

مقاله پژوهشی

اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه دارویی آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.)

افسون کامیاب^۱، داود صمصام‌پور^{۱*}، نوید احمدی نسب^۲ و عبدالنبی باقری^۳

^۱ گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۲ مرکز مطالعات و تحقیقات هرمزگان، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۳ بخش تحقیقات گیاهپزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی هرمزگان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

بندرعباس، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶)

چکیده

آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) گیاهی معطر و از خانواده نعنائیان که دارای خواص ارزشمند دارویی و تغذیه‌ای است. تنش خشکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر رشد و عملکرد گیاهان دارویی داشته باشد. به‌منظور بررسی اثر تنش خشکی بر برخی صفات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه دارویی آویشن باغی آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار سطح تنش خشکی (۱۰۰٪، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه) با سه تکرار در سال ۱۴۰۰ در گلخانه دانشگاه هرمزگان اجرا شد. نتایج حاصل نشان داد که تنش خشکی (۲۵٪ ظرفیت مزرعه) سبب کاهش معنی‌دار در طول برگ (۶۴٪)، عرض برگ (۳۳٪)، ارتفاع بوته (۱۳/۵۱٪)، طول ریشه (۴/۴۹٪)، وزن تر (۴/۰۴٪) و خشک اندام هوایی (۷/۵٪)، وزن خشک ریشه (۹/۷٪)، محتوای رطوبت نسبی (۵۴/۲۳٪)، کلروفیل a (۳۱/۴۵٪)، کلروفیل b (۳۱/۲۹٪)، کلروفیل کل (۳۱/۳۸٪) و کاروتنوئیدها (۲۲/۳۵٪) شد. بیشترین مقدار نشت یونی (۳۴/۵۶٪)، پرولین (۵۳/۱۲٪)، کاتالاز (۶۸/۴۷٪)، پلی‌فنل اکسیداز (۵۱/۵۲٪)، مالون دی‌آلدهید (۵۵/۸۴٪)، فلاونوئید (۵۹/۲۳٪) و آنتوسیانین (۶۱/۲۹٪) در تیمار تنش خشکی (۲۵٪ ظرفیت مزرعه) مشاهده شد. گیاه دارویی آویشن در مقابله با تنش خشکی با استفاده از مکانیسم‌های دفاعی مختلف واکنش نشان می‌دهد. این مکانیسم‌ها شامل کاهش برخی از ویژگی‌های مورفولوژیکی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تجمع سریع مواد آلی تنظیم‌کننده اسمزی برای حفظ تعادل آبی سلول‌ها و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برای مقابله با استرس اکسیداتیو هستند. با این واکنش‌ها، آویشن می‌تواند با عملکرد بالاتر، عناصر غذایی مورد نیاز خود را جذب کرده و به رشد خود ادامه دهد. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی تحمل آویشن باغی به تنش خشکی و تعیین مناسب‌ترین شرایط (۷۵٪ و ۵۰٪ ظرفیت مزرعه) برای کشت این گیاه در استان هرمزگان بود. با توجه به اینکه آویشن باغی در این استان به‌طور گسترده کشت نشده است، بررسی واکنش این گیاه به شرایط تنش خشکی می‌تواند اطلاعات مفیدی برای توسعه کشت این گیاه در مناطق مشابه فراهم کند.

واژگان کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، آویشن باغی، پارامترهای بیوشیمیایی، تنش خشکی

مقدمه

آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) از خانواده نعنائیان (Labiatae) است که به دلیل خواص سلامتی بسیار با ارزش خود، از زمان‌های بسیار قدیم در طب سنتی مورد استفاده قرار می‌گرفته است. این گیاه، یکی از گونه‌های مهم آویشن در بین حدود ۲۵۰ تا ۳۵۰ گونه موجود است (Casiglia et al., 2019) و به دلیل اهمیت غذایی و دارویی خود، به‌طور گسترده‌ای در مناطق مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Silva et al., 2021). سرشاخه‌های گل‌دار این گیاهان، به‌صورت جوشانده یا دم‌کرده، به‌عنوان داروهای ضداسپاسم، ضدنفخ، خلط‌آور و برای درمان سرماخوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Abdelshafy Mohamad et al., 2020). خواص دارویی آویشن باغی باعث شده است که این گیاه به یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین گیاهان در سراسر جهان تبدیل شود. عوامل متعددی، از جمله تنش‌های محیطی، می‌توانند بر کیفیت و مقدار مواد مؤثره مانند: استروئیدها، گلیکوزیدها، آلکالوئیدها، اسانس‌ها و نیز رشد و عملکرد گیاهان دارویی تأثیر بگذارند (Gharib et al., 2014). علاوه بر این تنش خشکی چالش مهمی است که عملکرد گیاهان دارویی و معطر از جمله آویشن باغی را محدود می‌کند (Bistgani et al., 2024).

خشکسالی عامل اصلی محدودکننده تولید جهانی محصولات کشاورزی است و تنش‌های غیرزیستی معمولاً در طول زندگی گیاهان، به‌ویژه در دوره‌های طولانی‌مدت، بر رشد و عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارد (Narayanasamy et al., 2023). خشکسالی به‌عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدات زیست‌محیطی که امروزه جهان با آن روبه‌رو است، شناخته می‌شود. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که به‌دلیل کاهش بارندگی و افزایش تبخیر ناشی از تغییرات اقلیمی جهانی، این پدیده در بسیاری از مناطق شدت و فراوانی بیشتری خواهد یافت. علاوه‌براین، گرمایش جهانی الگوهای بارش را غیرقابل پیش‌بینی کرده و باعث تکرار دوره‌های طولانی خشکسالی در سراسر جهان شده است (Rasheed et al., 2023). پیامدهای

تنش خشکی بر گیاهان موجب تأثیراتی بر تمام مراحل رشد گیاه، ناهمگونی خاک و دسترسی به عناصر غذایی می‌شود (Yang and Qin, 2023). کمبود آب سبب کاهش رشد رویشی و زیست‌توده می‌شود و در پی آن سبب تغییر و انتقال به مراحل اصلی نمو مثل رشد زایشی می‌شود (Cooper and Messina, 2023; Wang et al., 2023). گونه‌های گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا در معرض تنش‌های مختلف محیطی هستند که بر رشد و عملکرد آن‌ها تأثیرگذار است (Zhao et al., 2023). تنش خشکی با فرآیندهایی مانند غیرفعال کردن آنزیم رویسکو و بسته‌شدن روزنه‌ها که منجر به محدودیت انتشار CO₂ در برگ‌ها می‌شود، موجب تغییر در متابولیسم کربن گیاه از طریق سرکوب فرآیندهای بیوشیمیایی و فیتوشیمیایی می‌شود (Pandey et al., 2023). در شرایط تنش، توسعه رشد رویشی و زایشی گیاهان به‌سبب استفاده از تمام منابع انرژی گیاهی و پیش‌سازهای متابولیک برای تحمل اثرات تنش، محدود می‌شود با توجه به اهمیت بالای گیاهان دارویی و نقش کلیدی آن‌ها در رسیدن به اهداف ملی، منطقه‌ای و جهانی، بررسی شرایط رشد این گیاهان در مواقع کم‌آبی و خشکسالی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای بهینه‌سازی کشت آن‌ها ارائه دهد. شناخت دقیق این شرایط کمک می‌کند تا راهکارهای مؤثری برای افزایش بهره‌وری و پایداری کشت گیاهان دارویی در شرایط مختلف اقلیمی پیدا شود (Kang et al., 2017). با افزایش آگاهی مردم از فواید گیاهان دارویی و تطابق بهتر این گیاهان با سیستم بدنی انسان، نیاز به استفاده از داروهای گیاهی بیشتر شده است. همچنین، سازمان بهداشت جهانی بر اهمیت جایگزینی داروهای شیمیایی با داروهای گیاهی تأکید می‌کند. این عوامل موجب افزایش روزافزون تقاضا برای مصرف گیاهان دارویی شده‌اند (لرستانی و همکاران، ۱۳۹۷).

بررسی تأثیر تنش خشکی بر گیاه آویشن از اهمیت بسیاری برخوردار است، زیرا این گیاه به‌عنوان یکی از گیاهان دارویی ارزشمند، تحت تأثیر شرایط نامساعد محیطی قرار می‌گیرد. تغییرات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی که در آویشن در مواجهه با تنش خشکی رخ می‌دهد، می‌تواند به بهبود عملکرد و

کیفیت ترکیبات فعال دارویی این گیاه کمک کند. پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه انجام شده تا راه‌کارهای مؤثری برای مدیریت و بهینه‌سازی کشت آویشن در شرایط کم‌آبی پیدا شود. این مطالعات به شناخت بهتر واکنش‌های گیاه در برابر تنش خشکی و توسعه روش‌های مناسب برای افزایش تحمل گیاهان دارویی به شرایط خشک کمک می‌کند (Bistgani et al., 2024).

تأثیر تنش خشکی به مدت چهار ماه در پنج سطح (۱۰۰٪، ۸۵٪، ۷۰٪، ۶۰٪ و ۴۵٪ ظرفیت مزرعه)، بر پارامترهای رشدی در گیاه نعنای فلفلی نشان داد که تنش خشکی، کاهش معنی‌داری بر کلیه پارامترهای رشد و عملکرد گیاه داشت (Khorasaninejad et al., 2011). در مطالعه‌ای، اثر چهار فاصله آبیاری (۳، ۵، ۷ و ۱۰ روز) بر عملکرد گیاه آویشن بررسی شد. گیاهانی که فاصله آبیاری کمتری داشتند (سه روز یکبار)، دارای ارتفاع بلندتر و وزن تر و خشک بیش‌تر نسبت به گیاهانی که فاصله آبیاری بیشتری داشتند (۵، ۷ و ۱۰ روز یکبار) بودند (Moradi et al., 2014). در مطالعه‌ای که به بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش آبی (۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ ظرفیت مزرعه) بر اسانس‌های گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis*) انجام شده بود، نتایج نشان داد که افزایش تنش آبی منجر به تغییراتی در متابولیت‌های اولیه و ثانویه، محتوای اسانس و صفات فیزیکی گیاه شد (Laftouhi et al., 2024). تنش خشکی سبب تأثیر منفی بر تولید، رشد، نمو و عملکرد سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه دارویی چند ساله جینسینگ (*Panax ginseng*) شد (Kong et al., 2023). افزایش تنش خشکی، سبب کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی در آویشن دانایی شد (Bahreininejad et al., 2013).

تنش خشکی در عدس (*Lens culinaris*) باعث کاهش کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کاروتنوئیدها، پروتئین و پرولین، عملکرد و اجزای عملکرد شد. کاهش این صفات در شش روز پس از تنش چشمگیرتر بود. علاوه‌براین، تنش خشکی باعث افزایش میزان هیدروژن پراکسید و مالون دی‌آلدید شد همچنین، باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های

آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پلی‌فنل اکسیداز و پراکسیداز) شد (Azizi et al., 2024). با عنایت به اینکه کشور ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده و با توجه به کاهش میزان بارندگی در سال‌های اخیر، کمبود آب یکی از معضلات کشت گیاهان دارویی است. کشت گیاهان دارویی زمانی مقرون به صرفه است که درصد میزان مصرف آب متناسب با درآمد حاصله از فروش این گیاهان باشد. لذا با توجه به خواص ارزشمند گیاه دارویی آویشن باغی مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر تنش خشکی بر روی ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی این گیاه و تعیین مناسب‌ترین رژیم آبیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلخانه دانشگاه هرمزگان در سال ۱۴۰۰ اجرا شد. برای انجام آزمایش از بذور آویشن باغی (*T. vulgaris*) (ایران)، خریداری‌شده از شرکت رشد کشاورزی حاتم واقع در شهر شیراز استفاده شد. آزمایش گلدانی در چهار سطح تنش خشکی (۱۰۰٪، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و اعمال تیمارهای تنش خشکی براساس روش وزنی انجام شد. در ابتدا، به‌مقدار یکسانی سنگریزه در کف هر گلدان ریخته (برای انجام زه‌کشی) و با استفاده از ترازو، خاک درون هر گلدان به‌طور یکسان پر شد (۷ کیلوگرم خاک در هر گلدان). سپس با افزودن آب، خاک هر گلدان به حد اشباع رسید و به مدت ۲۴ ساعت روی سطح مشبک قرار گرفت تا آب اضافی خاک خارج شود. در این مرحله، وزن گلدان‌ها به حالت پایدار رسید و تغییرات قابل توجهی مشاهده نشد و خاک آن‌ها با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت کاملاً خشک شد. پس از تعیین درصد وزنی رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی، مقدار 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 شود و در نتیجه مقدار صحیحی از آب در زمان

اعمال تیمارهای رطوبتی به هر گلدان تخصیص یافت (Mozaffari and Gorgini Shabankareh, 2016). سپس جهت تعیین رژیم‌های آبیاری، رطوبت هر کدام از گلدان‌ها روزانه اندازه‌گیری و به محض اینکه رژیم‌هایی که درصد وزنی رطوبت خاک مربوط به آن، به درصد ظرفیت زراعی موردنظر می‌رسید آبیاری در هر تیمار انجام می‌شد.

بذور آویشن ابتدا با هیپوکلریت سدیم ۵٪ در سینی‌های حاوی پیت‌ماس سترون در اواسط مردادماه کشت شدند. گیاهچه‌های آویشن با چهار شاخه فرعی پس از دو ماه در مهرماه از سینی‌های نشا به گلدان‌های با ابعاد ۲۱×۲۱ سانتی‌متر منتقل شدند. جهت ایجاد بستر مناسب پیت‌ماس، ماسه بادی و کود پوسیده دامی باهم مخلوط و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه اتوکلاو شدند. سپس در دمای ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۶۰-۷۰٪ در گلخانه دانشگاه هرمزگان نگهداری شدند. پس از چهار ماه از انتقال گیاهچه‌ها از سینی نشا به گلدان و اطمینان از استقرار کامل گیاه (با ۱۰ تا ۱۲ شاخه فرعی) و در دوره رشد رویشی (پس از ۶ ماه از زمان کاشت بذر در سینی نشا) در اواخر دی ماه تنش خشکی به مدت شش هفته اعمال شد و دو ماه بعد از اعمال تنش پس از کامل شدن رشد رویشی در فروردین ماه گیاهان جمع‌آوری و نمونه‌ها تا زمان اندازه‌گیری در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

برای اندازه‌گیری ارتفاع گیاه از طوقه تا آخرین برگ، اندازه‌گیری طول و عرض برگ، طول اندام هوایی و ریشه، از خط‌کش میلی‌متری و جهت اندازه‌گیری وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ استفاده شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه، بعد از توزین وزن تر، اندام‌ها به صورت مجزا در پاکت‌های آلومینیومی قرار داده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس وزن شدند.

میزان کلروفیل‌های a، b، کل و کاروتنوئیدهای برگ‌ها به روش الایزا و اسپکتوفتومتری مدل (Cecil CE2501)، در طول-موج‌های ۴۷۰، ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر و از استون ۸۰٪ به عنوان

بلانک دستگاه برای کالیبره‌شدن آن استفاده و سپس محاسبه شدند (Lichtenthaler and Buschmann, 2001). برای اندازه-گیری میزان محتوای آب نسبی برگ (Relative water content) از روش (Morgan, 1984) صورت گرفت و درصد نشت الکترولیت با استفاده از روش Sairam و همکاران (۲۰۰۲) تعیین شد. جهت محاسبه میزان پرولین از روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) و از تولوئن به عنوان بلانک در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر استفاده شد. میزان مالون دی‌آلدئید (MDA)، از روش Du و Bramlage (۱۹۹۲)، در طول‌موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر محاسبه و از محلول ۰/۱٪ TCA (تری‌کلرو استیک اسید)، جهت بلانک دستگاه استفاده شد. فعالیت پلی‌فنل اکسیداز و کاتالاز به ترتیب با روش Bergmeyer (۲۰۱۲) و Hasanuzzaman و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد. محتوای آنتوسیانین و فلاونوئید کل نیز به ترتیب با روش Nadernejad و همکاران (۲۰۱۳) و Toor و Savage (۲۰۰۵) انجام شد.

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) و نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro انجام شد (Shapiro and Wilk, 1965). داده‌های جمع‌آوری شده تجزیه واریانس شدند و مقایسه میانگین داده‌های مربوط حاصل از تیمار گیاهان با سطوح تنش خشکی بر اساس آزمون LSD با سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام و نمودارها در نرم‌افزار اکسل رسم شد. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای و PCA با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT (۲۰۲۱) انجام شد. نقشه حرارتی (HCA) و تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون با استفاده از SRPLOT (آنلاین) انجام شد. همچنین، نمونه خاک مورد استفاده در گلدان‌ها نیز قبل از اعمال تنش خشکی آنالیز شد (جدول ۱).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تیمار تنش خشکی بر صفات مورفولوژیکی آویشن بجز وزن تر ریشه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها،

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها قبل از اعمال تنش خشکی به آویشن باغی

مقدار	واحد	مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک گلدان
۲۸۸۰	میکروزیمنس بر سانتی‌متر	هدایت الکتریکی (EC)
۷/۷۶	pH	اسیدیته
۸۴/۰۰	درصد	درصد شن
۵/۵	درصد	درصد سیلت
۶/۰۰	درصد	درصد رس
۱۰/۴	درصد	درصد کربن آلی
۵/۹۶	(ppm) واحد در میلیون*	فسفر قابل جذب
۷۴/۶۰	واحد در میلیون	پتاسیم قابل جذب
۰/۳۱۲	واحد در میلیون	مس قابل جذب
۲/۳۸	واحد در میلیون	منگنز قابل جذب
۴/۱۲	واحد در میلیون	آهن قابل جذب
۱۰/۲۶	واحد در میلیون	روی قابل جذب
۳/۰۰	میلی‌اکی‌والان در لیتر	کربنات CO_3^{2-}
۶/۲	میلی‌اکی‌والان در لیتر	بیکربنات HCO_3^-
۱۶/۰۰	میلی‌اکی‌والان در لیتر	کلر Cl^-

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی بر پارامترهای مورفولوژی آویشن باغی

منابع تغییرات	درجه آزادی	طول برگ	عرض برگ	ارتفاع بوته	طول ریشه	وزن تر ساقه	وزن خشک ساقه	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه
تنش خشکی	۳	۰/۰۳۲**	۰/۰۰۱**	۲/۹۶**	۱/۳۴**	۰/۱۱**	۰/۰۶**	۰/۰۱ ^{ns}	۱/۲۲**
خطای آزمایش	۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۲۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳۴
ضریب تغییرات (%)		۳/۷۷	۷/۸۴	۱/۴۹	۱/۰۳	۱/۰۳	۲/۵	۱/۵	۰/۰۲۶

*، ** و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ و غیرمعنی‌دار

خشکی ۷۵٪ و ۵۰٪ ظرفیت مزرعه اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین، شدیدترین تیمار تنش خشکی ۲۵٪ ظرفیت مزرعه به‌طور معنی‌داری سبب کاهش طول ریشه گیاه (۴/۴۹٪)، وزن تر ساقه (۴/۰۴٪) و وزن خشک ساقه (۷/۵٪) شد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تیمار تنش خشکی ۵۰ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب سبب کاهش وزن تر ریشه (به‌میزان ۰/۳٪ و ۱/۶۷٪) و وزن خشک ریشه (به‌میزان ۱/۳۸٪ و ۹/۷٪) شد (جدول ۳).

بقای گیاهان در شرایط نامساعد محیطی به توانایی آن‌ها

تیمار تنش خشکی شدید (۲۵٪ ظرفیت مزرعه) به‌طور معنی‌داری سبب کاهش طول برگ به‌میزان ۶۴٪ در مقایسه با شاهد شد و بین تنش خشکی ۷۵٪ و ۵۰٪ ظرفیت مزرعه نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. تیمار تنش خشکی (۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه) به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب سبب کاهش عرض برگ به‌میزان ۲۰٪ و ۳۳٪ نسبت به شاهد شد. مقایسه میانگین ارتفاع گیاه نشان داد که تیمار تنش خشکی (۲۵٪ ظرفیت مزرعه) به‌طور معنی‌داری سبب کاهش ارتفاع گیاه به‌میزان ۱۳/۵۱٪ نسبت به شاهد شد، درحالی‌که بین تنش

جدول ۳- مقایسه میانگین پارامترهای مورفولوژی آویشن باغی تحت تنش خشکی

تیمار	ظرفیت مزرعه	طول برگ (سانتی متر)	عرض برگ (سانتی متر)	ارتفاع بوته (سانتی متر)	طول ریشه (سانتی متر)	وزن تر ساقه (گرم)	وزن خشک ساقه (گرم)	وزن تر ریشه (گرم)	وزن خشک ریشه (گرم)
۱۰۰	۰/۳۹±۰/۰۲ ^a	۰/۱۵±۰/۰۲۹ ^a	۱۷/۶۱±۱/۵۱ ^b	۱۴/۴۵±۰/۶۷ ^a	۹/۹±۰/۱۷ ^a	۴±۰/۰۶۹ ^a	۶/۵۵±۰/۰۴۳ ^a	۱/۴۴±۰/۰۲۶ ^a	ریشه (گرم)
تنش ۷۵	۰/۲۹±۰/۰۴۶ ^b	۰/۱۴±۰/۰۰۱ ^a	۱۶/۷±۰/۳۲ ^b	۱۴/۴۵±۰/۸۸ ^a	۹/۷±۰/۱۷ ^b	۴±۰/۰۸۳ ^a	۶/۵۴±۰/۰۴۵ ^a	۱/۴۳±۰/۰۶۰ ^a	ریشه (گرم)
خشکی ۵۰	۰/۲۴±۰/۰۰۴ ^c	۰/۱۲±۰/۰۰۱ ^b	۱۶/۴۳±۰/۰۰۱ ^a	۱۴±۰/۳۸۱ ^b	۹/۵±۰/۲۴۶ ^c	۳/۹±۰/۰۸۶ ^a	۶/۵۳±۰/۰۴۴ ^a	۱/۴۲±۰/۰۳۶ ^a	ریشه (گرم)
۲۵	۰/۱۴±۰/۰۲۷ ^d	۰/۱۰±۰/۰۰۴ ^c	۱۵/۲۳±۰/۸۱۷ ^c	۱۳/۸±۰/۸۴۳ ^c	۹/۵±۰/۳۳۱ ^c	۳/۷±۰/۱۶ ^b	۶/۴۴±۰/۰۵۷ ^a	۱/۳±۰/۰۵۴ ^b	ریشه (گرم)

میانگین دارای حروف مشابه اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ بر اساس آزمون LSD ندارند.

برای انطباق با تغییرات فیزیولوژی و ساختاری در سیستم متابولیک داخلی شان وابسته است (Chiappero et al., 2019). نتایج پژوهش حاضر در راستای گزارشات دیگر پژوهشگران نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی بر رشد گیاهان دارد و موجب محدودیت در رشد آن‌ها می‌شود، مطابقت دارد (Nor et al., 2021). در این مطالعه، مشاهده شد گیاهانی که تحت تنش خشکی شدید (۲۵٪ ظرفیت مزرعه) رشد کرده‌اند، در مقایسه با شاهد، کاهش معنی‌داری در همه صفات مورفولوژی اندازه‌گیری شده داشتند. تنش خشکی باعث کاهش فشار تورگر می‌شود که به نوبه خود منجر به کاهش رشد و توسعه سلولی در بخش‌های هوایی گیاه به‌ویژه ساقه و برگ‌ها می‌شود. کاهش صفات مورفولوژیک در شرایط تنش خشکی در گیاهان آویشن باغی در این پژوهش، با نتایج مشابه در دیگر گیاهان دارویی مانند نعناع (*Mentha piperita*) (Shadkam et al., 2024)، زنجبیل (*Zingiber officinale*) (Zhu et al., 2024) و خار مریم (*Silybum marianum*) (Fanai et al., 2024) هم‌خوانی داشت. نتایج پژوهش‌ها نشان داد مقدار وزن خشک ساقه، ریشه و وزن خشک کل سه نوع نخود تحت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که علت کاهش شاخص‌های رشدی ممکن است به دلیل کاهش سرعت فتوسنتز و به دنبال آن بسته شدن روزنه‌ها و کاهش سطح برگ در پاسخ به تنش خشکی باشد (Nasr Esfahani, 2013). نتایج مشابهی در پژوهشی که توسط Rahimi و همکاران (۲۰۱۸) روی گیاه نعناع تحت سطوح تنش خشکی (۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ ظرفیت مزرعه) انجام شد، گزارش شده است. یکی از اولین نشانه‌های

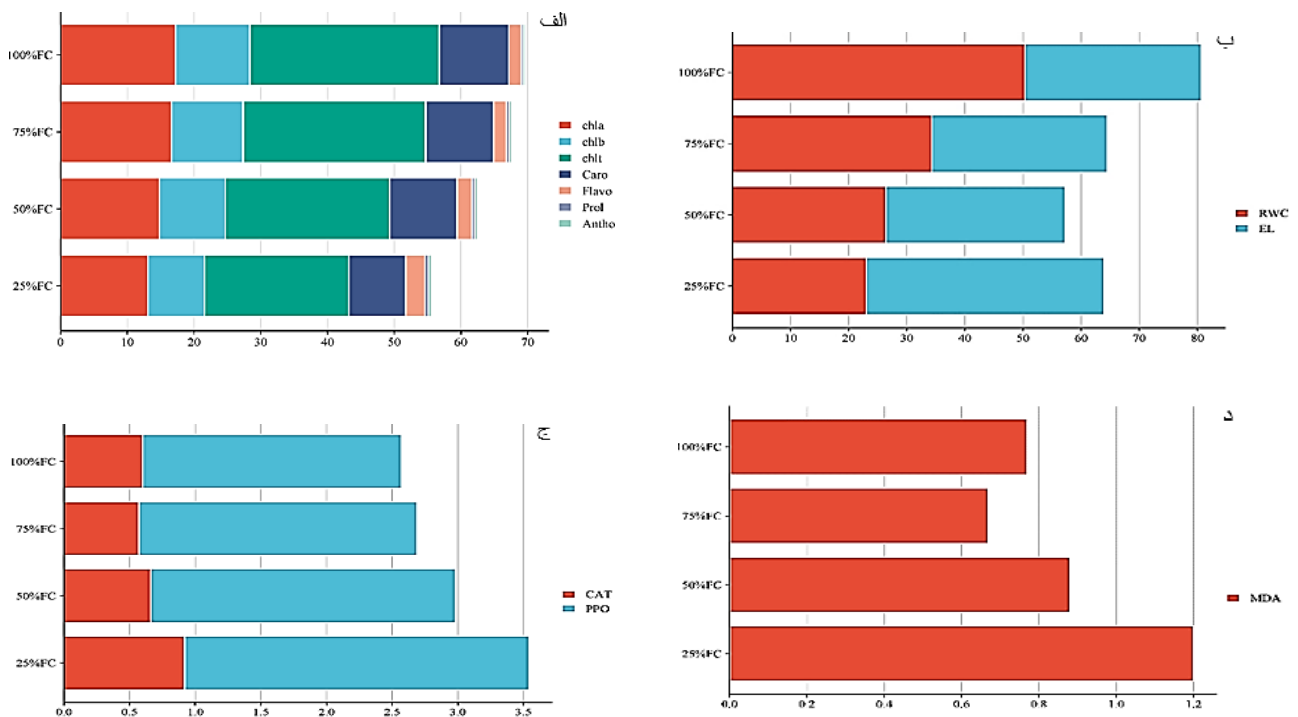
تنش خشکی در گیاهان، کاهش آماس و در نهایت کاهش رشد سلول و عملکرد است (Rahimi et al., 2018). با کاهش رشد سلولی، اندازه اندام‌ها نیز کاهش می‌یابد و به همین دلیل، اولین تأثیر تنش خشکی معمولاً به شکل کاهش اندازه برگ‌ها و بسته به مرحله رشد، در کاهش ارتفاع گیاهان نیز قابل مشاهده است (Hlavacova et al., 2018). کاهش عملکرد گیاه، به دلیل اختلاف پتانسیل آب در طول دوره تنش خشکی و در نتیجه کمبود آب در بافت‌های گیاه رخ می‌دهد (Hassan et al., 2013). کاهش زیست‌توده در شرایط تنش خشکی شدید می‌تواند به علت اختلال در رشد رویشی، عملکرد فتوسنتزی، جذب مواد غذایی، متابولیسم نیتروژن و فشار آماس سلولی ناشی از کاهش سطح برگ‌ها باشد (Nteve et al., 2024).

پارامترهای فیزیولوژیک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تیمار تنش خشکی بر پارامترهای فیزیولوژیک آویشن در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۴). براساس مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین میزان کلیه رنگیزه‌های فتوسنتزی مربوط به شاهد و تیمار تنش خشکی ۷۵٪ ظرفیت مزرعه و کمترین مقدار این صفات با تفاوت معنی‌دار مربوط به تیمار تنش خشکی ۲۵٪ ظرفیت مزرعه بود. میزان کاروتنوئید در سطوح تنش خشکی ۷۵٪ و ۵۰٪ ظرفیت مزرعه با هم تفاوت معنی‌داری نداشتند. مقایسه میانگین محتوای آب نسبی نشان داد، بیشترین میزان مربوط به شاهد و کمترین میزان مربوط به تیمار تنش خشکی ۲۵٪ ظرفیت مزرعه بود. بیشترین میزان نشت یونی متعلق به تنش خشکی ۲۵٪ ظرفیت مزرعه و کمترین میزان آن مربوط به شاهد بود (شکل ۱ A و B). نتایج

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی بر صفات فیزیولوژی آویشن باغی

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید	محتوای آب نسبی	نشت یونی
تنش خشکی	۳	۱۸/۶۳**	۱۵/۵۶**	۶۶/۸۰**	۲/۱۶**	۴۴۳/۴۸**	۸۲/۱۶**
خطای آزمایش	۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
ضریب تغییرات (%)		۰/۵۴	۰/۷۴	۰/۳۳	۰/۷۲	۰/۲۷	۰/۲۴

** معنی دار در سطح احتمال ۱٪



شکل ۱- مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیکی نمودار الف: (Chl a کلروفیل، Chl b کلروفیل، Chl t کلروفیل کل، Caro کارتنوئید)، نمودار ب: (RWC محتوای آب نسبی، EL نشت یونی) و صفات بیوشیمیایی نمودار الف: (Prol پرولین، Antho آنتوسیانین، Flavo فلاونوئید)، نمودار ج: (PPO پلی فنل اکسیداز و CAT کاتالاز) و نمودار د: (MDA مالون دی آلدئید) تحت سطوح تنش خشکی (۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه).

می‌تواند باعث آسیب به غشای سلول‌های گیاهی به‌دلیل تجزیه پروتئین‌ها، تخریب کلروفیل و اکسیداسیون رنگدانه شود. زیرا تنش‌های غیرزیستی با از بین بردن آنزیم‌هایی که مسئول تولید انواع رنگیزه‌ها هستند و فعالیت آنزیم‌هایی که سبب از بین بردن کلروفیل‌ها می‌شوند (کلروفیل‌از و پراکسیداز) سبب کاهش رنگیزه‌ها می‌شوند (Lata *et al.*, 2018). تخریب پروتئین‌های غشا تیلاکوئیدی، وجود ترکیبات فنلی و اختلال در عملکرد آنزیم‌های سنتز کلروفیل منجر به کاهش کلروفیل در برگ‌های

این پژوهش نشان داد که تنش خشکی در شدیدترین حالت (۲۵٪ ظرفیت مزرعه) سبب کاهش معنی دار میزان کلروفیل های a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها می شود. از جمله فرآیندهایی که به شدت تحت تنش خشکی قرار می گیرند فتوسنتز است. تنش خشکی سبب تجزیه اجزای پلی پتیدی فتوسیستم دو و آسیب به مرکز تولید اکسیژن می شود (Khan and Zulfiqua, 2023). دلیل کاهش میزان رنگیزه ها تحت تنش خشکی، آزاد شدن گونه های فعال اکسیژن از سلول های گیاهی است که

گیاهان تحت شرایط تنش خشکی می‌شود. کاروتنوئیدها نقش حفاظتی در سیستم فتوسنتزی دارند و اغلب با شاخص‌های تحمل به تنش خشکی همبستگی زیادی نشان می‌دهند (Gai et al., 2024).

در پژوهش حاضر محتوای آب نسبی برگ در شرایط تنش خشکی (۲۵٪ ظرفیت مزرعه) نسبت به شاهد کاهش یافت. مطالعات انجام‌شده روی گیاهان دارویی نظیر اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia*) (Yarnia et al., 2024) و گل راعی (*Hypericum perforatum*) (Kumar et al., 2024)، کاهش محتوای آب نسبی برگ تحت تنش خشکی را نشان داد. محتوای آب نسبی برگ در گیاهان بهترین معیار جهت تشخیص وضعیت آب در گیاهان است (Altaf et al., 2021)، زیرا با میزان تعرق گیاه نسبت عکس دارد و در نتیجه سایر فعالیت‌های متابولیکی گیاه را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Madouh and Quoreshi, 2023). پوپولا (۲۰۲۴) اشاره کرد که تنش خشکی باعث آسیب به غشای سلول، افزایش نشت مواد محلول به خارج و در نتیجه کاهش محتوای آب نسبی برگ در برگ‌ها می‌شود. تغییر در محتوای رطوبت برگ به‌عنوان یک واکنش کوتاه مدت به تنش است و معیاری از توانایی حفظ منابع در شرایط تنش خشکی است (Popoola et al., 2024). در پژوهش حاضر با افزایش شدت تنش خشکی میزان نشت الکترولیت نیز افزایش یافت، افزایش میزان نشت الکترولیت نشان‌دهنده میزان تراوایی غشا و آسیب دیدن غشای سلول است. تنش‌های محیطی با ایجاد رادیکال‌های آزاد اکسیژن سبب کاهش پایداری غشا و افزایش انتشار مواد سیتوپلاسمی از آن شده، در نتیجه افزایش نشت الکترولیت را موجب می‌شود (Bouremani et al., 2023). مشابه این نتایج در ختمی دارویی (*Althaea officinalis* L.) (Azizzadeh Namin and Heshmati, 2024) و زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) (Shojaei Baghini and Naghizadeh, 2024) گزارش شده است. با توجه به تأثیرات تنش‌ها بر گیاه، نشت الکترولیت به‌عنوان یک عامل پیش‌بینی‌کننده آسیب به غشا مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش نشت یونی به معنای

ناتوانی غشا در حفظ ترکیبات درون سلولی، اختلال در فعالیت و انسجام سلولی و خروج بیشتر الکترولیت‌ها از غشا است. تحقیقی که توسط Asghari و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، نشان داد که تحت شرایط تنش خشکی، نشت الکترولیت‌های غشا افزایش می‌یابد و با افزایش شدت و مدت زمان تنش خشکی، اختلالات قابل‌توجهی در فعالیت‌های بیولوژیکی غشای سلولی، کاهش سیالیت آن و کاهش کارایی پمپ‌های یون‌های غشایی ایجاد می‌شود. این وضعیت به‌نوبه خود باعث افزایش نشت یون‌ها از غشا می‌شود (Asghari et al., 2020).

پارامترهای بیوشیمیایی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تیمار تنش خشکی بر پارامترهای بیوشیمیایی آویشن در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۵). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، تیمار تنش خشکی ۲۵٪ ظرفیت مزرعه سبب افزایش معنی‌داری در میزان پرولین (۵۳/۱۲٪)، کاتالاز (۶۸/۴۷٪)، پلی‌فنل اکسیداز (۵۱/۵۲٪)، مالون دی‌آلدئید (۵۵/۸۴٪)، فلاونوئید (۵۹/۲۳٪) و آنتوسیانین (۶۱/۲۹٪) نسبت به شاهد شد (شکل ۱). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، تیمار تنش خشکی ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب سبب افزایش آنتوسیانین به‌میزان ۴۷٪، ۲۷٪ و ۱۱٪ شد، همچنین افزایش سطوح تنش خشکی به‌طور معنی‌داری سبب افزایش میزان فلاونوئید گردید اما سطوح تیماری ۱۰۰٪ و ۷۵٪ ظرفیت مزرعه تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. براساس نتایج مقایسه میانگین تیمار تنش خشکی به‌طور معنی‌داری سبب افزایش میزان پلی‌فنل اکسیداز و مالون دی‌آلدئید شد، به‌نحوی‌که در شدیدترین سطح تنش خشکی (۲۵٪ ظرفیت مزرعه) به‌ترتیب سبب افزایش ۵۰٪ و ۵۵٪ این صفات شد. تنش خشکی موجب افزایش میزان کاتالاز شد به‌طوری‌که سطوح تنش خشکی ۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب سبب افزایش کاتالاز به‌میزان ۳۵٪ و ۶۱٪ گردید.

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی در سطوح مختلف به‌طور معنی‌داری موجب افزایش پرولین شد. در مطالعات متعدد، افزایش میزان پرولین در پاسخ به تنش خشکی

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی بر صفات بیوشیمیایی آویشن باغی

منابع تغییرات	درجه آزادی	پلی فنل اکسیداز	کاتالاز	آنتوسیانین	فلاونوئید	مالون دی‌آلدهید	پرولین
تنش خشکی	۳	۲/۴۸**	۰/۶۲**	۰/۰۴۶**	۲/۳۴**	۰/۶۷**	۰/۰۳۶**
خطای آزمایش	۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
ضریب تغییرات (%)		۰/۸۵	۱/۵۸	۳/۴۲	۱/۲۲	۱/۲۴	۳/۹۵

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

در گیاهان دارویی مانند ختمی دارویی (Azizzadeh et al., 2024) و زیره سبز (Shojaei et al., 2024) گزارش شده است. پرولین اسمولیت سازگار در تنظیم اسمزی سلول‌ها است که در تنش خشکی نقش به‌سزایی دارد؛ از این‌رو مقدار آن در گیاهان تحت تنش خشکی بررسی می‌شود. میزان پرولین تحت تنش کم‌آبی نسبت به سایر آمینواسیدها در گیاهان، سریع‌تر بالا می‌رود از این‌رو به‌عنوان شاخص ارزیابی برای برنامه‌ریزی آبیاری و برای انتخاب واریته‌های مقاوم به تنش خشکی پیشنهاد شده است (Mehrasa et al., 2022). پرولین دارای قدرت بالایی در حفظ رطوبت است و به‌همین دلیل می‌تواند به‌عنوان یک عامل محافظ در ساختار سلول عمل کند. در مواقعی که گیاه آسیب می‌بیند، پرولین با پروتئین‌ها واکنش داده و یک چارچوب آب‌گریز ایجاد می‌کند که به تثبیت و حفاظت از ماکرومولکول‌های بیولوژیکی و ساختارهای غشای سلولی کمک می‌کند (Osakabe et al., 2014). در شرایط تنش خشکی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در گیاهان افزایش می‌یابد که می‌تواند به سلول‌ها آسیب بزند. برای مقابله با این آسیب‌ها، گیاهان به‌طور طبیعی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز را تولید می‌کنند. این آنزیم‌ها نقش مهمی در تجزیه و خنثی‌سازی ROS دارند و به حفظ سلامت سلول‌ها کمک می‌کنند. کاتالاز به تجزیه پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن می‌پردازد، پراکسیداز به کاهش ROS کمک می‌کند و پلی‌فنل اکسیداز نیز در این فرآیند مؤثر است. افزایش فعالیت این آنزیم‌ها به گیاهان اجازه می‌دهد تا از آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو جلوگیری کنند و در شرایط سخت تنش خشکی به بقای خود ادامه دهند (Koc et al., 2024).

2024). محتوای فلاونوئید کل تحت تنش خشکی شدید افزایش یافت. تنش خشکی سبب افزایش محتوای فلاونوئید در چای سیاه (Camellia sinensis) (Li et al., 2024) و قره‌قات (Ribes khorasanicum) (Yazdi et al., 2018) شد. فلاونوئیدها به‌دلیل ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی خود، می‌توانند به تثبیت ساختارهای سلولی و محافظت از آن‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از تنش خشکی بپردازند و به‌عنوان رنگدانه‌های حفاظتی عمل کرده و به کاهش اثرات منفی نور شدید و سایر عوامل محیطی کمک کنند. گیاهان در شرایط تنش خشکی مجبور به افزایش تولید فلاونوئیدها به‌عنوان یک مکانیسم دفاعی هستند تا به بهبود تحمل خود در برابر شرایط سخت کمک کنند. این ترکیبات می‌توانند به تنظیم فشار اسمزی، کاهش فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو و حفظ تعادل درون‌سلولی کمک کنند. در نتیجه، افزایش محتوای فلاونوئید کل در شرایط تنش خشکی شدید به‌عنوان یک استراتژی دفاعی مهم عمل می‌کند که به گیاهان کمک می‌کند تا با آسیب‌های محیطی مقابله کرده و زنده بمانند (Yang et al., 2020). نتایج این مطالعه نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری سبب افزایش آنتوسیانین شد. افزایش مقدار آنتوسیانین تحت تنش خشکی در چای سیاه (Li et al., 2024) و قره‌قات (Yazdi et al., 2018) گزارش گردید. در شرایط تنش خشکی شدید، محتوای آنتوسیانین کل در گیاهان افزایش می‌یابد زیرا این ترکیبات به‌عنوان واکنش دفاعی در برابر آسیب‌های اکسیداتیو عمل می‌کنند و با از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن و محافظت از ساختارهای سلولی، به کاهش آسیب‌های ناشی از تنش خشکی و نور شدید کمک می‌کنند.

همچنین، این ترکیبات به تنظیم فشار اسمزی و حفظ تعادل درون سلولی در شرایط کمبود آب یاری رسانده و به گیاهان اجازه می‌دهند تا در شرایط سخت بقا یابند (Singh et al., 2023). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بالاترین غلظت مالون دی‌آلدئید در شرایط تنش خشکی ۲۵٪ ظرفیت مزرعه مشاهده شد. در یک مطالعه میزان پراکسیداسیون لیپیدها در گندم (Yaghoubian et al., 2014) و برنج (Shukla et al., 2012) در شرایط تنش خشکی افزایش یافت که با نتایج پژوهش حاضر هم‌سو است. در شرایط تنش خشکی، افزایش غلظت مالون دی‌آلدئید نشان‌دهنده تخریب غشای سلولی است. تنش خشکی باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود که به چربی‌های غشای سلولی آسیب می‌زنند و منجر به پراکسیداسیون لیپیدها می‌شوند. این فرآیند به وسیله آنزیم لیپوکسیژیناز تشدید شده و باعث افزایش سطح مالون دی‌آلدئید می‌شود. مطالعات پیشین نشان داده است که افزایش مالون دی‌آلدئید در آویشن دانی *T. daenensis*، به کاهش میزان کلروفیل و فتوسنتز منجر می‌شود و به‌عنوان یک نشان‌گر زیستی از آسیب‌های ناشی از استرس و حساسیت گیاهان به تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش خشکی، شناخته می‌شود (Shahrudi et al., 2023).

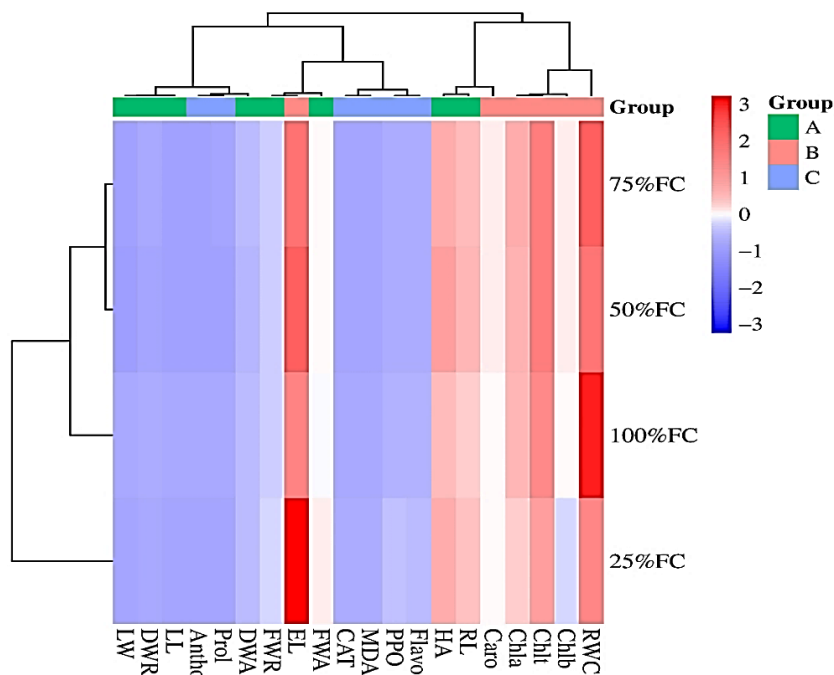
نقشه حرارتی (HCA): شکل ۲، یک نمودار نقشه حرارتی (Heatmap) با آنالیز خوشه‌بندی (Cluster analysis) برای نمایش تغییرات صفات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان تحت سطوح مختلف تنش خشکی (۱۰۰٪، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه) است. خوشه‌بندی صفات نشان می‌دهد که چگونه این صفات بر اساس واکنش‌های مشابه به تنش خشکی گروه‌بندی شده‌اند. در این نمودار سطرها بیان‌گر نمونه‌های مختلف گیاهان هستند که با رنگ‌های مختلف (سبز، قرمز و آبی) مشخص شده‌اند و هر رنگ نمایان‌گر یک گروه (A، B و C) است. ستون‌ها نشان‌دهنده صفات مختلف مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی هستند که نام هر صفت در پایین نمودار ذکر شده است. رنگ‌های مختلف در نقشه حرارتی نشان‌دهنده میزان تغییرات

هر صفت نسبت به شرایط تنش خشکی هستند. رنگ قرمز افزایش و رنگ آبی کاهش را نشان می‌دهد. شدت رنگ نشان‌دهنده میزان تغییرات است که شامل قرمز پررنگ (افزایش زیاد)، آبی پررنگ (کاهش زیاد) و سفید (تغییرات کم) هستند. بررسی صفات شامل موارد زیر بودند:

همبستگی‌های مثبت: الف) نشت یونی (EL) با فعالیت پلی‌فنل اکسیداز (PPO) و پرولین (Prol) در سطح تنش خشکی FC ۲۵٪ همبستگی مثبت قوی داشت. ب) محتوای آب نسبی (RWC) با کلروفیل a، کلروفیل b، و کلروفیل کل در سطح تنش خشکی FC ۱۰۰٪ همبستگی مثبت داشت. ج) فعالیت کاتالاز (CAT) با پرولین (Prol) و مالون دی‌آلدئید (MDA) در سطح تنش خشکی FC ۲۵٪ همبستگی مثبت داشت. د) فعالیت پلی‌فنل اکسیداز (PPO) با فلاونوئید (Flavo) و آنتوسیانین (Antho) در سطح تنش خشکی FC ۲۵٪ همبستگی مثبت داشت.

همبستگی‌های منفی: الف) طول برگ (LL) و عرض برگ (LW) با نشت یونی (EL) و مالون دی‌آلدئید (MDA) در سطح تنش خشکی FC ۲۵٪ همبستگی منفی داشت. ب) محتوای آب نسبی (RWC) با پرولین (Prol)، پلی‌فنل اکسیداز (PPO)، کاتالاز (CAT)، آنتوسیانین (Antho) و فلاونوئید (Flavo) در سطح تنش خشکی FC ۲۵٪ همبستگی منفی داشت. ج) وزن تر ریشه (FWR) و وزن خشک ریشه (DWR) با نشت یونی (EL) در سطح تنش خشکی FC ۲۵٪ همبستگی منفی داشت.

رگرسیون خطی: مدل رگرسیونی طراحی شده به‌منظور پیش‌بینی وزن خشک بوته براساس مقادیر کلروفیل‌ها است تا بررسی شود که تغییرات در سطح کلروفیل‌ها چگونه می‌تواند وزن خشک بوته را پیش‌بینی کند. این تحلیل به شناسایی روابط بین ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه و وزن خشک بوته کمک می‌کند. در این مطالعه، وزن خشک بوته (DWA) به‌عنوان متغیر وابسته و مقادیر کلروفیل‌ها (کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل t) به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۹۹۱ است. این مقدار به این معنی



شکل ۲- نقشه حرارتی (HCA)، نتایج همبستگی ساده بین صفات مورفولوژی، فیزیولوژی و بیوشیمیایی تحت سطوح تنش خشکی (۱۰۰٪، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه): طول برگ LL، عرض برگ LW، ارتفاع بوته HA، طول ریشه RL، وزن تر ساقه FWA، وزن خشک ساقه DWA، وزن تر ریشه FWR، وزن خشک ریشه DWR، کلروفیل a، کلروفیل b، Chl t، کلروفیل کل، Caro کارتنوئید، RWC محتوای آب نسبی، EL نشت یونی، CAT کاتالاز، Antho آنتوسیانین، Flavo فلاونوئید، MDA مالون دی آلدئید، Prol پرولین، PPO پلی فنل اکسیداز

رگرسیون طراحی شده به منظور پیش بینی وزن خشک بوته بر اساس مقادیر کلروفیل ها بود تا بررسی شود که تغییرات در سطح کلروفیل ها چگونه می تواند وزن خشک بوته را پیش بینی کند. این تحلیل به شناسایی روابط بین ویژگی های فیزیولوژیکی گیاه و وزن خشک بوته کمک می کند. انتخاب کلروفیل ها به عنوان متغیرهای مستقل به طور مستقیم بر نرخ فتوسنتز و به تبع آن بر میزان تولید بیوماس و وزن خشک بوته تأثیر می گذارند. تحلیل این متغیرها به صورت جداگانه و ترکیبی می تواند تأثیرات معنی دار را نشان دهد. درک ارتباط بین کلروفیل ها و وزن خشک بوته می تواند به بهبود روش های زراعی و مدیریت کشت کمک کند. به عنوان مثال، اگر رابطه قوی بین میزان کلروفیل و وزن خشک بوته یافت شود، این اطلاعات می تواند برای بهینه سازی تغذیه و شرایط رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرد تا تولید زیست توده افزایش یابد.

همبستگی پیرسون: رنگ ها و اندازه دایره ها نشان دهنده

است که مدل رگرسیونی می تواند ۰/۹۹۱ از تغییرات وزن خشک بوته (DWA) را با استفاده از مقادیر کلروفیل ها توضیح دهد. به عبارت ساده، این مقدار نشان دهنده این است که مدل توانایی بالایی در پیش بینی وزن خشک بوته دارد و تقریباً تمامی تغییرات در این متغیر وابسته را بر اساس مقادیر ورودی کلروفیل ها پیش بینی می کند.

دلایل انتخاب متغیر وابسته و مستقل: وزن خشک بوته

به عنوان متغیر وابسته، یکی از معیارهای اصلی ارزیابی رشد و سلامت گیاه است. این متغیر مستقیماً با تولید زیست توده و توانایی رشد گیاه مرتبط است و بنابراین در مطالعات فیزیولوژیک و زراعی اهمیت زیادی دارد. کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند، زیرا نقش حیاتی در فرآیند فتوسنتز دارند. میزان کلروفیل در برگ ها به عنوان شاخصی از کارایی فتوسنتز گیاه عمل می کند و می تواند بر رشد و وزن خشک بوته تأثیرگذار باشد. مدل

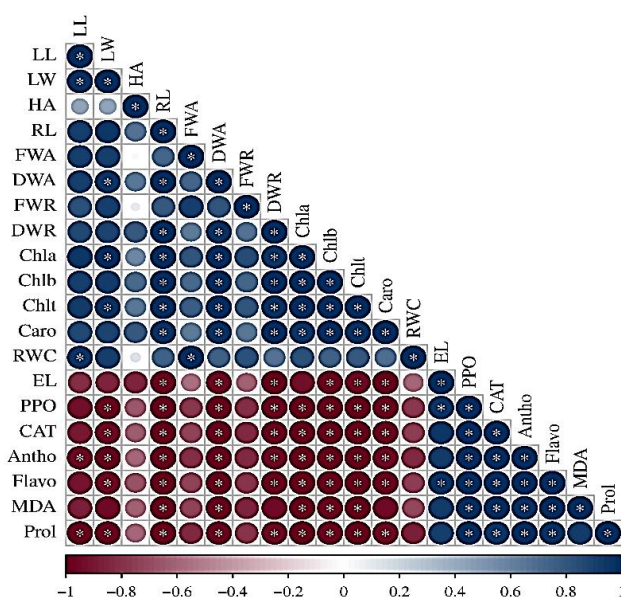
مدل رگرسیونی			
معادله	F	P	R ²
$(DWA) = 3/147 + 0/034 (Chl a) + 0/026 (Chl b) + 0/000 \times (Chl t)$ وزن خشک بوته	۵۳/۷۵۳	۰/۰۹۶	۰/۹۹

میزان و جهت همبستگی بین این صفات بودند. رنگ‌های آبی نشان‌دهنده همبستگی مثبت و رنگ‌های قرمز نشان‌دهنده همبستگی منفی بودند. هر چه اندازه دایره بزرگتر بود، همبستگی قوی‌تر بود. علامت ستاره در داخل دایره‌ها نشان‌دهنده معنی‌داری آماری همبستگی بود (شکل ۳). این ماتریس به پژوهشگران کمک می‌کند تا دریابند کدام صفات تحت شرایط تنش خشکی با یکدیگر مرتبط هستند و چگونه این روابط می‌تواند بر عملکرد گیاه تأثیر بگذارد. بر اساس ماتریس همبستگی موجود در شکل، همبستگی مثبت قابل-توجهی بین طول برگ (LL) و عرض برگ (LW) مشاهده شد، به‌طوری که با افزایش طول برگ، عرض برگ نیز افزایش یافت. کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل نیز همبستگی مثبت قوی نشان دادند، به این معنی که افزایش یکی از این انواع کلروفیل معمولاً با افزایش دیگری همراه بود. وزن تر ساقه (FWA) و وزن خشک ساقه (DWA)، همچنین وزن تر ریشه (FWR) و وزن خشک ریشه (DWR) همبستگی مثبت قوی داشتند که نشان داد افزایش وزن تر با افزایش وزن خشک همراه بود. کارتنوئید (Caro) نیز با کلروفیل‌ها همبستگی مثبت داشت، به این معنی که با افزایش کارتنوئید، مقدار کلروفیل‌ها نیز افزایش یافت. از سوی دیگر، همبستگی منفی قابل‌توجهی بین محتوای آب نسبی (RWC) و نشت یونی (EL) وجود داشت که نشان داد با افزایش محتوای آب نسبی، نشت یونی کاهش یافت. همچنین، محتوای آب نسبی (RWC) با MDA همبستگی منفی داشت، به این معنی که با افزایش محتوای آب نسبی، مقدار (MDA) کاهش یافت. نشت یونی (EL) با فلاونوئید (Flavo) و کاتالاز (CAT) همبستگی منفی داشت که نشان داد با افزایش نشت یونی، مقدار فلاونوئید و فعالیت کاتالاز کاهش یافت. در عین حال، پرولین (Prol) با فلاونوئید (Flavo) همبستگی مثبت داشت، به این معنی که با افزایش

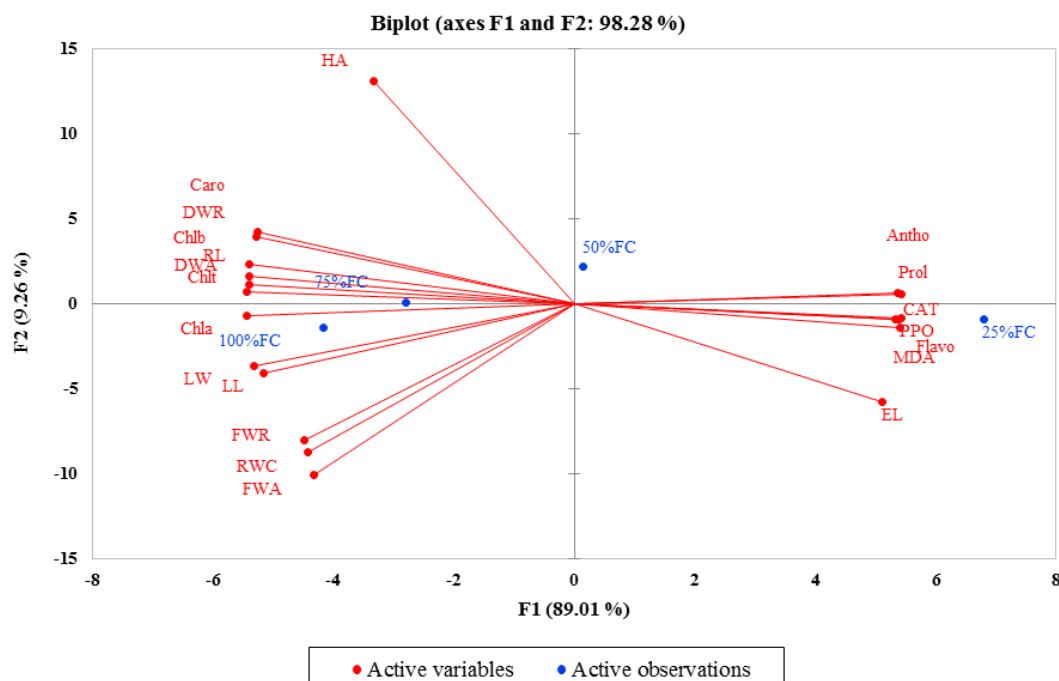
پرولین، مقدار فلاونوئید نیز افزایش یافت. همچنین، پلی‌فنل اکسیداز (PPO) با نشت یونی (EL) همبستگی مثبت داشت که نشان داد با افزایش پلی‌فنل اکسیداز، نشت یونی نیز افزایش یافت. این روابط همبستگی نشان‌دهنده چگونگی تغییرات متقابل این صفات در شرایط مختلف تنش خشکی بودند و می‌تواند به محققان کمک کند تا روابط بین این صفات را بهتر درک کنند.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی Principal Component Analysis (PCA)

شکل ۴، یک نمودار PCA biplot است که مشاهدات و متغیرهای مختلف را در فضای دو مؤلفه اصلی (F1, F2) نمایش می‌دهد. محور افقی (F1) ۸۹/۰۱٪ و محور عمودی (F2) ۹/۲۶٪ از واریانس داده‌ها را توضیح می‌دهند. در مجموع این دو محور ۹۸/۲۸٪ از واریانس کل را پوشش می‌دهند، که نشان‌دهنده تأثیر بسیار قوی این دو مؤلفه در تحلیل است. متغیرهای مختلف با خطوط قرمز رنگ و برچسب‌های قرمز نشان داده شده‌اند: متغیرهای مربوط به رشد گیاه مثل طول برگ (LL)، عرض برگ (LW)، ارتفاع بوته (HA)، وزن تر و خشک ساقه و ریشه (FWR, DWA, FWA)، بیشتر به سمت چپ و بالا قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده رابطه مثبت و قوی بین این متغیرها و شرایط مناسب رشد گیاه در نبود تنش یا سطوح پایین‌تر تنش خشکی است. متغیرهای مربوط به محتوای کلروفیل‌ها (Chla, Chlb, Chlt) و کارتنوئید (Caro) به سمت چپ و کمی بالاتر از محور افقی هستند که نشان‌دهنده این است که با افزایش تنش خشکی، مقدار کلروفیل‌ها و کارتنوئیدها کاهش می‌یابد، اما این کاهش آن قدر نیست که فتوسنتز گیاه را به‌طور کامل مختل کند. به عبارت دیگر، خشکی به‌طور جزئی بر این رنگ‌دانه‌ها اثر منفی دارد، اما گیاه همچنان می‌تواند به فتوسنتز ادامه دهد. متغیرهای مربوط به مقاومت به تنش خشکی مثل نشت یونی (EL)،



شکل ۳- همبستگی پیرسون بین پارامترهای اندازه‌گیری شده *T. vulgaris* تحت کنترل و سطوح تنش خشکی (۱۰۰٪، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه): طول برگ LL، عرض برگ LW، ارتفاع بوته HA، طول ریشه RL، وزن تر ساقه FWA، وزن خشک ساقه DWA، وزن تر ریشه FWR، وزن خشک ریشه DWR، Chl a کلروفیل a، Chl b کلروفیل b، Chl t کلروفیل کل، Caro کارتنوئید، RWC محتوای آب نسبی، EL نشت یونی، CAT کاتالاز، Antho آنتوسیانین، Flavo فلاونوئید، MDA مالون دی‌آلدهید، Prol پرولین، PPO پلی‌فنل اکسیداز



شکل ۴- PCA- Biplot تجزیه به مؤلفه‌های اصلی: پراکنش دویعدی صفات مورد ارزیابی تحت سطوح تنش خشکی (۱۰۰٪، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ ظرفیت مزرعه): طول برگ LL، عرض برگ LW، ارتفاع بوته HA، طول ریشه RL، وزن تر ساقه FWA، وزن خشک ساقه DWA، وزن تر ریشه FWR، وزن خشک ریشه DWR، Chl a کلروفیل a، Chl b کلروفیل b، Chl t کلروفیل کل، Caro کارتنوئید، RWC محتوای آب نسبی، EL نشت یونی، CAT کاتالاز، Antho آنتوسیانین، Flavo فلاونوئید، MDA مالون دی‌آلدهید، Prol پرولین، PPO پلی‌فنل اکسیداز

نتیجه‌گیری

آویشن باغی به گونه سنتی در مناطق معتدل و سردسیر کشت می‌شود و اطلاعات محدودی در مورد قابلیت‌های آن برای تحمل شرایط تنش خشکی در مناطق گرم و خشک مانند استان هرمزگان وجود دارد. با توجه به شرایط آب و هوایی خاص هرمزگان، که شامل دماهای بالا و کمبود آب است، نیاز به بررسی میزان تحمل این گیاه به تنش خشکی احساس شد. یافته‌های این مطالعه نشان داد که آویشن باغی تحت تنش خشکی، ویژگی‌های رشدی و عملکردی خود را برای سازگاری با شرایط خشک تغییر می‌دهد تیمار با ۷۵٪ و ۵۰٪ ظرفیت مزرعه تأثیر کمی بر این گیاه داشت، اما در شرایط تنش شدید ۲۵٪ ظرفیت مزرعه، رشد گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در این شرایط، گیاهان با افزایش تولید مواد تنظیم‌کننده اسمزی، ظرفیت جذب آب خود را بهبود بخشیدند و با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش دادند. همچنین به نظر می‌رسد که تیمار با ۷۵٪ و ۵۰٪ ظرفیت مزرعه گزینه مناسبی برای کشت آویشن باغی در استان هرمزگان باشد. این سطح از تنش خشکی می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش کارایی تولید در شرایط مشابه با وضعیت آب و هوایی هرمزگان کمک کند. نتایج این مطالعه می‌تواند به کشاورزان و متخصصان کمک کند تا روش‌های مناسب برای کشت آویشن باغی در شرایط خشک و نیمه‌خشک را شناسایی کرده و بهبود بخشد.

MDA، پرولین (Prol)، پلی‌فنل اکسیداز (PPO)، کاتالاز (CAT)، آنتوسیانین (Antho)، فلاونوئید (Flavo) بیشتر به سمت راست و پایین قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده رابطه مثبت و قوی بین این متغیرها و سطوح بالاتر تنش خشکی است، که بیانگر افزایش فعالیت‌های بیوشیمیایی دفاعی و سازگاری گیاه در پاسخ به تنش خشکی شدیدتر است. مشاهدات مختلف با نقاط آبی رنگ نمایش داده شده‌اند که نشان‌دهنده سطوح مختلف تنش خشکی هستند. FC ۱۰۰٪ به مرکز نزدیک است، که نشان می‌دهد این سطح تنش خشکی تقریباً تأثیری بر متغیرهای مختلف ندارد. FC ۷۵٪ به سمت چپ محور افقی قرار دارد، که نشان می‌دهد تأثیرات تنش خشکی کمی بر برخی از متغیرهای رشد گیاه داشته است. تنش متغیرهای رشد گیاه مثل LL، LW، FWA و FW به هم نزدیک هستند که نشان‌دهنده ارتباط مثبت بین این متغیرها است. همچنین، متغیرهای مقاومت به تنش خشکی مثل EL، MDA، Prol، PPO، CAT، Antho و Flavo به هم نزدیک هستند که نشان‌دهنده ارتباط مثبت بین این متغیرها است. با افزایش سطح تنش خشکی از FC ۱۰۰٪ به FC ۲۵٪ تأثیرات تنش خشکی بیشتر بر متغیرهای مقاومت به تنش خشکی قابل مشاهده است. این بای‌پلات نشان‌دهنده تأثیرات مختلف سطوح تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه است و می‌تواند به محققان کمک کند تا بفهمند کدام صفات تحت شرایط تنش خشکی بیشتر تغییر می‌کنند و چگونه این صفات با هم مرتبط هستند.

منابع

- لرستانی، شیدا، قبولی، مهدی، موحدی، زهرا، و کریمی، روح‌اله (۱۳۹۷). بررسی تأثیر قارچ *Piriformospora indica* بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیک گیاه دارویی سنبل الطیب (*Valeriana officinalis* L.) در شرایط تنش خشکی. فیزیولوژی محیطی گیاهی (پژوهش‌های اکوفیزیولوژی گیاهی ایران)، ۱۳ (۲)، ۴۱-۵۲. SID. <https://sid.ir/paper/185721/fa>
- Abdelshafy Mohamad, O. A., Ma, J. B., Liu, Y. H., Zhang, D., Hua, S., Bhute, S., Hedlund, B. P., Li, W. J., & Li, L. (2020). Beneficial endophytic bacterial populations associated with medicinal plant *Thymus vulgaris* alleviate salt stress and confer resistance to *Fusarium oxysporum*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 47. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00047>
- Altaf, A., Gull, S., Zhu, X., Zhu, M., Rasool, G., Ibrahim, M. E. H., Aleem, M., Uddin, S., Saeed, A., & Shah, A. Z. (2021). Study of the effect of peg-6000 imposed drought stress on wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars using relative water content (RWC) and proline content analysis. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 58(1). <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/21.953>

- Asghari, B., Khademian, R., & Sedaghati, B. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage condition. *Scientia Horticulturae*, 263, 109132. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109132>
- Azizi, S., Zare, N., Sheikhzadeh, P., Azizi, J., & Karimizadeh, R. (2024). Evaluation of the physiological and biochemical response of cultivars *Lens culinaris* to drought stress and re-irrigation. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. <https://doi.org/10.22077/escs.2024.6428.2213>
- Azizzadeh Namin, S, & Heshmati, S. (2024). Effect of biochar on flower yield and growth and physiological characteristics of *Althaea officinalis* L. under drought stress. *Journal of Plant Production Research*. 10.22069/JOPP.2024.22575.3158
- Bahreaninejad, B., Razmjou, J., & Mirza, M. (2013). Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. <https://www.ijpp.info>
- Bates, L. S., Waldren, R. A., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Bergmeyer, H. U. (2012). *Methods of Enzymatic Analysis*. Elsevier.
- Bistgani, Z. E., Barker, A. V., & Hashemi, M. (2024). Physiology of medicinal and aromatic plants under drought stress. *The Crop Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.12.003>
- Bouremani, N., Cherif-Silini, H., Silini, A., Bouket, A. C., Luptakova, L., Alenezi, F. N., Baranov, O., & Belbahri, L. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A rampart against the adverse effects of drought stress. *Water*, 15(3), 418. <https://doi.org/10.3390/w15030418>
- Casiglia, S., Bruno, M., Scandolera, E., Senatore, F., & Senatore, F. (2019). Influence of harvesting time on composition of the essential oil of *Thymus capitatus* (L.) Hoffmanns. & Link. growing wild in northern Sicily and its activity on microorganisms affecting historical art crafts. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 2704-2712. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.05.017>
- Chiappero, J., del Rosario Cappellari, L., Alderete, L. G. S., Palermo, T. B., & Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products*, 139, 111553. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111553>
- Cooper, M., & Messina, C. D. (2023). Breeding crops for drought-affected environments and improved climate resilience. *The Plant Cell*, 35(1), 162-186. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac321>
- Du, Z., & Bramlage, W. J. (1992). Modified thiobarbituric acid assay for measuring lipid oxidation in sugar-rich plant tissue extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(9), 1566-1570. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=4691137>
- Fanai, S., Bakhshi, D., & Abbaszadeh, B. (2024). Physiological and biochemical characteristics of milk thistle (*Silybum marianum* (L.) Gaertn) as affected by some plant growth regulators. *Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4233>
- Gai, J., Wang, J., Xie, S., Xiang, L., & Wang, Z. (2024). Spectroscopic determination of chlorophyll content in sugarcane leaves for drought stress detection. *Precision Agriculture*, 25(2), 543-569. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10082-0>
- Gharib, F., Zeid, I. M., Salem, O., & Ahmed, E. Z. (2014). Effects of *Sargassum latifolium* extract on growth, oil content and enzymatic activities of rosemary plants under salinity stress. *Life sciences Journal*, 11(10), 933-945. <http://www.lifesciencesite.com>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (2013). Plant response to salt stress and role of exogenous protectants to mitigate salt-induced damages. *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress*, 25-87. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4747-4_2
- Hassan, F., Ali, E., & El-Zahrany, O. (2013). Effect of amino acids application and different water regimes on the growth and volatile oil of *Rosmarinus officinalis* L. plant under Taif region conditions. *European Journal of Scientific Research*, 101(3), 346-359. <http://www.europeanjournalofscientificresearch.com>
- Hlavacova, M., Klem, K., Rapantova, B., Novotna, K., Urban, O., Hlavinka, P., Smutna, P., Horakova, V., Skarpa, P., & Pohankova, E. (2018). Interactive effects of high temperature and drought stress during stem elongation, anthesis and early grain filling on the yield formation and photosynthesis of winter wheat. *Field Crops Research*, 221, 182-195. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.022>
- Kang, S., Hao, X., Du, T., Tong, L., Su, X., Lu, H., Li, X., Huo, Z., Li, S., & Ding, R. (2017). Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. *Agricultural Water Management*, 179, 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.007>
- Khan, M. S., & Zulfiqar, I. (2023). Microbial Mitigation of Drought Stress in Plants: Adaptations to Climate Change. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109669>
- Khorasaninejad, S., Mousavi, A., Soltanloo, H., Hemmati, K., & Khalighi, A. (2011). The effect of drought stress on growth parameters, essential oil yield and constituent of Peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Medicinal*

- Plants Research*, 5(22), 5360-5365. <https://doi.org/10.13187/ejmb.2015.8.103>
- Koc, C., Ulusu, F., & Ulusu, Y. (2024). Physio-biochemical responses of registered bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes to drought stress: Variations in antioxidant parameters and photosynthetic pigment amounts. *Anatolian Journal of Botany*, 8(1), 1-10. <https://doi.org/10.30616/ajb.1369278>
- Kong, L., Chen, P., & Chang, C. (2023). Drought resistance and ginsenosides biosynthesis in response to abscisic acid in *Panax ginseng* CA Meyer. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9194. <https://doi.org/10.3390/ijms24119194>
- Kumar, D., Punetha, A., Khan, A., Suryavanshi, P., Yogendra, N., & Padalia, R. (2024). Assessment of soil moisture stress induced variability in oil content and composition in mint species. *Biochemical Systematics and Ecology*, 113, 104774. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104774>
- Laftouhi, A., Mahraz, M. A., Hmamou, A., Assouguem, A., Ullah, R., Bari, A., Lahlali, R., Ercisli, S., Kaur, S., & Idrissi, A. M. (2024). Analysis of primary and secondary metabolites, physical properties, antioxidant and antidiabetic activities, and chemical composition of *Rosmarinus officinalis* essential oils under differential water stress conditions. *ACS Omega*, 9(14), 16656-16664. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00653>
- Lata, C., Kumar, A., Rani, S., Soni, S., Kaur, G., Kumar, N., ... & Singh, A. (2019). Physiological and molecular traits conferring salt tolerance in halophytic grasses. *Journal of Environmental Biology*, 40(5), 1052-1059. <https://doi.org/10.22438/ieb/40/5/MRN-1089>
- Li, Z., Han, Y., Li, X., Zhao, J., Wang, N., Wen, Y., Li, T., Su, H., Gao, L., & Xia, T. (2024). The phosphorylation of a WD40-repeat protein negatively regulates flavonoid biosynthesis in *Camellia sinensis* under drought stress. *Horticulture Research*, uhae136. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae136>
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1(1), F4. 3.1-F4. 3.8. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
- Madouh, T. A., & Quoreshi, A. M. (2023). The function of arbuscular mycorrhizal fungi associated with drought stress resistance in native plants of arid desert ecosystems: A review. *Diversity*, 15(3), 391. <https://doi.org/10.3390/d15030391>
- Mehrasa, H., Farnia, A., Kenarsari, M. J., & Nakhjavan, S. (2022). Endophytic bacteria and SA application improve growth, biochemical properties, and nutrient uptake in white beans under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 3268-3279. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00884-y>
- Moradi, P., Ford-Lloyd, B., & Pritchard, J. (2014). Plant-water responses of different medicinal plant thyme (*Thymus* spp.) species to drought stress condition. *Australian Journal of Crop Science*, 8(5), 666-673. <https://doi.org/10.3316/informit.370656880873980>
- Morgan, J. A. (1984). Interaction of water supply and N in wheat. *Plant Physiology*, 76(1), 112-117. <https://doi.org/10.1104/pp.76.1.112>
- Mozaffari, S., & 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. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2016.10754.1849>
- Nadernejad, N., Ahmadimoghadam, A., Hossyinfard, J., & Poorseyedi, S. (2013). Study of the rootstock and cultivar effect in PAL activity, production of phenolic and flavonoid compounds on flower, leaf and fruit in Pistachio (*Pistacia vera* L.). *Journal of Plant Biological Sciences*, 5(15), 95-110. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20088264.1392.5.15.9.5>
- Narayanasamy, S., Thankappan, S., Kumaravel, S., Ragupathi, S., & Uthandi, S. (2023). Complete genome sequence analysis of a plant growth-promoting phylloplane *Bacillus altitudinis* FD48 offers mechanistic insights into priming drought stress tolerance in rice. *Genomics*, 115(1), 110550. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2022.110550>
- Nasr Esfahani, M. (2013). Effect of dry stress on growth and antioxidant system in three chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Iranian Journal of Plant Biology*, 5(15), 111-124. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20088264.1392.5.15.10.6>
- Nor, N. M., Pa'ee, F., & Manan, N. (2021). The effect of water stress on growth rate in *Mentha arvensis*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <https://dorl.net/dor/10.1088/1755-1315/736/1/012040>
- Nteve, G. M., Kostas, S., Polidoros, A. N., Madesis, P., & Nianiou-Obeidat, I. (2024). Adaptation mechanisms of olive tree under drought stress: The potential of modern omics approaches. *Agriculture*, 14(4), 579. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040579>
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5, 86. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>
- Pandey, J., Devadasu, E., Saini, D., Dhokne, K., Marriboina, S., Raghavendra, A. S., & Subramanyam, R. (2023). Reversible changes in structure and function of photosynthetic apparatus of pea (*Pisum sativum*) leaves under drought stress. *The Plant Journal*, 113(1), 60-74. <https://doi.org/10.1111/tpj.16034>
- Popoola, J. O., Oyelakin, A. S., Ifemazi, C. F., Aworunse, O. S., Ojuederie, O. B., Agbolade, J., & Krishnamurthy, R. (2024). Resilience in hyacinth Bean (*Lablab purpureus* (L.) Sweet): A combined approach of relative water content

- and gene expression analysis for drought tolerance. *Journal of Underutilized Legumes*, 6(1), 1-16. <https://sulegumes.org/>
- Rahimi, Y., Taleei, A., & Ranjbar, M. (2018). Long-term water deficit modulates antioxidant capacity of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Scientia Horticulturae*, 237, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.004>
- Rasheed, A., Zhao, L., Raza, A., Mahmood, A., Xing, H., Lv, X., Saeed, H., Alqahtani, F. M., Hashem, M., & Hassan, M. U. (2023). Role of molecular breeding tools in enhancing the breeding of drought-resilient cotton genotypes: An updated review. *Water*, 15(7), 1377. <https://doi.org/10.3390/w15071377>
- Sairam, R. K., Rao, K. V., & Srivastava, G. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant Science*, 163(5), 1037-1046. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00278-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9)
- Shadkam, S., Sharafi, S., Yazdan Seta, S., Mir Mahmoodi, T., & Habibi, F. (2024). The effect of foliar application of different nano fertilizers on the quantitative and qualitative characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.) under water stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. <https://doi.org/10.22077/escs.2023.5805.2177>
- Shahroudi, E., Zarinkamar, F., & Rezayian, M. (2023). Putrescine modulates metabolic and physiological characteristics of *Thymus daenensis* under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 321, 112268. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112268>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Shojaei Baghini, M. H., & Naghizadeh, M. (2024). Evaluation of the effect of foliar application of brassinosteroid and melatonin on some physiological, grain yield and cumin (*Cuminum cyminum* L.) essential oil under drought stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 40(1), 155-173. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2023.362048.3310>
- Shukla, N., Awasthi, R., Rawat, L., & Kumar, J. (2012). Biochemical and physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) as influenced by *Trichoderma harzianum* under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 54, 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.02.001>
- Silva, A. S., Tewari, D., Sureda, A., Suntar, I., Belwal, T., Battino, M., Nabavi, S. M., & Nabavi, S. F. (2021). The evidence of health benefits and food applications of *Thymus vulgaris* L. *Trends in Food Science and Technology*, 117, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.010>
- Singh, M., Sharma, J. G., & Giri, B. (2023). Microbial inoculants alter resilience towards drought stress in wheat plants. *Plant Growth Regulation*, 101(3), 823-843. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01059>
- Toor, R. K., & Savage, G. P. (2005). Antioxidant activity in different fractions of tomatoes. *Food Research International*, 38(5), 487-494. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.10.016>
- Wang, Y., Chen, G., Zeng, F., Han, Z., Qiu, C. W., Zeng, M., Yang, Z., Xu, F., Wu, D., & Deng, F. (2023). Molecular evidence for adaptive evolution of drought tolerance in wild cereals. *New Phytologist*, 237(2), 497-514. <https://doi.org/10.1111/nph.18560>
- Yaghoubian, Y., Goltapeh, E. M., Pirdashti, H., Esfandiari, E., Feiziasl, V., Dolatabadi, H. K., Varma, A., & Hassim, M. H. (2014). Effect of *Glomus mosseae* and *Piriformospora indica* on growth and antioxidant defense responses of wheat plants under drought stress. *Agricultural Research*, 3, 239-245. <https://doi.org/10.1007/s40003-014-0114-x>
- Yang, L. L., Yang, L., Yang, X., Zhang, T., Lan, Y. M., Zhao, Y., Han, M., & Yang, L. M. (2020). Drought stress induces biosynthesis of flavonoids in leaves and saikosaponins in roots of *Bupleurum chinense* DC. *Phytochemistry*, 177, 112434. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2020.112434>
- Yang, Z., & Qin, F. (2023). The battle of crops against drought: Genetic dissection and improvement. *Journal of Integrative Plant Biology*, 65(2), 496-525. <https://doi.org/10.1111/jipb.13451>
- Yarnia, M., Behrouzfar, E. K., Mirshekari, B., & Rashidi, V. (2024). Effects of bio-fertilizers and different levels of phosphorus on biochemical traits, essential oils, and antioxidant enzymes in Lavender (*Lavandula Angustifolia*) under water stress. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3934553/v1>
- Yazdi, M. E. T., Khara, J., Housaindokht, M. R., Sadeghnia, H. R., Bahabadid, S. E., Amiri, M. S., & Darroudi, M. (2018). Biocomponents and antioxidant activity of *Ribes khorasanicum*. *International Journal of Basic Science in Medicine*, 3(3), 99-103. <https://doi.org/10.15171/ijbsm.2018.18>
- Zhao, X., Yuan, X., Xing, Y., Dao, J., Zhao, D., Li, Y., Li, W., & Wang, Z. (2023). A meta-analysis on morphological, physiological and biochemical responses of plants with PGPR inoculation under drought stress. *Plant, Cell and Environment*, 46(1), 199-214. <https://doi.org/10.1111/pce.14466>
- Zhu, Y., Xi, K., Ma, H., Yang, P., Wang, Y., Li, H., Yin, J., Qin, M., & Liu, Y. (2024). Exogenous silica nanoparticles improve drought tolerance in ginger by modulating the water relationship. *Environmental Science: Nano*, 11(3), 1259-1270. <https://doi.org/10.1039/D3EN00903C>

Effects of Drought Stress on Morphophysiological and Biochemical Characteristics of *Thymus vulgaris* L.

Afsoun Kamyab¹, Davood Samsampour^{1*}, Navid Ahmadi nasab², Abdonnabi Bagheri³

¹Department of Horticultural Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

² Hormozgan studies and research center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

³ Department of Plant Protection Research, Hormozgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bandar Abbas, Iran

(Received: 2024/07/27, Accepted: 2024/08/27)

Abstract

Thymus vulgaris L. is an aromatic plant belonging to the Lamiaceae family, known for its valuable medicinal and nutritional properties. Drought stress, as one of the most significant abiotic stresses, can have adverse effects on the growth and performance of medicinal plants. To investigate the effect of drought stress on some morphological, physiological, and biochemical traits of thyme, an experiment was conducted in a completely randomized design with four levels of drought stress (100%, 75%, 50%, and 25% of field capacity) with three replications in 2021 in the greenhouse of Hormozgan University. The results showed that drought stress (25% of field capacity) significantly reduced leaf length (64%), leaf width (33%), plant height (51.13%), root length (49.4%), fresh weight of aerial parts (4.04%) and dry weight of aerial parts (7.5%), dry weight of roots (9.7%), relative water content (54.23%), chlorophyll a (31.45%), chlorophyll b (31.29%), total chlorophyll (31.38%), and carotenoids (22.35%). The highest levels of electrolyte leakage (34.56%), proline (53.12%), catalase (68.47%), polyphenol oxidase (51.52%), malondialdehyde (55.84%), flavonoids (59.23%), and anthocyanins (61.29%) were observed in the 25% field capacity drought stress treatment. The medicinal plant thyme responds to drought stress by employing various defense mechanisms. These mechanisms include reducing certain morphological characteristics to conserve energy, rapidly accumulating osmotic regulatory organic compounds to maintain cellular water balance, and increasing antioxidant enzyme activities to combat oxidative stress. Through these responses, thyme can continue to grow and absorb the necessary nutrients with higher efficiency. The primary objective of this research was to evaluate the drought tolerance of thyme and determine the most suitable conditions (75% and 50% of field capacity) for cultivating this plant in Hormozgan Province. Given that thyme is not widely cultivated in this region, examining the plant's response to drought stress could provide valuable information for expanding its cultivation in similar areas.

Keywords: Antioxidant enzymes, Biochemical parameters, Drought stress, *Thymus vulgaris*

Corresponding author, Email: samsampoor@hormozgan.ac.ir