وزن تر و خشک گیاه تحت تاثیر محلول پاشی سیلیسیم افزایش یافت (Khorasaninejad et al., 2023).

وزن تر و خشک ریشه: باتوجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، روند تغییرات وزن تر و خشک ریشه در تیمارها مشابه بود. به‌طوری‌که بیشترین میزان وزن تر (۲/۶۷ گرم) و خشک ریشه (۱/۸۸ گرم) به ترتیب از سطح اول رژیم آبیاری (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و سطح دوم رژیم آبیاری (۷۵ درصد ظرفیت زراعی) مشاهده شد. همچنین بررسی اثر سیلیسیم بر صفات مذکور معنی‌دار بود به‌طوری‌که



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و سیلیسیم بر وزن تر و خشک ریشه در گیاه زوفا

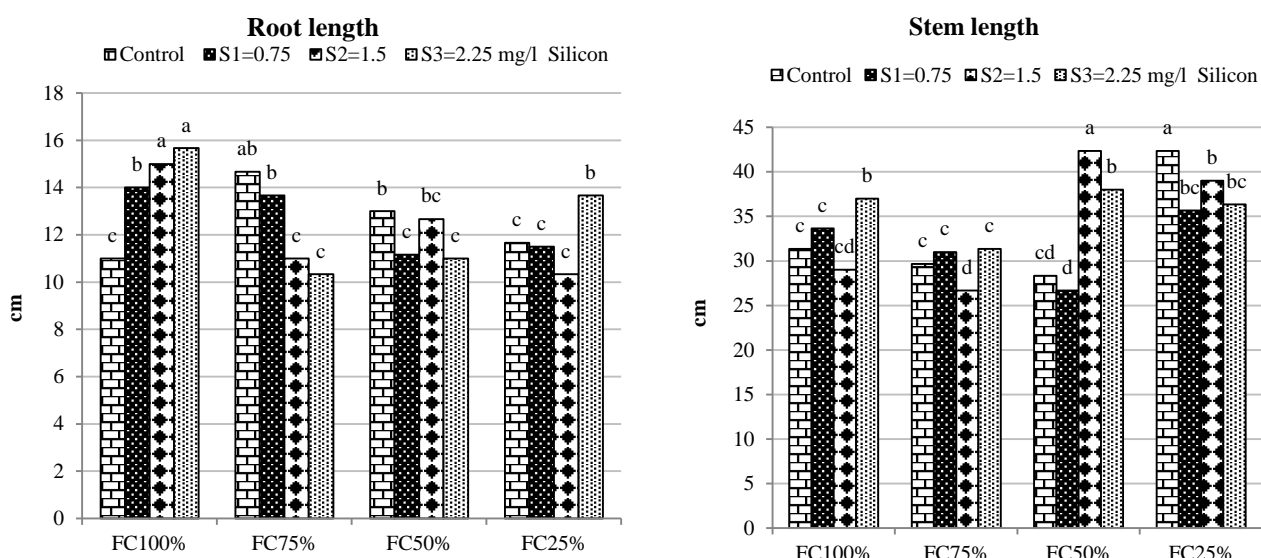
Figure 1. Mean of interaction of drought stress and silicon on root dry and fresh weight

Means with the similar alphabet do not have a significant difference at the 5% probability level.

میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

ریشه و جذب آب در شرایط تنش خشکی ضروری به نظر می‌رسد محلول‌پاشی سیلیسیم، باعث افزایش سیلیسی شدن اندودرم (درون پوست) و فیبری شدن ریشه شده و سبب افزایش رشد ریشه و نسبت ریشه به ساقه می‌گردد، بنابراین جذب آب ریشه را بهبود می‌بخشد (Wang et al., 2021).
طول میانگره: بیشترین میزان طول میانگره‌ها (۲/۷ سانتی‌متر) نیز در آبیاری (۲۵ درصد ظرفیت زراعی) غلظت ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم مشاهده شد (شکل ۳). در خصوص اثر فزاینده سیلیسیم روی بالاترین سطح خشکی می‌توان بیان نمود از آنجایی‌که دسترسی ریشه به آب در کمترین سطح قرار دارد، ریشه با گسترش انشعابات خود سعی در بیشترین میزان جذب آب را داشته که سیلیسیم به دلیل رسوب در ساختار دیواره سلولی سبب افزایش وزن خشک ریشه شده‌است. در تحقیقات مشابه نیز مشخص شده که تنش خشکی به‌تنهایی سبب خواهد وزن خشک ریشه می‌شود (Abadi et al., 2017) و اعمال سیلیسیم در شرایط محدودیت آبی می‌تواند سبب افزایش وزن خشک ریشه شود (Beheshti and Khorasaninejad, 2023).

طول ریشه و طول ساقه: بررسی نتایج مقایسه میانگین‌های مربوط به طول ریشه و طول ساقه (شکل ۲) نشان داد بیشترین میزان طول ساقه و طول ریشه به‌ترتیب از آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و غلظت ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم و آبیاری (۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی) به‌ترتیب با غلظت ۲/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم و شاهد بدون سیلیسیم مشاهده شد که با تیمار آبیاری ۲۵ درصد ظرفیت زراعی همراه با محلول‌پاشی سیلیسیم با غلظت ۲/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر به لحاظ آماری دارای اختلاف معنی‌دار نبود. نتایج مشابهی در تحقیقی روی بررسی اثر سیلیسیم بر شیرین بیان (*Glycyrrhiza uralensis*) در شرایط تنش‌های شوری و خشکی حاکی از آن است که افزودن سیلیسیم در شرایط تنش خشکی، پس از ۱۱۰ روز پس از شروع تیمار، به‌طور معنی‌داری طول ریشه، قطر ریشه و عملکرد ریشه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Zhang et al., 2018). می‌توان بیان نمود در شرایط تنش کم‌آبی، با تغییر در سطح و ظاهر ریشه، برای بهبود جذب آب در گیاه بسیار مهم است. در همین راستا، سیلیسیم برای رشد

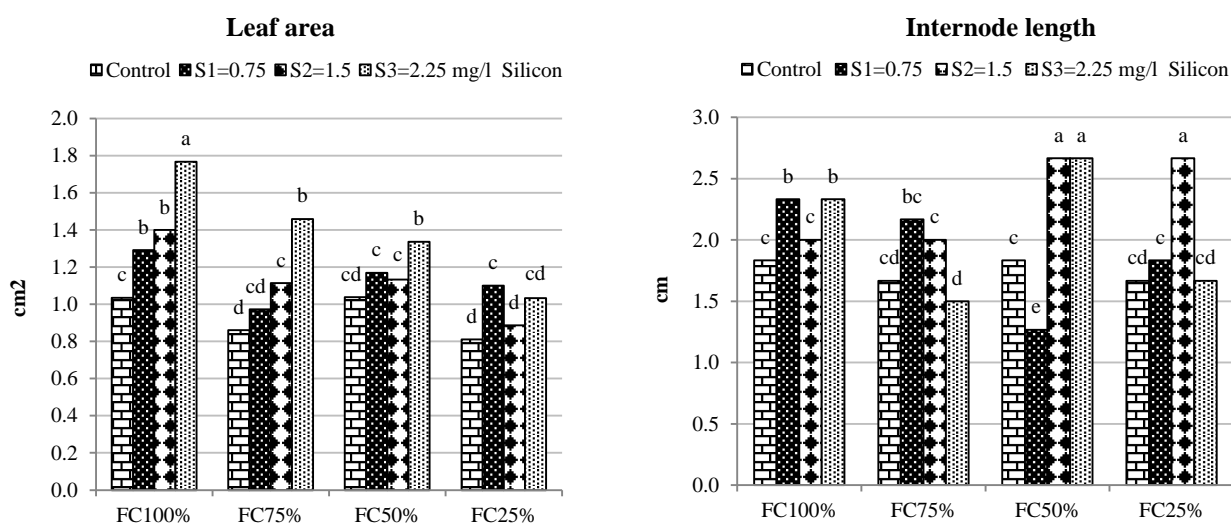


شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل خشکی و سیلیسیم بر طول ریشه و طول اندام هوایی در گیاه زوفا

Figure 2. Mean of interaction of drought and silicon on root dry and frsh weight in *Hyssopus officinalis*

Means with the similar alphabet do not have a significant difference at the 5% probability level.

میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل خشکی و سیلیسیم بر طول میانگره و سطح برگ در گیاه زوفا

Figure 3. Mean of interaction of drought and silicon on internode length and leaf area in *Hyssopus officinalis*

Means with the similar alphabet do not have a significant difference at the 5% probability level.

میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

میزان سطح برگ (۱/۷۵ سانتی مترمربع) مربوط به آبیاری نرمال همراه با محلول پاشی ۲/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر

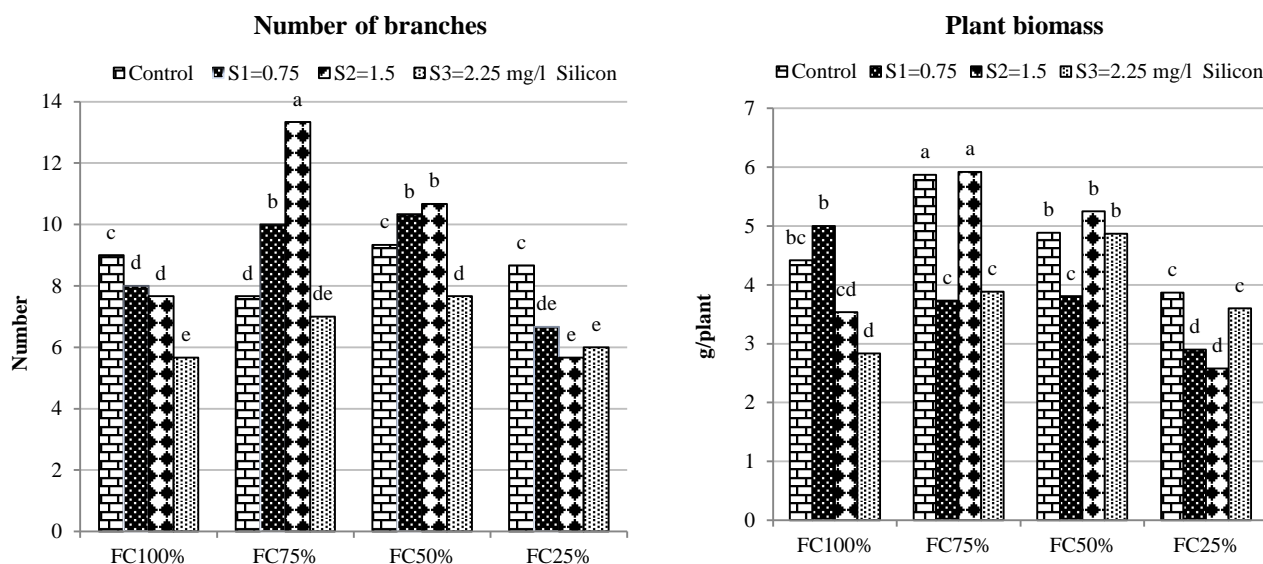
سطح برگ: اثر سیلیسیم و تنش خشکی و اثر متقابل آنها برای سطح برگ اثر معنی‌داری بود. به‌طوری‌که بیشترین

گلدانی برای بررسی واکنش اجزای عملکرد علوفه و کارایی مصرف گیاهان یونجه (*Medicago sativa* L.) به کاربرد سیلیسیم تحت تنش کم آبی انجام شد، مشخص گردید سیلیسیم علاوه بر بهبود کارایی مصرف آب، سبب افزایش تعداد شاخه فرعی در سطوح متوسط تنش گردید (Liu and Guo, 2013).

وزن زی توده خشک: در رژیم های آبیاری ۷۵ و ۵۰ ظرفیت زراعی و مصرف ۱/۵ میلی گرم بر لیتر سیلیسیم وزن خشک زی توده افزایش یافت. در تحقیق مشابهی درخصوص بررسی اثر رژیم های آبیاری با تیمار سیلیسیم روی چهار رقم انبه مشخص شد، سیلیسیم توانسته تمامی اثرات منفی ناشی از کم آبی را جبران نموده و سبب افزایش عملکرد میوه در چهار رقم گردد (Helaly et al., 2017). کاربرد سیلیسیم می تواند تبادل گازهای فتوسنتزی در برگ را افزایش داده، در نتیجه سبب افزایش زی توده گیاهی از طریق افزایش نرخ جذب خالص فتوسنتزی، هدایت روزنه ای و سرعت تعرق و در نتیجه تولید قند گردد (and Kapoor, 2021. Bhardwaj).

سیلیسیم بود (شکل ۳). مطابق انتظار با افزایش سطح خشکی میزان سطح برگ کاهش یافت. کاهش سطح برگ در اثر تنش خشکی به کم شدن تقسیم و طویل شدن سلولی برمی گردد. همچنین کاهش ظرفیت آب خاک منجر به کاهش تولید برگ جدید می شود (Tawhidi, 2015). کاهش سطح برگ فرآیند مهمی است زیرا گیاهان تحت تنش به واسطه کاهش سطح برگ، مانع از هدررفت آب می نمایند (Kafi et al., 2019). گیاهان تیمار شده با غلظت های بالاتر سیلیسیم توانستند سطح برگ بالاتری را دارا باشند که می تواند از اثرات حفاظت فیزیکی و مکانیکی شکل گرفته با رسوبات سیلیسیم باشد (Nascimento et al., 2018) و مصرف سیلیسیم سبب افزایش سطح برگ و عملکرد گیاه می شود (Gottardi et al., 2012).

تعداد شاخه فرعی: بیشترین تعداد شاخه فرعی (۱۵ عدد) در رژیم آبیاری (۷۵ درصد ظرفیت زراعی) با محلول پاشی محلول پاشی ۱/۵ میلی گرم بر لیتر سیلیسیم به دست آمد (شکل ۴). در همین ارتباط، در یک آزمایش



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل خشکی و سیلیسیم بر تعداد شاخه فرعی و وزن خشک زی توده در گیاه زوفا

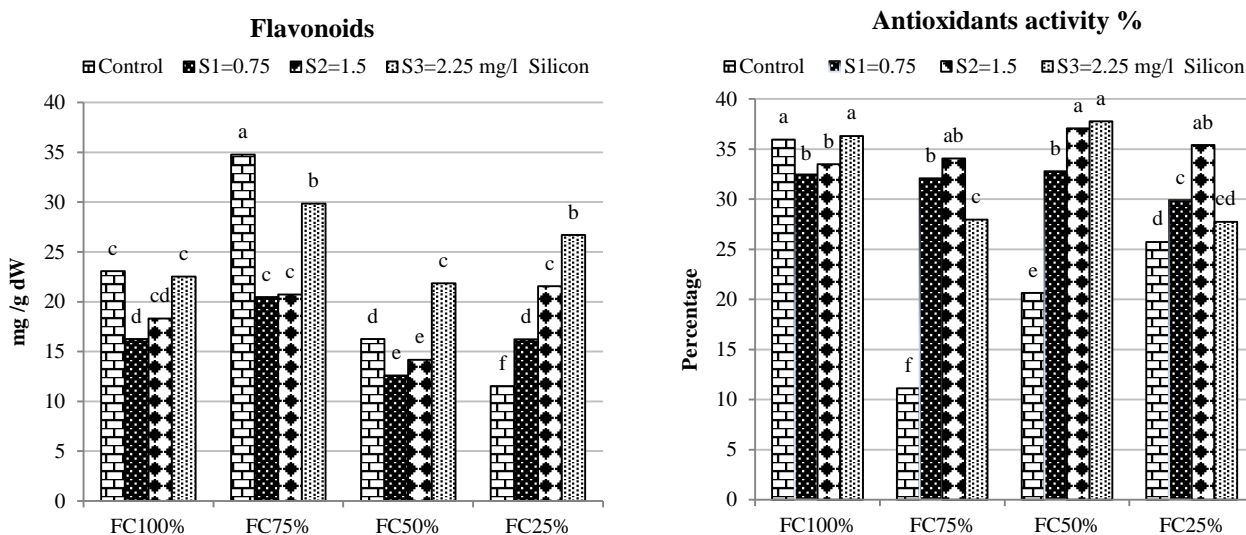
Figure 4. Mean of interaction of drought and silicon on number of branches and plant biomass in *Hyssopus officinalis*. Means with the similar alphabet do not have a significant difference at the 5% probability level.

میانگین های دارای حرف مشترک اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵

درصد ندارند.

فعالیت آنتی‌اکسیدانی: براساس نتایج بدست آمده تنش خشکی بر درصد رادیکال آزاد اندام هوایی در سطح یک‌درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش تنش خشکی میزان رادیکال‌های آزاد افزایش یافت به طوری‌که بیشترین میزان (۳۷٪) در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و در سطح سوم سیلیسیم به‌دست آمد. در تحقیقی دیگری در همین راستا، مشخص گردید تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در بارهنگ و اسفرزه شد (Mobini *et al.*, 2014).

پارامترهای فیتوشیمیایی: نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تنش خشکی، سیلیسیم و اثر متقابل خشکی و سیلیسیم بر میزان فلاونوئید کل اندام هوایی زوفا در سطح یک‌درصد دارای اثر معنی‌دار است (جدول ۳). باتوجه به داده‌های به‌دست آمده میزان فلاونوئیدکل در سطح دوم خشکی (D_2) با مقدار ۲۵/۷۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک در بالاترین سطح قرار دارد (شکل ۵). در این راستا و در تحقیق مشابهی مشخص شد کاربرد سیلیکون، در مقایسه با تیمار بدون سیلیکون، به‌طور قابل توجهی سطح فلاونوئیدکل را در تیمارهای کم‌آبیاری شده، به خوبی بهبود بخشید (Ma *et al.*, 2016).



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل خشکی و سیلیسیم بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و فلاونوئیدکل در گیاه زوفا

Figure 5. Mean of interaction of drought and silicon on antioxidant and total flavonoid in *Hyssopus officinalis*. Means with the similar alphabet do not have a significant difference at the 5% probability level.

میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

گیاهان تحت تنش خشکی، افزایش سطوح ترکیبات فنلی است، چرا که این گونه ترکیبات به‌عنوان پالاینده‌های گونه‌های واکنشگر اکسیژن عمل کرده و در نتیجه سبب ثبات غشاهای سلولی و مانع از پراکسیداسیون لیپیدها می‌شوند (Chang *et al.*, 2001). از عوامل کاهش محتوای کلروفیل در هنگام مواجهه گیاهان با تنش خشکی، تولید گونه‌های واکنشگر اکسیژن و متعاقب آن پراکسیداسیون لیپیدها و

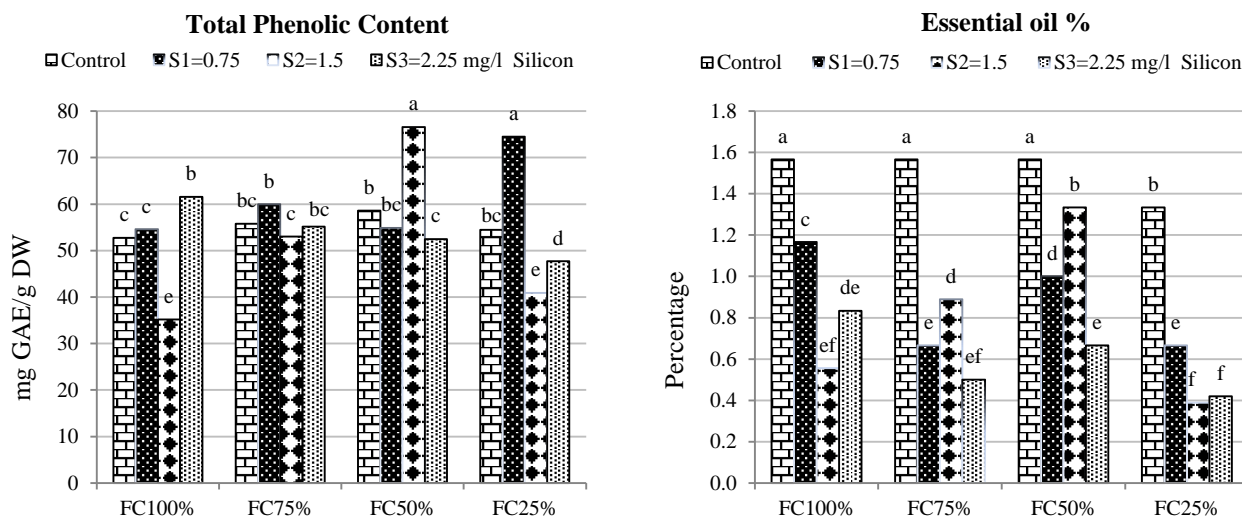
فنل کل: باتوجه به داده‌های به‌دست آمده مقدار فنل کل در اثر متقابل سیلیسیم و تنش خشکی در سطح یک‌درصد معنی‌دار بود (جدول ۳) به طوری‌که بالاترین سطح فنل کل (۷۰ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) در تنش خشکی ۲۵ درصد ظرفیت زراعی و سطح دوم سیلیسیم به‌دست آمد (شکل ۶). نتایج این تحقیق نشان داد که سیلیسیم در افزایش غلظت فنل‌ها دخیل است. ازجمله سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی

تخریب کلروفیل است (Zhu et al., 2012). مطالعات نشان داده که عوامل مختلفی بر درصد و میزان ترکیبات فنلی عصاره استخراجی از گیاه سرخارگل مؤثر هستند، در این زمینه می‌توان به عوامل مختلفی مانند عوامل ژنتیکی، شرایط محیطی از جمله سیستم‌های تغذیه‌ای و شرایط نگهداری اشاره کرد. حتی بین واریته‌های زراعی یک گونه نیز از نظر درصد و میزان ترکیبات فنلی تفاوت وجود دارد. همچنین میزان رسیدن و زمان برداشت بر محتوای فنلی مؤثرند (Jakopic et al., 2009). با افزایش میزان تنش خشکی در گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*)، میزان فنل کل افزایش یافت که این افزایش نوعی سازگاری گیاه با شرایط تنش محسوب می‌شود (Mozaffari et al., 2017).

درصد اسانس در ارتباط با تاثیر تنش خشکی و سیلیسیم بر درصد اسانس، نتایج نشان داد با افزایش تنش خشکی تا سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، میزان اسانس افزایش یافت (شکل ۶). در پژوهشی مشابه روی گیاه دارویی بادرشبویه

تخریب کلروفیل است (Zhu et al., 2012). مطالعات نشان داده که عوامل مختلفی بر درصد و میزان ترکیبات فنلی عصاره استخراجی از گیاه سرخارگل مؤثر هستند، در این زمینه می‌توان به عوامل مختلفی مانند عوامل ژنتیکی، شرایط محیطی از جمله سیستم‌های تغذیه‌ای و شرایط نگهداری اشاره کرد. حتی بین واریته‌های زراعی یک گونه نیز از نظر درصد و میزان ترکیبات فنلی تفاوت وجود دارد. همچنین میزان رسیدن و زمان برداشت بر محتوای فنلی مؤثرند (Jakopic et al., 2009). با افزایش میزان تنش خشکی در گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*)، میزان فنل کل افزایش یافت که این افزایش نوعی سازگاری گیاه با شرایط تنش محسوب می‌شود (Mozaffari et al., 2017).

درصد اسانس در ارتباط با تاثیر تنش خشکی و سیلیسیم بر درصد اسانس، نتایج نشان داد با افزایش تنش خشکی تا سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، میزان اسانس افزایش یافت (شکل ۶). در پژوهشی مشابه روی گیاه دارویی بادرشبویه



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل خشکی و سیلیسیم بر میزان فنل کل و درصد اسانس در گیاه زوفا

Figure 6. Mean of interaction of drought and silicon on total phenol and essential oil percent in *Hyssopus officinalis*. Means with the similar alphabet do not have a significant difference at the 5% probability level.

میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵

درصد ندارند.

نتیجه‌گیری کلی

باتوجه به نتایج به‌دست آمده از اجزای عملکرد و صفات مورفولوژیک می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که تنش خشکی تا ۵۰ درصد ظرفیت زراعی باعث ثابت ماندن و یا افزایش عملکرد شده و پس از آن با افزایش بیش از حد خشکی تا ۲۵٪ ظرفیت زراعی، کاهش معنی‌داری در اجزای عملکرد زوفا مشاهده شد. همچنین تیمار خشکی باعث افزایش در مقادیر فنل کل، فلاونوئیدکل و درصد آنتی‌اکسیدان گردید این افزایش تا سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی ادامه یافت به طوری‌که درصد اسانس در سطح سوم خشکی به میزان ۱/۴۱ درصد گزارش شد. تیمار سیلیسیم تاحدی باعث کاهش اثرات مخرب خشکی و باعث افزایش عملکرد و افزایش ترکیبات مؤثره این گیاه تا سطح ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر شد.

منابع

- Beheshti, F. and Khorasaninejad, S., 2023. Effect of silicon on some growth, physiological and phytochemical properties of *Cannabis sativa* L. in soil and soilless culture. *Eco-phytochemical Journal of Medicinal Plants*, 10(4): 46-62. (In Persian) DOI:10.30495/EJMP.2022.1957995.1687.
- Beheshti, F., Khorasaninejad, S. and Hemmati, K., 2023. Effect of salinity stress on morphological, physiological, and biochemical traits of male and female plants of cannabis (*Cannabis sativa* L.). *Iranian Journal of Rangelands and Forests Plant Breeding and Genetic Research*, 30(2): 242-262. (In Persian). DOI:10.22092/IJRFPGR.2022.358696.1419.
- Bhardwaj, S. and Kapoor, D., 2021. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166: 1044-1053. DOI: [org/10.1016/j.plaphy.2021.07.005](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.005)
- Chang, W.C., Kim, S.C., Hwang, S.S., Choi, B.K. and 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. DOI: [10.1016/S0168-9452\(02\)00332-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00332-1)
- Coskun, D., 2019. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytol.*, 221: 67-85. DOI: [10.1111/nph.15343](https://doi.org/10.1111/nph.15343).
- De Souza Junior, J. P., 2021. Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. *J. Soil Sci. Plant Nut.*, 21: 95-103. DOI:10.1007/s42729-020-00345-4
- Džamić, A.M., Soković, M.D., Novaković, M., Jadranin, M., Ristić, M.S., Tešević, V. and Marin, P.D., 2013. Composition, antifungal and antioxidant properties of *Hyssopus officinalis* L. subsp. pilifer (Pant.) Murb. essential oil and deodorized extracts. *Industrial Crops and Products*, 51: 401-407.
- Efeoğlu, B., Ekmekçi, Y. and Çiçek, N.U.R.A.N., 2009. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *South African journal of botany*, 75(1): 34-42. DOI: [10.1016/j.sajb.2008.06.005](https://doi.org/10.1016/j.sajb.2008.06.005)
- Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S. and Zhang, C., 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant science*, 169(2): 313-321. DOI:10.1016/j.plantsci.2005.02.023
- Gorgini Shabankareh, H., Asgharipour, M.R. and Fakheri, B.A., 2015. The effect of bio-fertilizers on some growth parameters and essential oil of *Moldavian dragonhead* under drought condition. DOI:10.30495/EJMP.2022.1957995.1687.
- Abadi, A.A.A., Khorasaninejad, S. and Hemmati, K., 2017. The effect of limited irrigation stress and humic acid on the some morphological and root phytochemical characteristics of purple coneflower. *Journal of Crops Improvement*, 19(1): 1-14. (In Persian) DOI:10.22059/jci.2017.60403
- Amiri, R., Nikbakht, A. and Etemadi, N., 2015. Alleviation of drought stress on rose geranium (*Pelargonium graveolens* (L.) Herit.) in terms of antioxidant activity and secondary metabolites by mycorrhizal inoculation. *Scientia Horticultura*, 197: 373-380. DOI: [10.1016/j.scienta.2015.09.062](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.062)
- Bagheri, R., Ahmad, J., Bashir, H., Iqbal, M. and Qureshi, M.I. 2017. Changes in rubisco, cysteine-rich proteins and antioxidant system of spinach (*Spinacia oleracea* L.) due to sulphur deficiency, cadmium stress and their combination. *Protoplasma*, 254: 1031-1043. DOI:10.1007/s00709-016-1012-9
- Barnes, J.D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S. and Davison, A.W., 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental botany*, 32(2): 85-100. DOI:10.1016/0098-8472(92)90034-Y.

- Hussain, S., 2021. Foliar application of silicon improves stem strength under low light stress by regulating lignin biosynthesis genes in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Jour. Hazard. Mater.*, 401: 123256. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2020.123256](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123256).
- Kafi, M., Nabati, J., Saadatian, B., Oskoueian, A. and Shabahang, J., 2019. Potato response to silicone compounds (micro and nanoparticles) and potassium as affected by salinity stress. *Italian Journal of Agronomy*, 14(3): 162-169. DOI: [10.4081/ija.2019.1182](https://doi.org/10.4081/ija.2019.1182).
- Khajehhosseini, S., Fanoody, F., Tabatabaei, S. A., Yazdani Biouki, R. and Masoud Sinaki, J., 2022. Morphophysiological and biochemical changes of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) treated with amino acid and transpiration reducers in dry soils. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 12(4): 29-52.
- Khalid, K.A. and Da Silva, J.T., 2012. Biology of *Calendula officinalis* Linn: focus on pharmacology, biological activities and agronomic practices. *Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology*, 6(1): 12-27.
- Khorasaninejad, S., Beheshti, F., Davariyan, F. and Keykha, H., 2023. The effect of growth media on yield components, physiological and phytochemical characteristics of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) under silicon foliar spraying. *Plant Process and Function*, 12 (56): 1-14 (In Persian).
- Kochaki, A., Tabrizi, L. and Ghorbani, R., 2008. Evaluate the effectiveness of biological fertilizer on growth characteristics, yield and quality of medicinal herb hyssop (*Hyssopus officinalis*). *Iranian Journal of Crop Research*, 6(1): 12-137. (In Persian).
- Madani, A., Bakhaty, A., Kim, J., Mubarak, Y. and Mofrad, M.R., 2019. Bridging finite element and machine learning modeling: stress prediction of arterial walls in atherosclerosis. *Journal of biomechanical engineering*, 141(8): 084502. DOI: [10.1115/1.4043290](https://doi.org/10.1115/1.4043290).
- Jakopic, J., Stampar, F. and Veberic, R., 2009. The influence of exposure to light on the phenolic content of 'Fuji' apple. *Scientia Horticulturae*, 123(2): 234-239. DOI: [10.1016/j.scienta.2009.09.004](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.09.004).
- Jubany-Marí, T., Munné-Bosch, S. and Alegre, L., 2010. Redox regulation of water stress responses in field-grown plants. Role of hydrogen peroxide and ascorbate. *Plant Physiology and Journal of Plant Ecophysiology*, 7(23): 185-194. (In Persian)
- Gorgini Shabankareh, H. and Khorasaninejad, S., 2017. Effects of sodium nitroprusside on physiological and biochemical characteristics of savory (*Satureja khuzestanica*) under deficit water regimes. *Journal of Plant Production (Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 24(3): 55-70. (In Persian) DOI: [10.22069/JOPP.2017.11747.2079](https://doi.org/10.22069/JOPP.2017.11747.2079)
- Gorgini Shabankareh, H., Khorasaninejad, S., Sadeghi, M. and Tabasi, A.R., 2018. The effects of irrigation periods and humic acid on morphophysiological and biochemical traits of Thyme (*Thymus vulgaris*). *Journal of Plant Ecophysiological Research*, 13(51): 67-82. (In Persian).
- Gorgini Shabankareh, H., Khorasaninejad, S., Soltanloo, H. and Shariati, V., 2021a. The effect of foliar application of abscisic acid on increasing drought stress tolerance in *Lavandula angustifolia* cv. Munstead Organic. *Iranian Journal of Rangelands & Forests Plant Breeding & Genetic Research*, 28(2): 298-311. (In Persian) DOI: [10.22092/IJRFPGR.2020.343315.1368](https://doi.org/10.22092/IJRFPGR.2020.343315.1368).
- Gorgini Shabankareh, H., Khorasaninejad, S., Soltanloo, H. and Shariati, V., 2021b. Investigation of the effects of drought stress and abscisic acid foliar application on yield, physiological and biochemical properties of lavender (*Lavandula angustifolia* cv. Organic Munstead). *Journal of Crop Production*, 14(2): 65-82. (In Persian). DOI: [10.22092/ijrfpbgr.2020.343315.1368](https://doi.org/10.22092/ijrfpbgr.2020.343315.1368).
- Gottardi, S., Iacuzzo, F., Tomasi, N., Cortella, G., Manzocco, L., Pinton, R. and Cesco, S., 2012. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 56: 14-23. DOI: [10.1016/j.plaphy.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.002).
- Hadad, R. and Moshiri, Z., 2010. The effect of silicon in increasing drought tolerance in the two-leaf stage of barley plants. *Journal of Genetics*, 5 (4): 47-58. (In Persian).
- Helaly, M.N., El-Hoseiny, H., El-Sheery, N.I., Rastogi, A. and Kalaji, H.M., 2017. Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant physiology and biochemistry*, 118: 31-44. DOI: [org/10.1016/j.plaphy.2017.05.021](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.021)
- Hodson, M.J., White, P.J., Mead, A. and Broadley, M.R., 2005. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of botany*, 96(6): 1027-1046. DOI: [10.1093/aob/mci255](https://doi.org/10.1093/aob/mci255).

- biological stabilization practice on some soil parameters (North East of Iran). *Journal of Rangeland Science*, 2(4): 643-653. Dor: [20.1001.1.20089996.2012.2.4.5.0](https://doi.org/10.1001.1.20089996.2012.2.4.5.0)
- Omidbeigi, R., 2009. Production and processing of medicinal plants. *Astane Ghodse Razavi Publications*. Vol 2, 5th edn. Mashhad, Iran. (In Persian).
- Pakseresht, G., Kahrizi, D., Mansouri, M., Ghorbani, T. and Kazemi, N., 2016. Study of callus induction and cell culture to secondary metabolite production in *Hyssopus officinalis* L. *Journal of Reports in Pharmaceutical Sciences*, 5 (2): 104-111.
- Rahman, K., Rahman, M., Ahmed, N., Alam, M., Rahman, A., Islam, M. and Hasanuzzaman, M., 2021. Morphophysiological changes and reactive oxygen species metabolism in *Corchorus olitorius* L. under different abiotic stresses. *Open Agric.*, 6: 549–562. DOI:[10.1515/opag-2021-0040](https://doi.org/10.1515/opag-2021-0040).
- Sanginabadi, H. and Khorasaninejad, S., 2016. Effect of salt and drought stresses and pretreatment of salicylic acid on seed germination characteristics of lavender (*Lavandula stricta* Del.). *Journal of horticulture science*, 30(3): 423-430. (In Persian). DOI: [10.22067/jhorts4.v30i3.38644](https://doi.org/10.22067/jhorts4.v30i3.38644).
- Sangtarash, M.H., Qaderi, M.M., Chinnappa, C.C. and Reid, D.M., 2009. Differential sensitivity of canola (*Brassica napus*) seedlings to Ultraviolet-B radiation, water stress and abscisic acid. *Environmental and Experimental Botany*, 66(2): 212-219. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2009.03.004](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.03.004).
- Seyoum, D., Rahman, M. F. and Grantham, C., 2003. Terminal voltage control of a wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field control. In *Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'03*, 2: 846-852. DOI:[10.1109/APEC.2003.1179315](https://doi.org/10.1109/APEC.2003.1179315).
- Shalata, A. and Neumann, P.M., 2001. Exogenous ascorbic acid (vitamin C) increases resistance to salt stress and reduces lipid peroxidation. *Journal of experimental botany*, 52(364): 2207-2211. DOI: [10.1093/jexbot/52.364.2207](https://doi.org/10.1093/jexbot/52.364.2207).
- Shariat, A., Karimzadeh, G., Assareh, M. and Hadian, J., 2018. Variations of physiological indices and metabolite profiling in *Satureja khuzistanica* in response to drought stress. *Iranian journal of rangelands and forests plant breeding and genetic research*, 25-2 (50): 232-246. (In Persian). *Biochemistry*, 48(5): 351-358. DOI: [10.1016/j.plaphy.2010.01.021](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.01.021)
- Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y. and Guo, T., 2016. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35: 1-10.
- McDonald, S., Prenzler, P.D., Autolovich, M. and Robards, K., 2001. Phenolic content and antioxidant activity of olive extracts. *Food Chemistry*, 73:73-84.
- Miliascas, G., Venskutonis, P.R. and Van Beek, T.A., 2002. Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts. *Food chemistry*, 85(2): 231-237. DOI: [10.1016/j.foodchem.2003.05.007](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.05.007).
- Mobini, M., Zoofan, P. and Ghorbanpour, M., 2014. Investigating the effect of drought stress on antioxidant compounds in the medicinal plants of *Plantago ovata*, *Plantago major* and *Malva neglecta*. *The first national congress of biology and natural sciences of Iran, Tehran, Centre for Sustainable Development and Environment*, 11-12-2014.
- Mozaffari, S., and Gorgini Shabankareh, H., 2016. Effects of Irrigation content based on field capacity percent and Humic acid on morphophysiological traits on medicinal plant (*Portulaca oleracea* L.). *Journal of Crop Production*, 9(3): 153-175. (In Persian) [10.22069/EJCP.2016.10754.1849](https://doi.org/10.22069/EJCP.2016.10754.1849).
- Mozaffari, S., Khorasaninejad, S. and Gorgini shabankareh, H., 2017. The effects of irrigation regimes and humic acid on some of physiological and biochemical traits of Common Purslane in greenhouse. *Journal of Crops Improvement (Journal of Agriculture)*, 19 (2):401-416. (In Persian). DOI.org/[10.22059/jci.2017.60423](https://doi.org/10.22059/jci.2017.60423)
- Najjarfirozjaee, M., Hemmati, K., Khorasaninejad, S., Daraei, G. A. and Bagherifard, A., 2014. Effect of altitude on morphological and biochemical characteristics of nettle (*Urtica dioica* L.) plant in mazandaran and golestan provinces. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 9 (3): 1-11.
- Nascimento, A.M., Assis, F.A., Moraes, J.C. and Souza, B.H.S., 2018. Silicon application promotes rice growth and negatively affects development of *Spodoptera frugiperda* (JE Smith). *Journal of applied entomology*, 142(1-2): 241-249. DOI: [10.1111/jen.12461](https://doi.org/10.1111/jen.12461).
- Naseri, S., Adibi, M. A., Javadi, S. A., Jafari, M. and Zadbar, M., 2012. Investigation of the effect of

- Zare, F., khorasaninejad, S. and hemmati, K., 2018. The effect of silicon on some morpho-physiological and phytochemical traits of Purple Coneflower (*Echinacea purpurea* L.) under salinity stress. Iranian Journal of Plant Biology, 10(3): 55-68. (In Persian) DOI: [10.22108/ijpb.2018.105683.1044](https://doi.org/10.22108/ijpb.2018.105683.1044).
- Zarei, F., Hezarjaribi, A., Khorasaninejad, S. and Zakerinia, M., 2021. The effect of foliar application of humic acid on increasing Stevia rebaudiana tolerance under different irrigation regimes. Iranian Journal of Rangelands and Forests Plant Breeding and Genetic Research, 28(2): 281-297. (In Persian) [10.22092/IJRFPBGR.2021.351485.1371](https://doi.org/10.22092/IJRFPBGR.2021.351485.1371).
- Zhang, W., Yu, X., Li, M., Lang, D., Zhang, X. and Xie, Z., 2018. Silicon promotes growth and root yield of Glycyrrhiza uralensis under salt and drought stresses through enhancing osmotic adjustment and regulating antioxidant metabolism. Crop Protection, 107: 1-11. DOI: [org/10.1016/j.cropro.2018.01.005](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.01.005)
- Zhu, X.C., Song, F.B., Liu, S.Q., Liu, T.D. and Zhou, X., 2012. Arbuscular mycorrhizae improves photosynthesis and water status of *Zea mays* L. under drought stress. Plant, Soil and Environment, 58(4): 186-191. DOI: [10.17221/23/2011-PSE](https://doi.org/10.17221/23/2011-PSE).
- Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y. and Breuer, J., 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 169(3): 310-329. DOI: [10.1002/jpln.200521981](https://doi.org/10.1002/jpln.200521981).
- Torabi, F., Majd, A. and Enteshari, S., 2014 The Study of interaction between Silicon and Salinity on some Physiological and Anatomical Parameters of borage (*Borago officinalis* L.). Plant Process and Function, 2 (6) :39-51. (In Persian). DOI: [20.1001.1.23222727.1392.2.6.5.9](https://doi.org/20.1001.1.23222727.1392.2.6.5.9).
- Tawhidi, Z., 2015. Effect of drought stress on physiological characteristics of plants. International conference on research in science and technology, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Wang, M., Wang, R., Mur, L.A.J., Ruan, J., Shen, Q. and Guo, S., 2021. Functions of silicon in plant drought stress responses. Horticulture Research, 8: 254. DOI: [10.1038/s41438-021-00681-1/6491157](https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1/6491157)
- Willson, C.J., Manos, P. S. and Jackson, R.B., 2008. Hydraulic traits are influenced by phylogenetic history in the drought-resistant, invasive genus Juniperus (Cupressaceae). American Journal of Botany, 95(3), 299-314. DOI: [10.3732/ajb.95.3.299](https://doi.org/10.3732/ajb.95.3.299).