گل و گیاهان زینتی (۱۴۰۳)، ۹(۲): ۳۳۷- ۳۵۸
مقاله پژوهشی

واکنش‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی چهار رقم اطلسی تحت سطوح مختلف تنش کم‌آبی

لیلا چهل‌تنان، علی تهرانی‌فر*، محمود شور، حسین نعمتی، سعید خسروی

۱. گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
tehranifar@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۶

چکیده

این پژوهش به بررسی اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی چهار رقم اطلسی (*Petunia* sp.): ۱. اطلسی ایرانی (P1)،۲. اطلسی دورگه Supercascade White (P2)، ۳. اطلسی دورگه Grandiflora Frost Blue (P3) و ۴. اطلسی دورگه Grandiflora Crimson Star (P4) تحت سطوح مختلف کم‌آبی (۹۰٪، ۶۰٪ و ۳۰٪ ظرفیت زراعی) پرداخت. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. نتایج نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری وزن تر و خشک ساقه و ریشه را کاهش داد. بیشترین کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه در ارقام P4 و P3 مشاهده شد. در شرایط تنش شدید ارتفاع ساقه در ارقام P1 و P2 به ترتیب ۴۰/۴ و ۴۳/۳٪ کاهش یافت. همچنین تعداد شاخه‌های جانبی در رقم P1 و P3 تا تنش متوسط افزایش یافت (۲۴/۴ و ۴۲/۹٪)، اما در تنش شدید به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. همچنین تنش کم‌آبی به‌طور معنی‌دار قطر ریشه رقم P3 را کاهش داد (۴۸٪). تنش آبی شدید باعث کاهش قطر گل و تعداد گل در هر چهار رقم شد، به‌طوری‌که بیشترین کاهش قطر گل (۲۲/۹۷٪) در رقم P4 و بیشترین کاهش تعداد گل (۷۲/۳٪) در رقم P1 مشاهده شد. نشت الکترولیت در شرایط تنش شدید افزایش یافت و رقم P4 بیشترین نشت الکترولیت (۳۶/۱٪) را نشان داد. محتوای نسبی آب برگ در شرایط خشکی کاهش یافت و رقم P4 بیشترین کاهش (۲۴/۴٪) را در این ویژگی داشت. محتوای پرولین در رقم P1 بیشترین مقدار (۲/۲۴ میکرومول بر گرم وزن تر) را در شرایط تنش شدید نشان داد. غلظت کربوهیدرات کل در ارقام P1 و P2 تحت تنش شدید افزایش (به ترتیب ۲۱/۶ و ۱۹/۵٪) یافت. محتوای سبزینه a و b در شرایط کم‌آبی کاهش یافت و رقم P4 کمترین مقدار سبزینه b (۰/۵۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ) را در شرایط تنش شدید نشان داد. فعالیت آنزیم SOD در ارقام P1، P2 و P3 تحت تنش متوسط افزایش یافت (به ترتیب ۳۴/۴۵، ۵۲/۵ و ۲۴/۹٪)، اما در تنش شدید تغییرات معنی‌داری نداشت. فعالیت CAT در رقم P1 افزایش (۲۹/۵٪) یافت، در حالی که در سه رقم دیگر کاهش یافت. فعالیت POD در رقم P1 در شرایط بدون تنش بالاترین مقدار (۵/۶۵ واحد بر گرم وزن تازه) را داشت و تحت تنش خشکی نیز افزایش (۹/۶٪) یافت. همبستگی‌های پیرسون نشان داد که محتوای پرولین و کربوهیدرات کل با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همبستگی مثبت دارند و سبزینه a و b ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند. به‌طورکلی رقم P1 با بالاترین تحمل به کم‌آبی شناخته شد و ارقام P2 و P4 به‌ترتیب در رده‌های بعدی از نظر تحمل به خشکی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، ویژگی‌های رشدی، رنگدانه‌های نورساختی، کربوهیدرات.

مقدمه

اطلسی[1] یکی از گونه‌های مهم و محبوب گل‌های فصلی است که از تیره سیب‌زمینی سانان[2] می باشد و بومی مناطق آمریکای جنوبی از جمله مکزیک و آرژانتین است. این گیاه یک‌ساله، به‌ویژه برای کشت در فضاهای سبز و باغ‌ها در طول فصل تابستان مناسب است و به دلیل ویژگی‌های متنوع خود، از جمله شکل‌های مختلف گل، اندازه‌های گوناگون، و رنگ‌های متنوع، در بین گل‌های فصلی محبوبیت زیادی دارد (Tan *et al*., 2024; Rezaei *et al*., 2023; Goldani *et al*., 2021). علاوه بر این، اطلسی به دلیل داشتن دوره طولانی گلدهی و ظرفیت بالای خود در تولید گل‌های زیبا و با دوام، به‌طور گسترده در باغ‌ها و فضاهای سبز شهری کشت می‌شود و به‌عنوان یکی از گیاهان شاخص فصلی در نظر گرفته می‌شود (Tafaghodi *et al*., 2018). با این وجود، این گیاه نسبت به کمبود آب حساس است و نیازمند مدیریت دقیق منابع آبی برای حفظ سلامت و زیبایی خود می‌باشد (Tan *et al*., 2024).

کمبود آب، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تولید محصولات کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Goldani *et al*., 2021). کمبود آب یکی از عوامل کلیدی محدودکننده رشد گیاهان است که تأثیرات عمیق و گسترده‌ای بر جنبه‌های مختلف مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان دارد (Franco, 2006). تنش آبی می‌تواند باعث تغییرات قابل توجهی در ساختار و عملکرد گیاهان شود و واکنش‌های گیاهان به این نوع تنش، به شدت آن وابسته است(Alvarez *et al*. 2009). تنش کم‌آبی به‌ویژه در زمینه فضای سبز شهری و باغداری اهمیت دارد، زیرا کمبود آب می‌تواند به‌طور جدی بر رشد رویشی و زایشی گیاهان تأثیر بگذارد و کیفیت نهایی محصولات را تحت تأثیر قرار دهد. در شرایط کم‌آبی، گیاهان به‌طور طبیعی به تغییرات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی پاسخ می‌دهند. این تغییرات شامل کاهش سرعت رشد، تغییر در ساختار یاخته ای و تغییرات در فرآیندهای متابولیکی گیاه است که به‌منظور مقابله با شرایط کم‌آبی انجام می‌شود (Tafaghodi *et al*., 2018).

پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که گیاهان برای رویارویی با تنش‌های آبی از مجموعه‌ای از مکانیسم‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک استفاده می‌کنند (Shams *et al*., 2015; Goldani *et al*., 2021; Tran *et al*., 2024)، این مکانیسم‌ها شامل کاهش فعالیت روزنه‌ها برای کاهش تبخیر، تولید ترکیبات اسمزی مانند پرولین برای حفظ تعادل آب یاخته ای و تنظیم تعادل هورمون‌های گیاهی به‌منظور تنظیم رشد و توسعه است (Álvarez *et al*., 2009; Goldani *et al*., 2021). علاوه بر این، فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان نقش مهمی در مقابله با اثرات مخرب اکسیژن‌های فعال دارند که در شرایط تنش آبی به‌طور گسترده‌ای تولید می‌شود. این فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر سوپراکسید دیسموتاز[3] (SOD)، کاتالاز[4] (CAT) و پراکسیداز[5] (POD) هستند که به‌طور فعال به حذف اکسیژن‌های فعال و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو کمک می‌کنند (Tafaghodi *et al*., 2018).

تحمل به کم‌آبی، یکی از ویژگی‌های اساسی در بسیاری از گونه‌های گیاهی است، هرچند که میزان آن به طور قابل توجهی بین گونه‌ها متفاوت است. این تفاوت‌ها می‌تواند به پژوهشگران کمک کند تا گیاهانی با ویژگی‌های بهینه برای مقابله با شرایط کم‌آبی را شناسایی و انتخاب کنند (Gholami *et al*., 2012). گیاهان با استفاده از مکانیسم‌های مختلفی نظیر کاهش سرعت رشد یا تحریک گلدهی زودرس به تنش کم‌آبی پاسخ می‌دهند (Toscano *et al*., 2019; Chirivi & Betti, 2023). کنترل تغییر از مرحله رشد رویشی به مرحله رشد زایشی برای بقا در شرایط تنش باید مد نظر قرار گیرد (Takeno, 2016). برخی از مطالعات نشان داده‌اند که قرارگیری زودهنگام در معرض تنش‌های نازیوای ملایم می‌تواند توانایی گیاهان را برای عادت

۱- *Petunia* sp.   ۲- Solanaceae   ۳- Superoxide dismutase   ۴- Catalase   ۵- Peroxidase

کردن به تجربه همان تنش افزایش دهد (Sánchez-Blanco *et al*., 2009; Tran *et al*., 2024). این پاسخ‌ها بـه گیاهـان کمـک می‌کنند تا در شرایط محیطی دشوار به حیات خود ادامه دهند و به‌طور مؤثری بـا شـرایط نامسـاعد سـازگار شـوند (Franks, 2011; Sivakumar & Srividhya, 2016). گیاهان مقاوم به کم‌آبی که نیاز آبی کمی در فصل گرم دارند، باید ارزیابی شوند تـا نیازهای آبی دقیق آن‌ها مشخص گردد (Wang *et al*., 2021). اخیراً توجه بیشتری به گیاهان فصلی با نیاز آبی کم شده اسـت. بنابراین، شناسایی گیاهان مقاوم به کم‌آبی ضروری است (Rebi *et al*., 2024).

با این حال، تا به امروز اطلاعات دقیقی در مورد واکنش‌های بیوشیمیایی و تغییرات رشدی اطلسی تحت شرایط تنش آبـی در دسترس نبوده است. مطالعه حاضر، به‌عنوان یـک پـژوهش در ایـن زمینـه، بـه بررسـی ایـن جنبـه‌ها پرداختـه و ارتبـاط بـین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و تحمل به کم‌آبی در ارقام مختلف اطلسی را بررسـی می‌کنـد. هـدف ایـن پـژوهش، مقایسـه تغییرات فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ویژگی‌های مورفولوژیکی در چهار رقم مختلف اطلسی تحت سـه سـطح مختلـف تنش کم‌آبی به‌منظور انتخاب ارقام مقاوم به کم‌آبی و ارائه روش‌های مطمئن و اقتصادی برای کشت این گیاه در شرایط کم‌آبی است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به منظور بررسی تأثیر تنش کم‌آبی بر رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی چهار رقم اطلسـی در فصـل بهار و تابستان سال ۱۴۰۲ در گلخانه پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. شرایط محیطی گلخانه شامل میـانگین دمـای روزانه ۲±۲۵ و شبانه ۲±۱۶ درجه سلسیوس و میانگین رطوبت نسبی هوا ۶۵٪ بود. آزمایش به صـورت فاکتوریـل در قالـب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار برای هر تیمار که برای هر تکرار دو بوته در نظر گرفته شد، اجرا گردید.

برای این مطالعه، از چهار رقم مختلف اطلسی شامل: ۱. اطلسی ایرانی (P1)، ۲. اطلسـی دورگـه Supercascade White (P2)، ۳. اطلسی دورگه Grandiflora Frost Blue (P3) و ۴. اطلسی دورگه Grandiflora Crimson Star (P4) استفاده شـد (شـکل ۱) و سه سطح مختلف آبیاری شامل بدون تنش (۹۰٪ ظرفیت زراعی)، تنش متوسـط (۶۰٪ ظرفیـت زراعـی) و تـنش شـدید (۳۰٪ ظرفیت زراعی) به گیاهان اعمال گردید. بذرها از شرکت سبز رویش تأمین و در سینی‌های کشـت حـاوی مخلـوطی از پرلیت، کوکوپیت و پیت ماس (به نسبت حجمی ۲:۲:۱) کشت شدند. پس از مرحلـه جوانـه‌زنی و رسـیدن بـه مرحلـه چهـار برگی، گیاهچه‌ها به گلدان‌های ۲ لیتری منتقل شدند. این گلدان‌ها حاوی مخلوطی از خـاک بـرگ، ماسـه و خـاک لـومی (بـه نسبت حجمی ۱:۱:۱) بودند که ویژگی‌های فیزیکـی و شـیمیایی آن در جـدول ۱ آمـده اسـت و بـرای ایجـاد زه‌آب در کـف گلدان‌ها سنگ‌ریزه‌های کوچک قرار داده شد.

P1 P2 P3 P4

شکل ۱- ارقام اطلسی مورد مطالعه در پژوهش.

Figure 1- The Petunia cultivars studied in the research.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده.

Table 1–Physical and chemical properties of the used soil.

شن درصد	رس درصد	سیلت درصد	ماده آلی درصد	نیتروژن درصد	پتاسیم میلی گرم بر کیلوگرم	فسفر میلی گرم بر کیلوگرم	مس میلی گرم بر کیلوگرم	منگنز میلی گرم بر کیلوگرم	روی میلی گرم بر کیلوگرم	هدایت الکتریکی دسی‌زیمنس بر متر	پی اچ
Sand %	Clay %	Silt %	Organic Matter %	N %	K Mg/Kg	P Mg/Kg	Cu Mg/Kg	Mn Mg/Kg	Zn Mg/Kg	EC ds/m	pH
47	23.5	25	2.4	0.11	126	20.77	1.47	8.76	0.24	1.11	7.6

در طول دوره آزمایش، از اول فروردین تا اول خرداد، گیاهچه‌ها به صورت روزانه با آب لوله‌کشی تا ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی[۱] آبیاری شدند. ظرفیت زراعی خاک بر اساس روش توصیف شده توسط Campbell & Mulla (1990) تعیین شد به این صورت که برای اندازه‌گیری ظرفیت زراعی، گلدان‌ها ابتدا کاملاً آبیاری و با پلاستیک پوشانده شدند تا تبخیر متوقف شود. پس از ثابت شدن وزن، نمونه‌های خاک با استفاده از استوانه فلزی گرفته شد و وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. بعد از خشک شدن در آون با دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۲۴ ساعت، وزن خشک ثبت گردید. درصد رطوبت وزنی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد و تیمارها با توزین روزانه گلدان‌ها و افزودن آب مصرفی تنظیم شدند (رابطه ۱):

رابطه (۱) ظرفیت زراعی٪ = $(A-B/B)\times 100$

که در آن، ظرفیت زراعی برابر با میزان رطوبت وزنی برای وضعیت زراعی، A وزن خاک مرطوب پس از خروج آب ثقلی و B وزن خاک خشک شده است. پس از این مرحله، سه سطح مختلف آبیاری اعمال گردید. برای حفظ دقت در تیمارهای آبی، توزین روزانه گلدان‌ها انجام شد و آب از دست رفته به وسیله ترازوی دقیق جایگزین گردید. این تنش به مدت ۹۰ روز ادامه یافت تا اثرات مختلف آن بر روی گیاهان به طور کامل مورد ارزیابی قرار گیرد.

۱- FC

پس از اتمام دوره تنش، شاخص‌های مختلف زیر اندازه‌گیری شدند:

وزن تازه و خشک ریشه و شاخساره: شاخساره (ساقه، برگ و گل) و ریشه به طور جداگانه توزین و سپس در دمای ۶۵-۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شدند تا وزن خشک آن‌ها مشخص گردد.

طول ساقه: طول ساقه از سطح خاک تا بالاترین قسمت گیاه با استفاده از خط کش اندازه‌گیری شد و بر حسب سانتی‌متر گزارش گردید.

قطر ساقه: قطر ساقه با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و بر حسب میلی‌متر بیان شد.

تعداد انشعاب جانبی: تعداد شاخه‌های جانبی در پایان آزمایش به دقت شمارش شد.

قطر و تعداد گل: برای اندازه‌گیری قطر گل، پنج گل کاملاً باز شده در هر تکرار به طور تصادفی انتخاب و قطر آن‌ها از یک طرف گلبرگ گل به طرف مقابل آن با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. همچنین، تعداد گل‌ها برای هر تکرار شمارش گردید.

نشت الکترولیت: نشت الکترولیت برگ با استفاده از روش توصیف شده توسط Blum & Ebercon (1981) اندازه‌گیری شد. برای این منظور، شش دیسک با قطر ۱ سانتی‌متر از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته جدا شد و دو بار با آب مقطر و یک بار با آب دیونیزه شستشو داده شد. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه به دیسک‌های برگ اضافه شد و به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند. ابتدا هدایت الکتریکی Lt_1 نمونه‌ها با استفاده از یک هدایت الکتریکی سنج دیجیتال اندازه‌گیری شد. سپس، نمونه‌ها در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت اتوکلاو شدند و پس از خنک شدن، هدایت الکتریکی Lt_2 نمونه‌ها مجددا اندازه‌گیری شد. نشت الکترولیت[1] با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (رابطه۲):

$$EC\% = (Lt_1/Lt_2 \times 100)$$ رابطه (۲)

محتوای نسبی آب: محتوای نسبی آب برگ با استفاده از روش توصیف شده توسط Cherki *et al.*, (2002) محاسبه گردید. پنج دیسک یکنواخت از برگ‌های جوان کاملا توسعه‌یافته جدا شد و محتوای نسبی آب با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (رابطه۳):

$$RWC = \left[\frac{(FW - DW)}{(TW - DW)}\right] \times 100$$ رابطه (۳)

که در آن، RWC محتوای نسبی آب، FW وزن تازه دیسک‌های برگ، DW وزن خشک دیسک‌های برگ پس از خشک شدن در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت و TW وزن تورژسانس دیسک‌ها پس از خیساندن آن‌ها به مدت ۴ ساعت در تاریکی به‌دست می‌آید.

محتوای کربوهیدرات کل: برای تعیین محتوای کربوهیدرات کل ، ۰/۱ گرم برگ با ۲۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰٪ مخلوط و به مدت چند ثانیه به هم زده شد. پس از سانتریفیوژ کردن در سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه، مایع رویی جدا شده از کاغذ صافی عبور داده شد. سپس حجم عصاره با آب مقطر به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. یک میلی‌لیتر از مایع رویی به ۱۰ میلی‌لیتر محلول

۱- EC

آنترون (۰/۱۵٪) اضافه گردید و سپس به مدت هشت دقیقه در حمام بخار با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از انتقال به حمام یخ و رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای اتاق، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر به کمک اسپکتروفتومتر قرائت شد. نتایج به‌صورت میلی‌گرم بر گرم وزن خشک گزارش شد (McCready *et al.* 1950).

محتوای پرولین: پرولین از نمونه‌های ۰/۵ گرمی برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته با ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۳٪ استخراج شد و بر اساس پروتکل توصیف‌شده توسط Bates *et al.* (1973) با استفاده از معرف نان‌هیدرین، تخمین زده شد. میزان جذب بخش همراه با تولوئن در طول موج ۵۲۰ نانومتر به کمک اسپکتروفتومتر قرائت شد. غلظت پرولین با استفاده از یک منحنی کالیبراسیون محاسبه و به‌صورت میکرومول بر گرم وزن تر بیان گردید.

تعیین سبزینه: محتوای سبزینه a و b بر اساس روش توصیف‌شده توسط Lichtenthaler (1987) اندازه‌گیری شد. ابتدا چهار میلی‌لیتر استون ۸۰٪ به ۰/۱ گرم برگ تازه که سابیده شده بود، اضافه گردید. پس از سانتریفیوژ کردن به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج‌های ۶۴۷ نانومتر و ۶۶۴ نانومتر خوانده شد. نتیجه به‌صورت میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ بیان شد و با استفاده از معادلات زیر محاسبه گردید (روابط ۴ و ۵).

$$\text{کلروفیل } a = \frac{12.25(A_{664}) - 2.79(A_{647}) \times \text{حجم محلول}}{\text{وزن نمونه}}$$

رابطه (۴)

$$\text{کلروفیل } b = \frac{21.21(A_{647}) - 5.10(A_{664}) \times \text{حجم محلول}}{\text{وزن نمونه}}$$

رابطه (۵)

که در آن A_λ جذب در طول موج λ (نانومتر) است.

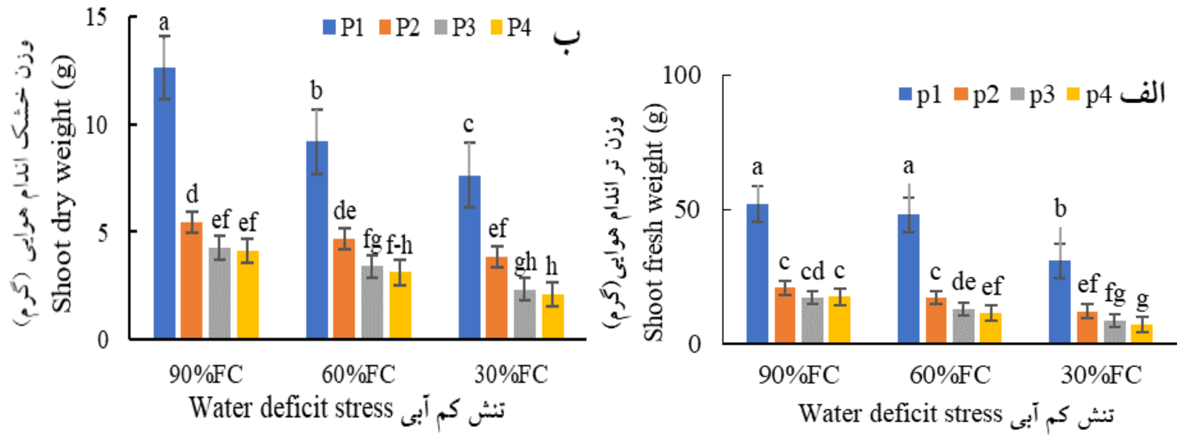
فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی: ۰/۵ گرم بافت برگ با یک میلی‌لیتر بافر استخراج مخلوط شد و سپس به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سلسیوس سانتریفیوژ شد. مایع فوقانی برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی استفاده شد. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم CAT، بافر فسفات حاوی دی‌پتاسیم فسفات، مونوپتاسیم فسفات و پراکسید هیدروژن به عصاره آنزیمی اضافه گردید و میزان جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر خوانده شد. نتایج به‌صورت واحد بر گرم وزن تازه[1] بیان شد (Abie, 1984). فعالیت آنزیم POD با استفاده از روش توضیح داده شده توسط Teisseire & Guy (2000) اندازه‌گیری و به‌صورت واحد بر گرم وزن تازه بیان شد. فعالیت آنزیم SOD بر اساس روش Gyanopelitis & Rice (1977) اندازه‌گیری شد. فعالیت این آنزیم بر اساس توانایی آن در جلوگیری از کاهش فتوشیمیایی تترازولیوم نیتروبلاو تعیین شد و میزان جذب در طول موج ۵۶۰ نانومتر با اسپکتروفوتومتر ثبت گردید. فعالیت SOD به‌صورت واحد بر میلی‌گرم پروتئین[2] بیان شد.

تحلیل آماری: برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) استفاده شد و تفاوت‌های آماری با استفاده از آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار[3] در سطح معنی‌داری ۵٪ مقایسه گردید.

نتایج و بحث

۱- Unit/g FW   ۲- Unit/mg of protein   ۳- LSD

وزن تر و خشک اندام‌های هوایی: تنش کم‌آبی در تمام سطوح باعث کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک ساقه در تمامی ارقام گردید (شکل ۲ الف و ب). بیشترین کاهش وزن تر اندام‌های هوایی در ارقام P4 و P3 تحت شرایط تنش کم‌آبی شدید مشاهده شد. رقم P1 توانست بالاترین وزن تر اندام هوایی را در شرایط تنش آبی ثبت کند. همچنین، وزن خشک اندام‌های هوایی به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار گرفت و رقم P1 بالاترین وزن خشک را نسبت به سایر ارقام داشت. این یافته‌ها با نتایج مطالعات قبلی که تأثیرات منفی کمبود آب بر شاخص‌های رشدی مانند طول ساقه و وزن تر و خشک را گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد (Riaz et al. 2013). همچنین، بر اساس پژوهش‌های پیشین، تنش کم‌آبی موجب کاهش فرآیند نورساخت می‌شود که به نوبه خود منجر به کاهش وزن تازه و خشک گیاهان می‌گردد (Hatamifar & Babadaei Samani, 2017; Kour *et al.* 2020)، نتایج این پژوهش نیز کاهش زیست‌توده گیاهی تحت شرایط کم‌آبی را تأیید می‌کند که با یافته‌های پیشین ، همراستا است. علاوه بر این، همبستگی مثبت میان محتوای آب تعرق و وزن خشک نشان می‌دهد که کاهش آب موجود در گیاه به کاهش وزن خشک منجر می‌شود (Riaz *et al.* 2013). بررسی‌های پیشین نیز تأثیرات منفی تنش کم‌آبی بر تولید زیست‌توده در گونه‌های مختلفی از جمله زلف عروس[۱] (Liu & Stützel, 2004)، اطلسی دورگه mix (Shamshiri *et al.* 2011)، فلفل دلمه‌ای[۲] (Khosravi & Haghighi, 2021)، گل همیشه بهار[۳] (Ebrahimi *et al.* 2017) و گل شب‌بو[۴] (Jafari *et al.* 2019) را تأیید کرده‌اند.



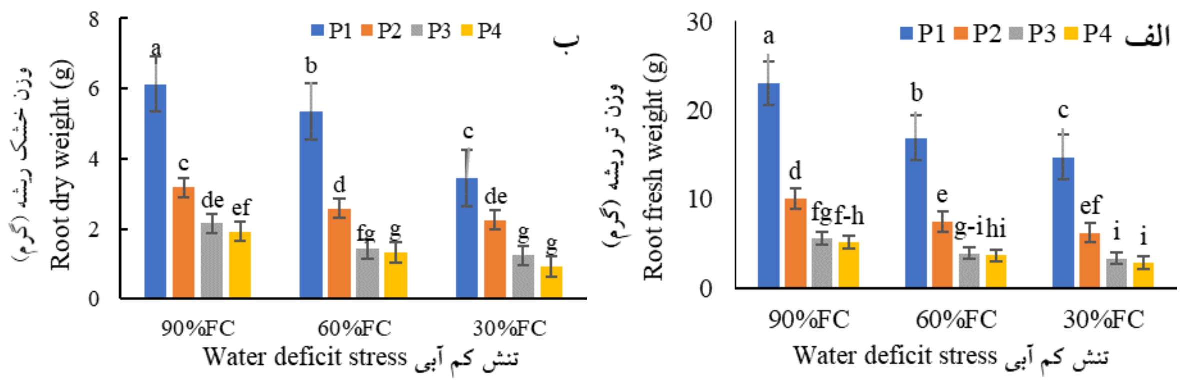
شکل ۲- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر وزن تر اندام هوایی (الف) و وزن خشک اندام هوایی (ب) ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 2- Effect of different levels of water deficit stress on fresh weight of aerial parts (A) and dry weight of aerial parts (B) in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

وزن تر و خشک ریشه: تنش شدید کم‌آبی (۳۰٪ ظرفیت زراعی) باعث کاهش قابل توجه وزن تر ریشه در مقایسه با شرایط تنش‌های متوسط و بدون تنش شد (شکل ۳ الف). ارقام P4 و P3 بیشترین کاهش وزن تر ریشه را در تمامی شرایط تنش

۱- *Amaranthus* spp. ۲- *Capsicum annuum* L. ۳- *Calendula officinalis* L. ۴- *Matthiola incana* L.

نشان دادند، در حالی که رقم P1 کمترین کاهش وزن تر ریشه را نشان داد. کاهش وزن خشک ریشه در ارقام P1 ، P2، P3 و P4 نیز به ترتیب ۴۳/۷۱، ۲۹/۲۴، ۴۱/۸۶ و ۵۱/۸۱٪ در شرایط تنش شدید گزارش شد (شکل ۳ ب). در شرایط تنش آبی، فرآیندهای انتقال و تخصیص ماده خشک به ریشه و توزیع زیست‌توده به ریشه‌ها نقش بسیار مهمی در رشد و تولید گیاه دارند (Riaz *et al.* 2013). افزایش رشد ریشه در شرایط کم‌آبی می‌تواند به بهبود تحمل گیاهان به کم‌آبی کمک کند (Chaves & Oliveira, 2004). بر اساس این یافته‌ها، رقم P1 که دارای قابلیت بالاتری در حفظ وزن خشک ریشه بود، احتمالاً بیشترین تحمل به کم‌آبی را در میان ارقام مورد بررسی دارد. این نتیجه با کاهش وزن خشک ریشه تحت تنش کم‌آبی که در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است، هم‌خوانی دارد (Hatamifar & Babadaei Samani, 2017). همچنین، بیشتر بودن وزن تازه و خشک ریشه در رقم P1 (شکل۳ الف و ب)، که به دلیل ارتفاع بیشتر ساقه و وزن بیشتر اندام هوایی (شکل ۴ الف)، در نتیجه تولید زیست‌توده سبز بیشتر این رقم مشاهده شد، بر قابلیت بهتر این رقم در مدیریت تنش‌های آبی تأکید می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که رقم P1 ممکن است راهبردهای مؤثری در سازگاری با شرایط کم‌آبی داشته باشد که به بهبود رشد و تولید آن در محیط‌های کم‌آب کمک می‌کند.



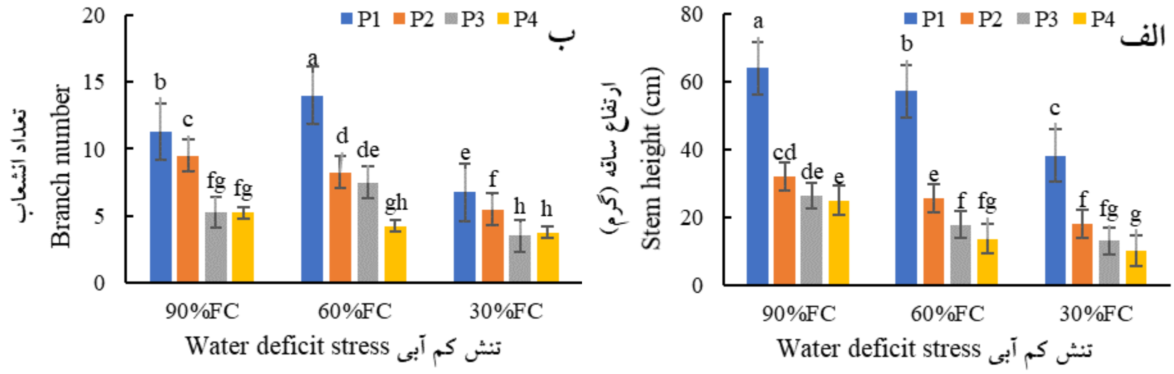
شکل ۳- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر وزن تر ریشه (الف) و وزن خشک ریشه (ب) ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 3- Effect of different levels of water deficit stress on fresh weight of root (A) and dry weight of root(B) in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

ارتفاع ساقه و تعداد شاخه‌های جانبی: ارتفاع ساقه در ارقام P1 و P2 تحت تنش‌های متوسط و شدید کاهش معنی‌داری داشت، در حالی که ارقام P3 و P4 تغییرات معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۴ الف). درصد کاهش ارتفاع ساقه در پایان دوره آزمایش برای ارقام P1، P2، P3 و P4 به ترتیب ۴۰، ۴۳، ۵۰/۴۵ و ۵۹/۰۳٪ بود. کاهش ارتفاع ساقه در ارقام اطلسی تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی به طور عمده به کاهش تورم یاخته ای و جلوگیری از گسترش یاخته ای نسبت داده می‌شود. این پدیده به دلیل کاهش میزان آب موجود در گیاه و اثرات آن بر فرآیندهای یاخته ای و متابولیکی گیاهان بروز می‌کند (Rebi *et al.* 2024). کمبود آب منجر به کاهش فشار تورم یاخته ای می‌شود، که به نوبه خود رشد یاخته ای را محدود کرده و در نهایت به کاهش ارتفاع ساقه منجر می‌شود. پژوهش های قبلی نیز نشان داده‌اند که تنش کم‌آبی می‌تواند تأثیرات مشابهی بر

ارتفاع ساقه در گیاهان مختلف داشته باشد. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای روی گیاه بامیه[1]، کاهش قابل توجهی در ارتفاع ساقه تحت تنش کم‌آبی گزارش شده است (Manivannan *et al.* 2007). همچنین، پژوهش‌ها بر روی اطلسی (Shamshiri *et al.* 2011)، گل رز[2] (Dolatkhahi *et al.* 2020) و گل آفتابگردان[3] (Ahmad *et al.* 2009)، نشان داده‌اند که تنش کم‌آبی می‌تواند به کاهش ارتفاع ساقه در این گیاهان منجر شود.

تعداد شاخه‌های جانبی تحت تأثیر تنش کم‌آبی به طور قابل توجهی تغییر کرد، به‌طوری‌که تعداد شاخه در ارقام P1 و P3 در تنش متوسط افزایش یافت اما در تنش شدید کاهش یافت (شکل ۴ ب). در حالی که در ارقام P2 و P4، تعداد شاخه‌های جانبی با افزایش تنش کم‌آبی کاهش معنی‌داری داشت. علاوه بر این، کاهش تعداد شاخه‌های جانبی در ارقام اطلسی تحت تنش آبی به افزایش عمر گیاه در این شرایط منجر شد که کاهش تعداد شاخه‌ها به عنوان یکی از استراتژی‌های بقا در شرایط کم‌آبی به کار می‌رود و نشان‌دهنده این است که گیاهان مکانیسم‌هایی را برای حفظ منابع آب و بقا در شرایط محدودیت آبی به کار می‌برند (Shams *et al.* 2015). به این ترتیب، گیاهان با کاهش تعداد شاخه‌ها و تمرکز منابع خود بر حفظ و افزایش عمر گیاه در شرایط کم‌آبی به مقابله با تنش آبی می‌پردازند (Aliabadi *et al.* 2009).



شکل ۴- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر ارتفاع ساقه (الف) و تعداد انشعاب (ب) ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

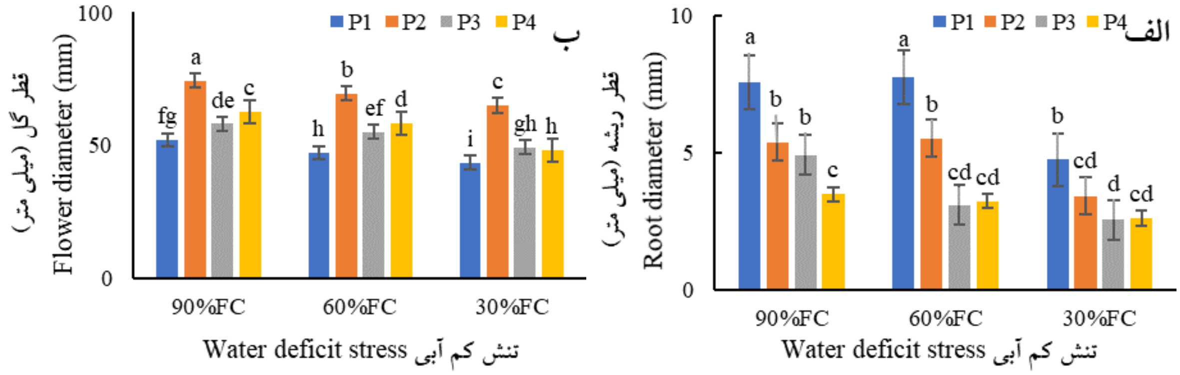
Figure 4- Effect of different levels of water deficit stress on stem height (A) and the number of branches (B) in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

قطر ریشه و گل: قطر ریشه در رقم P3 به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار گرفت، در حالی که تغییرات معنی‌داری در قطر ریشه رقم P4 مشاهده نشد (شکل ۵ الف). در پژوهش حاضر، کوتاه‌ترین طول ساقه در رقم P4 مشاهده شد که ممکن است به دلیل کاهش میزان آب در ناحیه فعال ریشه باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تنش آبی به طور معمول باعث کاهش رشد در صفات ریشه‌ای نظیر طول ریشه، تراکم ریشه و قطر ریشه می‌شود (Riaz *et al.* 2013). این کاهش به دلیل محدودیت در جذب آب و مواد مغذی ضروری برای رشد ریشه‌ها اتفاق می‌افتد. یک سیستم ریشه‌ای کارآمد که توانایی

۱- *Abelmoschus esculentus* L. ۲- *Rosa hybrida* ۳- *Helianthus annuus* L.

گیاهان را برای دستیابی به منابع آب بهبود می‌بخشد، می‌تواند به عنوان یک مکانیسم کلیدی برای سازگاری با شرایط کم‌آبی عمل کند (Riaz *et al.* 2013).

قطر گل تحت تأثیر تنش کم‌آبی شدید کاهش یافت و کاهش قطر گل به ترتیب ۱۶/۴۰، ۱۲/۴۸، ۱۵/۰۳ و ۲۲/۹۷درصد در ارقام P1، P2، P3 و P4 در شرایط تنش شدید ثبت شد (شکل ۵ ب). اندازه گل، به‌ویژه قطر آن، یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی کیفیت گیاهان زینتی کشت شده در فضای سبز است. در این پژوهش، رقم P1 با وجود داشتن بیشترین تعداد گل، کمترین قطر گل را داشت. این مشاهده با نتایج پژوهش های پیشین که نشان داده‌اند کمبود آب در طول دوره گلدهی می‌تواند به طور قابل توجهی بر قطر گل و دیگر شاخص‌های کیفیت گل تأثیر بگذارد، همخوانی دارد (Rebi *et al.* 2024). کاهش قطر گل به دلیل کمبود آب، می‌تواند به کاهش کیفیت و ارزش زینتی گیاهان منجر شود و نیاز به مدیریت دقیق منابع آب در دوره‌های رشد و گلدهی را تأکید کند.



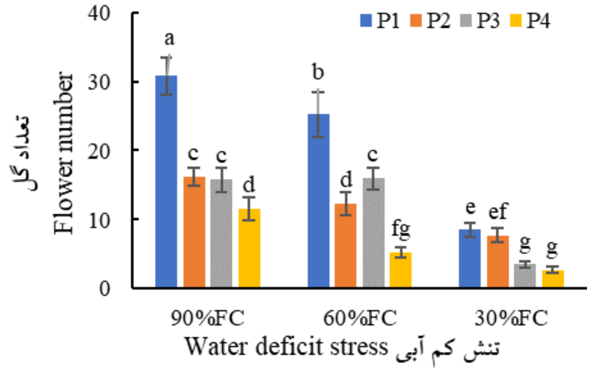
شکل ۵- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر قطر ریشه (الف) و قطر گل (ب) ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 5- Effect of different levels of water deficit stress on root diameter (A) and flower diameter (B) in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

تعداد گل‌ها: بررسی‌ها نشان داد که تعداد گل‌ها تحت تنش کم‌آبی تغییرات قابل توجهی داشته است. رقم P1 در شرایط بدون تنش، بیشترین تعداد گل (۳۰/۷۵) را تولید کرد (شکل ۶). در شرایط تنش کم‌آبی شدید، تمامی ارقام به‌طور قابل توجهی کاهش تعداد گل را تجربه کردند و فقط رقم P2 در تنش آبی متوسط تفاوت معنی‌داری با حالت بدون تنش نداشت.

پژوهش حاضر به وضوح نشان داد که تیمار ۳۰٪ ظرفیت زراعی منجر به کاهش چشمگیر در عملکرد تعداد گل‌ها شد. این کاهش قابل توجه به طور مستقیم به کاهش سطح آب نسبت داده می‌شود، به طوری که با کاهش میزان آب موجود، تعداد گل‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. این یافته‌ها تایید می‌کنند که آب نقش حیاتی در فرآیند گلدهی ایفا می‌کند و کمبود آن می‌تواند به طور مستقیم بر روی تعداد گل‌ها تأثیر بگذارد. علاوه بر این، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که تنش متوسط آبی به‌طور مثبت بر تعداد گل‌ها در رقم P3 تأثیر گذاشت. این تأثیر مثبت به نظر می‌رسد که از طریق کاهش رشد رویشی و در نتیجه افزایش تمرکز گیاه بر فرآیند گلدهی حاصل شده است. این مشاهده با یافته‌های پژوهش های پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند تنش آبی متوسط می‌تواند به بهبود کیفیت گلدهی و افزایش تعداد گل‌ها منجر شود (A´

lvarez *et al.* 2009). به نظر می‌رسد که در شرایط تنش متوسط، گیاهان قادر به تنظیم بهینه منابع خود و تمرکز بیشتر بر تولید گل به منظور بقا خود هستند. تاثیر کمبود آب بر کاهش تعداد اطلسی ایرانی به دلیل کاهش رسانایی روزنه‌ای و به تبع آن کاهش سرعت نورساخت خالص در شرایط تنش آبی مشاهده شده است که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد (Goldani *et al.* 2021).



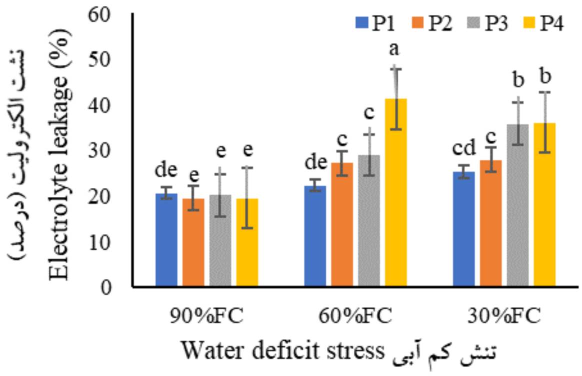
شکل ۶- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر تعداد گل ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 6- Effect of different levels of water deficit stress on number of flowers in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

نشت الکترولیت: آزمون نشت الکترولیت به‌منظور بررسی اثرات تنش کم‌آبی بر تغییرات در غشاءهای یاخته ای و قابلیت حفظ یون‌ها در داخل یاخته‌ها به‌کار گرفته شد. نتایج این آزمایش نشان‌دهنده تفاوت‌های معنادار در میزان نشت الکترولیت در شرایط مختلف تنش کم‌آبی بود. در شرایط بدون تنش با آبیاری تا ۹۰٪ ظرفیت زراعی، میزان نشت الکترولیت در تمامی چهار رقم اطلسی مورد بررسی، مشابه بود که نشان‌دهنده عملکرد مناسب و حفظ غشاءهای یاخته ای در این شرایط بود (شکل ۷). با این حال، با افزایش شدت کم‌آبی و کاهش میزان آبیاری به ۶۰٪ ظرفیت زراعی، نشت الکترولیت به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. رقم P4 بیشترین میزان نشت الکترولیت را با مقدار ۴۱/۲۶٪ در این شرایط نشان داد، که نشان‌دهنده آسیب بیشتر به غشاءهای یاخته ای و کاهش کارایی آن‌ها در حفظ یون‌ها بود. بلعکس، نشت الکترولیت در رقم P1 تحت تأثیر تنش کم‌آبی تغییرات قابل توجهی نداشت، که ممکن است به ویژگی‌های خاص غشاءهای یاخته ای یا مکانیسم‌های حفاظتی در این رقم برگردد.

در زمینه پایداری غشاء یاخته ای، پژوهش نشان داد که میزان یکپارچگی و استحکام غشاء در دوره‌های خشکسالی با تحمل به تنش کم‌آبی ارتباط نزدیکی دارد (Pourghayoumi *et al.* 2017). به‌ویژه، کاهش نشت الکترولیت تحت تنش آبی به عنوان یک شاخص کلیدی برای ارزیابی تحمل گیاهان به کم‌آبی شناخته می‌شود (Bajji *et al.* 2002; Kocheva *et al.* 2004). نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که در شرایط تنش شدید کم‌آبی، میزان نشت الکترولیت، تخریب غشاء و تولید گونه‌های اکسیژن فعال به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است و رقم P4 بالاترین مقادیر را در این زمینه‌ها نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که رقم P4 به طور مشخص نسبت به سایر ارقام حساس‌تر به تنش آبی است. در نتیجه، برای کاهش آسیب به

غشاهای زیستی این رقم، نیاز است تا راهکارهایی از جمله تنظیم اسمزی و حفظ تورژسانس یاخته ای در نظر گرفته شوند (Oraee & Tehranifar, 2020). این اقدامات می‌توانند به بهبود تاب‌آوری گیاهان در برابر شرایط کم‌آبی کمک کنند و به حفظ سلامت غشاءهای یاخته ای در گیاهان تحت تنش آبی منجر شوند.



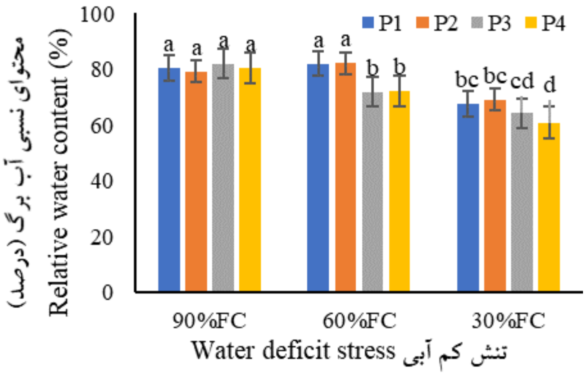
شکل ۷- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر نشت الکترولیت ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 7- Effect of different levels of water deficit stress on electrolyte leakage in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

محتوای نسبی آب برگ: محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی توانایی گیاه برای حفظ آب و مقاومت در برابر کم‌آبی مورد بررسی قرار گرفت. در شرایط بدون تنش، محتوای نسبی آب برگ در تمامی چهار رقم مشابه بود، که نشان‌دهنده وضعیت طبیعی رطوبت در گیاهان می‌باشد. با این حال، هنگامی‌که سطح تنش کم‌آبی به ۶۰٪ ظرفیت زراعی رسید، کاهش قابل توجهی در محتوای نسبی آب در ارقام P3 و P4 مشاهده شد (شکل ۸). این کاهش نشان‌دهنده افت شدید توانایی این ارقام در حفظ آب در شرایط کم‌آبی است. به‌طور خاص، تنش شدید کم‌آبی (۳۰٪ ظرفیت زراعی) منجر به کاهش‌های معنی‌داری در محتوای نسبی آب برگ به میزان‌های ۱۵/۷۸، ۱۲/۶۹، ۲۱/۷۲ و ۲۴/۳۷٪ در ارقام P1، P2، P3 و P4 شد. این کاهش‌ها به‌ویژه در ارقام P3 و P4 مشهود بود و نشان‌دهنده حساسیت بالاتر این ارقام به شرایط کم‌آبی است.

محتوای نسبی آب برگ، به‌عنوان یک معیار کلیدی در ارزیابی وضعیت آب و تحمل به کم‌آبی گیاهان، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (Tran *et al.*, 2024). در پژوهش حاضر، کاهش محتوای نسبی آب برگ در رقم P4 به‌وضوح مشاهده شد. این کاهش ممکن است به دلیل محدودیت‌های موجود در دسترسی به آب در خاک یا عدم کارایی کافی سیستم ریشه در جذب و نگهداری آب باشد (Jafari *et al.* 2019). کاهش محتوای آب برگ می‌تواند منجر به چندین تغییر فیزیولوژیکی در گیاهان شود، از جمله بسته شدن روزنه‌ها، افزایش دمای برگ و کاهش یکپارچگی غشای پلاسمایی، که این تغییرات به‌طور مستقیم ناشی از کاهش سطح آب در برگ‌ها هستند (Seleiman *et al.*, 2021). در شرایط کم‌آبی شدید، گیاهان به‌طور طبیعی شروع به بیوسنتز اسید آبسزیک و تجمع اسمولیت‌ها می‌کنند تا از پایداری ساختاری یاخته ای و تنظیم اسمزی محافظت کنند (Takahashi *et al.*, 2020). این مکانیسم‌های بیوشیمیایی به گیاهان کمک می‌کند تا در شرایط تنش آب به بقا و عملکرد خود ادامه دهند. با این حال، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که در رقم P4 که کمترین محتوای نسبی آب و بیشترین نشت الکترولیت

را در شرایط کم‌آبی شدید نشان داد (شکل ۸)، اسمولیت‌ها به سطوح کافی برای تنظیم اسمزی مؤثر تجمع نمی‌یابند (Tran *et al.*, 2024). این یافته‌ها به‌طور واضح نشان می‌دهند که رقم P4 نسبت به سایر ارقام در برابر تنش آبی حساس‌تر است و بنابراین به‌عنوان حساس‌ترین رقم در این پژوهش شناخته شده است.

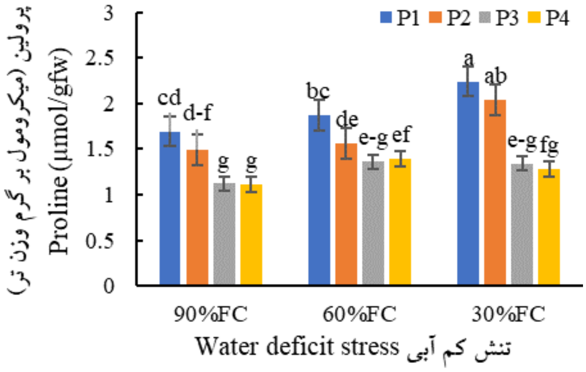


شکل ۸- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر محتوای نسبی آب برگ ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 8- Effect of different levels of water deficit stress on leaf relative water content in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

پرولین: محتوای پرولین به‌عنوان یک نشانگر بیوشیمیایی برای پاسخ به تنش کم‌آبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که علی‌رغم وجود یک الگوی افزایشی در محتوای پرولین در طول آزمایش، تغییرات معنی‌داری در مقادیر پرولین برای ارقام P3 و P4 در شرایط کم‌آبی مشاهده نشد (شکل ۹). این می‌تواند ناشی از حساسیت ارقام P3 و P4 نسبت به تنش کم‌آبی باشد که منجر به تغییرات اندک در سطح پرولین شده است. از سوی دیگر، رقم P1 با ثبت بیشترین مقدار پرولین معادل ۲/۲۴ میکرومول در گرم وزن تر در شرایط ۳۰٪ ظرفیت زراعی نشان داد که این رقم توانسته است در شرایط شدید کم‌آبی واکنش بیوشیمیایی قوی‌تری از خود نشان دهد. با این وجود، تفاوت معنی‌داری در مقادیر پرولین بین رقم P1 و P2 مشاهده نشد، که ممکن است به دلیل شباهت در پاسخ‌های بیوشیمیایی این دو رقم به تنش کم‌آبی باشد.

تجمع اسیدهای آمینه غیرپروتئینی مانند پرولین، در پاسخ به محدودیت‌های آبی، می‌تواند به تنظیم اسمزی درون یاخته ای و بهبود مقاومت به کم‌آبی کمک کند (Shams *et al.* 2015; Goldani *et al.* 2021). پرولین به‌عنوان یک نشانگر متداول برای تحمل به کم‌آبی شناخته می‌شود و بیشترین مقدار آن در رقم P1 مشاهده شد (شکل ۹)، که احتمالاً به دلیل توانایی بالای این رقم در تحمل و سازگاری با شرایط کم‌آبی است. تجمع بالای پرولین در گیاهان تحت تنش کم‌آبی به تنظیم اسمزی و جلوگیری از کم‌آبی یاخته ای کمک می‌کند (Yamada *et al.* 2005; Goldani *et al.* 2017). علاوه بر این، پرولین به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی نیز عمل می‌کند و می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در گیاهان تقویت کند (Giordano *et al.* 2021). این ویژگی‌ها موجب می‌شود که پرولین نقش مهمی در مدیریت تنش‌های محیطی و بهبود مقاومت گیاهان در برابر کم‌آبی ایفا کند.

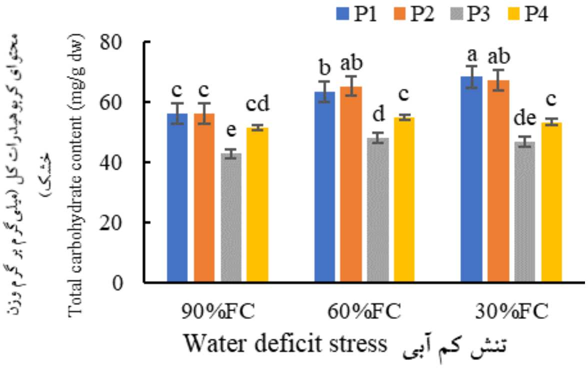


شکل ۹- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر پرولین ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 9- Effect of different levels of water deficit stress on Proline in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

محتوای کربوهیدرات کل: پژوهش های انجام شده روی ارقام اطلسی تحت شرایط کم‌آبی نشان‌دهنده عدم تغییر معنی‌دار در غلظت کربوهیدرات کل برای ارقام P3 و P4 است (شکل ۱۰). این مشاهده بیانگر توانایی بالای این ارقام در حفظ سطوح کربوهیدرات خود حتی در مواجهه با کم‌آبی است. این ویژگی می‌تواند به عنوان یک مکانیسم دفاعی مؤثر برای مقابله با کم‌آبی تلقی شود. در مقابل، ارقام P1 و P2 تحت شرایط تنش متوسط (۶۰٪ ظرفیت زراعی) به‌طور معنی‌داری توانستند میزان کربوهیدرات کل خود را افزایش دهند. این افزایش می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی سازگاری جهت تأمین انرژی لازم برای فرایندهای فیزیولوژیکی و مقابله با اثرات منفی کم‌آبی تعبیر شود. در شرایط تنش شدید کم‌آبی، رقم P1 به میزان ۶۸/۱۷ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک از کربوهیدرات‌ها را ثبت کرد که نشان‌دهنده پاسخ ویژه و افزایش قابل توجه میزان کربوهیدرات کل این رقم به شرایط کم‌آبی است. این تغییرات در غلظت کربوهیدرات نشان‌دهنده تنوع در پاسخ‌های فیزیولوژیکی و استراتژی‌های مختلف مدیریت منابع کربوهیدراتی در ارقام مختلف گیاهان است.

در این پژوهش، افزایش محتوای کربوهیدرات کل در گیاهان تحت شرایط تنش کم‌آبی مشاهده شد، که می‌تواند به‌عنوان یک مکانیزم سازگاری برای مقابله با تنش‌های محیطی در نظر گرفته شود. این افزایش در کربوهیدرات‌ها به‌ویژه به‌دلیل کاهش فعالیت‌های نورساختی و یا کاهش سنتز این ترکیبات در فرآیندهای غیر نورساختی است که تحت تنش کم‌آبی اتفاق می‌افتد (Chegah *et al.* 2013). در واقع، به نظر می‌رسد که گیاهان در مواجهه با کمبود آب به تولید و تجمع بیشتر قندهای محلول روی می‌آورند تا بتوانند تعادل اسمزی خود را حفظ کرده و از آسیب به غشاهای یاخته ای جلوگیری کنند. این مکانیسم به‌ویژه در ارقام اطلسی مشاهده شده است که در آن‌ها تجمع قندهای محلول به‌عنوان یک پاسخ به تنش کم‌آبی به‌خوبی نمایان است (Oraee & Tehranifar, 2020).



شکل ۱۰- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر محتوای کربوهیدرات کل ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

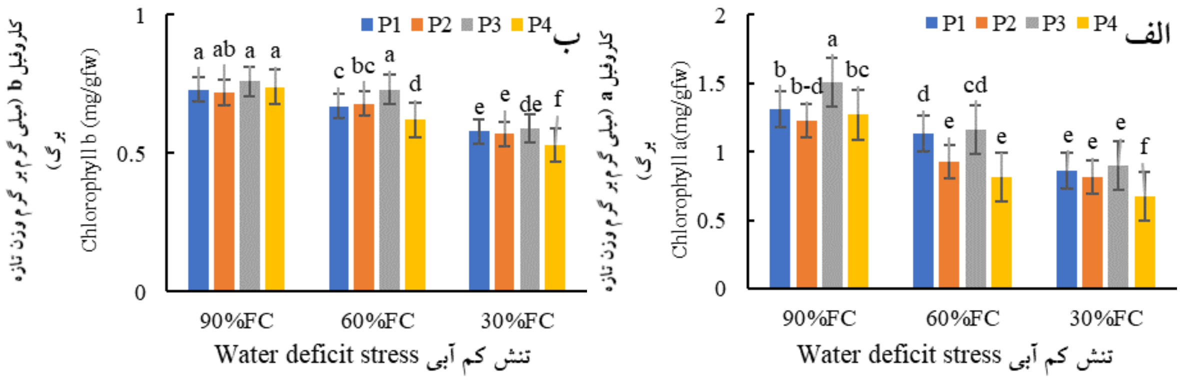
Figure 10- Effect of different levels of water deficit stress on Total carbohydrate content in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

رنگدانه‌های نورساختی: محتوای سبزینه a در گیاهان آبیاری شده با ۹۰٪ ظرفیت زراعی به حداکثر رسید و رقم P3 بیشترین مقدار سبزینه a را با ۱/۵۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ تولید کرد (شکل ۱۱ الف).در این شرایط، سایر ارقام نیز مقادیر بالاتری از سبزینه a را نشان دادند. این افزایش در محتوای سبزینه a نشان‌دهنده سلامت و کارایی بالای سیستم نورساختی در شرایط بدون تنش است. با افزایش شدت کم‌آبی، میزان سبزینه a به‌طور قابل توجهی کاهش یافت و در شرایط تنش شدید (۳۰٪ ظرفیت زراعی) به کمترین مقدار خود یعنی ۰/۶۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ در رقم P4 رسید. این کاهش می‌تواند ناشی از آسیب به ساختارهای نورساختی و کاهش کارایی نورساختی در پاسخ به کم‌آبی باشد.

محتوای سبزینه b تحت شرایط بدون تنش برای تمامی ارقام ثابت بود. با این حال، با افزایش شدت تنش کم‌آبی، غلظت سبزینه b به‌طور معناداری کاهش یافت (شکل ۱۱ ب). در شرایط تنش شدید کم‌آبی (۳۰٪ ظرفیت زراعی)، کاهش قابل توجهی در میزان سبزینه b مشاهده شد، به‌ویژه در رقم P4 که حداقل مقدار ۰/۵۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ را ثبت کرد. این کاهش نشان‌دهنده تأثیر منفی شدید تنش کم‌آبی بر تولید رنگدانه‌های نورساختی و کاهش توانایی گیاهان در حفظ کارایی نورساختی است.

رنگدانه‌های نورساختی مانند سبزینه a و b نقش اساسی در فرآیند نورساخت دارند و کاهش محتوای آب می‌توانند باعث تغییرات زیادی در سطح مولکولی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی شود که یکی از این تغییرات، تخریب سبزینه در گیاهان است (Shams *et al.* 2015; Asefpour Vakilian & Massah, 2017). کاهش غلظت سبزینه به‌طور عمده به دلیل افزایش کاتابولیسم و عدم تأمین شرایط مناسب برای سنتز این رنگدانه‌ها اتفاق می‌افتد (Hatamifar & Babadaei Samani, 2017). در شرایط خشکسالی، آسیب به کلروپلاست‌ها و ناهماهنگی در کمپلکس‌های پروتئینی، به‌ویژه در سیستم‌های نورساختی، باعث کاهش بیوسنتز رنگدانه‌ها و کاهش محتوای سبزینه می‌شود. این تغییرات از علائم بارز تنش اکسیداتیو و تولید گونه‌های اکسیژن فعال هستند (Shams *et al.* 2015; Jafari *et al.* 2019; Goldani *et al.* 2021; Rebi *et al.* 2024). کاهش غلظت سبزینه در شرایط کم‌آبی همچنین منجر به تغییرات قابل توجهی در عملکرد روزنه‌ها و کاهش جذب CO_2 می‌شود که تأثیرات مستقیمی بر

فرآیند نورساخت دارد. این تأثیرات می‌تواند به کاهش بازده نورساختی و کاهش تولید مواد آلی منجر شود، که در نهایت بر رشد و توسعه گیاهان تأثیرگذار است (Rebi *et al*., 2024). نتایج مشابهی از اثرات منفی تنش کم‌آبی بر رنگدانه‌های نورساختی در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است و این موضوع تأکید می‌کند که مدیریت مناسب منابع آب در بهبود سلامت و عملکرد گیاهان تحت شرایط تنش کم‌آبی حیاتی است (Jafari *et al*. 2019).



شکل ۱۱- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر سبزینه a (الف) و سبزینه b (ب) ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 11- Effect of different levels of water deficit stress on Chlorophyll a (A) and Chlorophyll b (B) in different varieties of petunia. The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی: در شرایط کم‌آبی، فعالیت آنزیم SOD در رقم P4 تغییرات معنی‌داری را نشان نداد، در حالی که در ارقام P1، P2 و P3 تحت تنش متوسط (۶۰٪ ظرفیت زراعی) به‌طور قابل توجهی افزایش یافت (شکل ۱۲ الف). این افزایش SOD می‌تواند به‌عنوان یک واکنش دفاعی برای مقابله با تولید رادیکال‌های آزاد در شرایط تنش آبی تعبیر شود. با این حال، تحت تنش شدید کم‌آبی (۳۰٪ ظرفیت زراعی)، فعالیت SOD در تمامی ارقام نسبت به تنش متوسط تغییرات محسوسی نداشت.

فعالیت آنزیم CAT در ارقام P1، P2 و P3 در پاسخ به تنش کم‌آبی افزایش یافت. به‌ویژه در رقم P1، فعالیت CAT از ۶۰٪ ظرفیت زراعی به ۳۰٪ ظرفیت زراعی افزایش یافت، که نشان‌دهنده واکنش قوی‌تر این رقم به تنش آب است (شکل ۱۲ ب). در عین حال، فعالیت CAT در سه رقم دیگر در شرایط تنش شدید کم‌آبی کاهش یافت، که ممکن است به دلیل کاهش ظرفیت گیاهان برای مقابله با تنش اکسیداتیو در شرایط شدید کم‌آبی باشد.

فعالیت آنزیم POD نیز تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار گرفت. در شرایط بدون تنش، رقم P1 بالاترین فعالیت POD را نشان داد. با افزایش تنش کم‌آبی، فعالیت POD در تمامی ارقام افزایش معنی‌داری داشت (شکل ۱۲ ج). با این حال، رقم P4 تحت تنش شدید کم‌آبی کاهش شدیدی در فعالیت POD به مقدار ۳/۶۹ واحد بر گرم وزن تازه نشان داد. این کاهش ممکن است به دلیل کاهش فعالیت آنزیم‌های دفاعی در پاسخ به تنش شدید آب باشد.

تنش‌های غیرزیستی نظیر کم‌آبی، می‌توانند به طور قابل توجهی بر فیزیولوژی گیاهان تأثیر بگذارند، به ویژه تولید گونه‌های

فعال اکسیژن[1] در بافت‌های مختلف گیاهان را افزایش دهند (Naing & Kim, 2021). این گونه‌ها به دلیل خصوصیات اکسیدکننده خود می‌توانند به ساختارهای یاخته ای آسیب برسانند و منجر به کاهش کارایی فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی شوند. برای مقابله با این آسیب‌ها، گیاهان به طور طبیعی از مکانیسم‌های دفاعی استفاده می‌کنند که شامل فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود.

در این میان، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کلیدی شامل SOD، CAT و POD به‌طور ویژه در کاهش اثرات سمی ROS نقش دارند. آنزیم SOD با تبدیل سوپراکسید به پراکسید هیدروژن و سپس تبدیل آن به آب و اکسیژن، نقش حیاتی در خنثی‌سازی سوپراکسید ایفا می‌کند. آنزیم‌های CAT و POD نیز با تجزیه پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن، به کاهش اثرات مضر این ترکیب کمک می‌کنند (Naing *et al*., 2022).

توانایی این آنزیم‌ها در سم‌زدایی ROS و کاهش اثرات مخرب آن‌ها به طور مستقیم با تحمل به کم‌آبی در گیاهان مرتبط است (Jafari *et al*., 2019). این ویژگی به گیاهان کمک می‌کند تا در شرایط خشکسالی، آسیب‌های اکسیداتیو را کنترل کنند و در نتیجه، تحمل به تنش آبی خود را افزایش دهند. با این حال، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که فعالیت‌های آنزیم‌های CATو SOD در ارقام P3 و P4 تحت شرایط کم‌آبی تغییرات معنی‌داری نداشته است (شکل ۱۲ الف و ب). این یافته‌ها به این معنی است که این آنزیم‌ها در این ارقام نتوانسته‌اند به‌طور مؤثر به خنثی‌سازی ROS کمک کنند و بنابراین، عملکرد آنتی‌اکسیدانی این ارقام ضعیف‌تر است.

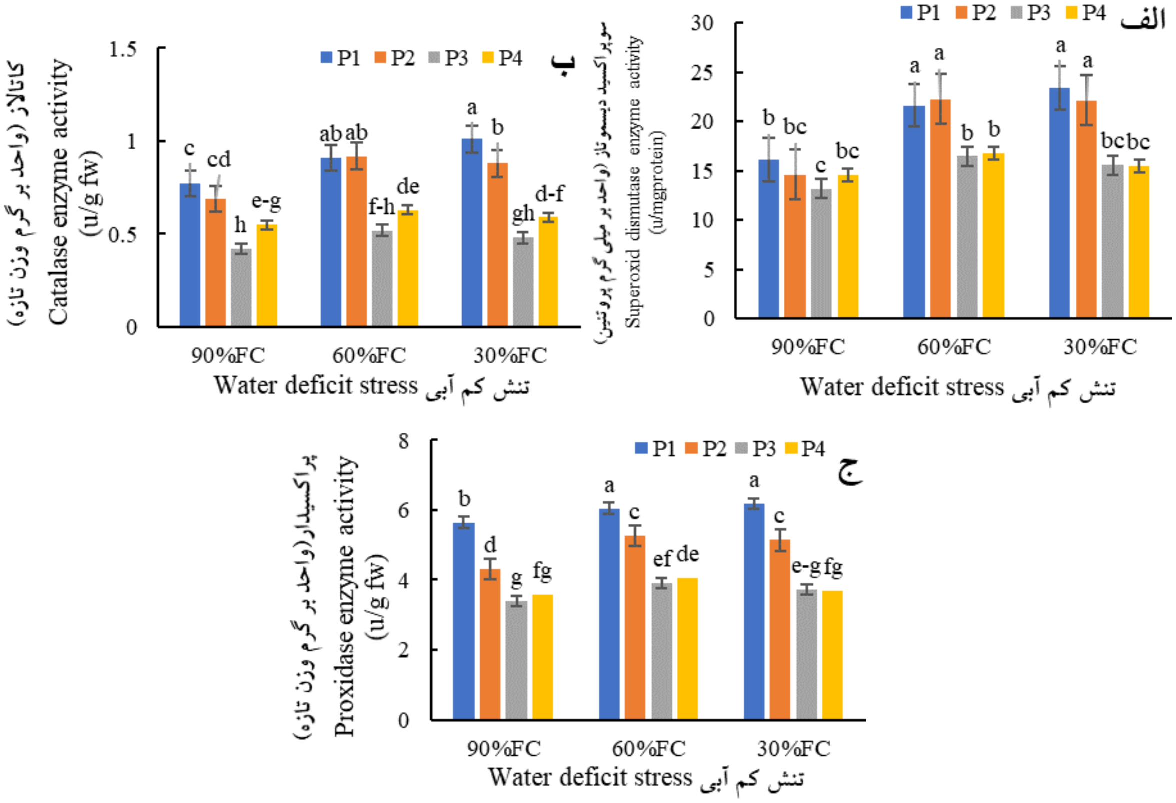
در مقابل، ارقام P1 و P2 تحت شرایط کم‌آبی با غلظت‌های بالاتری از CAT، POD و SOD مواجه شدند (شکل ۱۲ الف، ب و ج). این افزایش در غلظت‌ها نشان‌دهنده فعالیت مؤثر این آنزیم‌ها در مقابله با تنش آبی و افزایش تحمل به کم‌آبی است. فعالیت‌های بالای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در این ارقام به آن‌ها این امکان را می‌دهد که به‌طور بهتری به تنش کم‌آبی پاسخ دهند و آسیب‌های اکسیداتیو را کنترل کنند. مطالعات متعدد نیز تأکید کرده‌اند که وجود و فعالیت مناسب آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به‌عنوان یک شاخص مهم برای تعیین سطح تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی، به ویژه کم‌آبی، عمل می‌کند (Giordano *et al*. 2021; Oraee & Tehranifar, 2020).

این نتایج به درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی کمک می‌کند و می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای پرورش ارقام مقاوم‌تر به کم‌آبی و بهبود استراتژی‌های مدیریت منابع آب در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول همبستگی پیرسون: نتایج تحلیل همبستگی پیرسون میان شاخص‌های شیمیایی مختلف نشان‌دهنده الگوهای جالب توجهی است. محتوای پرولین و کربوهیدرات کل با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی رابطه مثبت و معناداری داشتند، که به‌طور غیرمستقیم تأیید کننده این است که افزایش سطح این ترکیبات به‌طور مستقیم با توانایی گیاهان در مقابله با تنش اکسیداتیو مرتبط است (جدول ۲). به‌علاوه، ارتباط نزدیکی بین محتوای سبزینه a و سبزینه b مشاهده شد، که نشان‌دهنده هماهنگی در تولید و تجزیه این رنگدانه‌هاست. به‌طور جالب، سبزینه a و b ارتباط منفی با نشت الکترولیت نشان دادند، که ممکن است به‌واسطه آسیب ساختاری در غشاء یاخته ای در شرایط کم‌آبی باشد. بالاترین میزان همبستگی مشاهده شده بین فعالیت

۱- ROS

آنزیم‌های POD و CAT ثبت شد، با ضریب همبستگی برابر ۰/۸۶ که نشان‌دهنده همبستگی قوی و معنی‌دار در عملکـرد ایـن دو آنزیم در شرایط تنش است (جدول ۲).



شکل ۱۲- اثر سطوح مختلف تنش کم‌آبی بر سوپراکسید دیسموتاز (الف)، کاتالاز (ب) و پراکسیداز (ج) ارقام مختلف اطلسی. بارهای عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. بارهایی که با حروف مختلف مشخص شده‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD دارند.

Figure 12- Effect of different levels of water deficit stress on Superoxide Dismutase (SOD) (A), Catalase (CAT) (B) and Peroxidase (POD) (C) in different varieties of petunia The vertical bars represent the standard error of the mean. Bars labeled with different letters are statistically significantly different from each other at the 5% probability level, according to the LSD test.

جدول۲. ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین عوامل اندازه‌گیری شده در ارقام مختلف اطلسی تحت تنش کم آبی.

Table 2- Pearson's correlation coefficients (r) of the measured factors in various petunia cultivars under water deficit stress.

	نشت الکترولیت **Electrolyte leakage**	محتوای نسبی آب برگ **Relative water content**	سبزینه a **Chlorophyll a**	سبزینه b **Chlorophyll b**	پرولین **Proline**	کربوهیدرات کل **Total carbohydrate**	سوپراکسید دیسموتاز **Superoxide dismutase**	کاتالاز **Catalase**	پراکسیداز **Peroxidase**
نشت الکترولیت **Electrolyte leakage**	1	-0.57**	-0.68**	-0.56**	-0.12^{ns}	-0.05^{ns}	0.04^{ns}	-0.13^{ns}	-0.25^{ns}
محتوای نسبی آب برگ **Relative water content**		1	0.62**	0.73**	-0.12^{ns}	0.009^{ns}	-0.04^{ns}	0.09^{ns}	0.16^{ns}
سبزینه a **Chlorophyll a**			1	0.82**	-0.30*	-0.43**	-0.43**	-0.30*	-0.12^{ns}
سبزینهb **Chlorophyll b**				1	-0.37**	0.36*	-0.34*	-0.23^{ns}	-0.14^{ns}
پرولین **Proline**					1	0.76*	0.71**	0.77**	0.80**
کربوهیدرات کل **Total carbohydrate**						1	0.77**	0.87**	0.79**
سوپراکسید دیسموتاز **Superoxide dismutase**							1	0.77**	0.72**
کاتالاز **Catalase**								1	0.86**
پراکسیداز **Peroxidase**									1

ns: عدم معنی داری، *: معنی داری در سطح ۵٪، **: معنی داری در سطح ۱٪

ns: not significant. $^{*}P < 0.05$. $^{**}P < 0.01$.

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر به‌طور واضح تأثیرات تنش کم‌آبی بر گیاهان را از جنبه‌های مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بررسی کرده است. افزایش محتوای کربوهیدرات کل تحت تنش کم‌آبی به‌عنوان یک مکانیزم سازگاری گیاهان برای کاهش سنتز غیر نورساختی این ترکیبات مشاهده شد. تجمع قندهای محلول، به‌ویژه در ارقام P1 و P2، به‌عنوان مکانیزم تنظیم اسمزی و حفظ

سلامت غشای یاخته ای شناسایی گردید. کـاهش رنگدانـه‌های نورسـاختی، بـه‌ویژه سـبزینه‌ها، تحـت تـنش کم‌آبـی بـه‌طور چشمگیری در ارقام P3 و P4 مشاهده شد، که با افزایش تولید ROS همزمان بود. آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانـند SOD، CAT و POD نقش کلیدی در سم‌زدایی ROS ایفا کرده و غلظت بالای آن‌ها در ارقام P1 و P2 نشان‌دهنده تحمل بهتر به تـنش آبـی بود. نتایج پژوهش بر اهمیـت اسـتفاده از شـاخص‌های بیوشـیمیایی نظیـر کربوهیـدرات‌ها، رنگدانـه‌ها و فعالیـت آنزیم‌هـای آنتی‌اکسیدانی به‌عنوان معیارهای کلیدی برای ارزیابی تحمل گیاهان به کم‌آبی تأکید دارد. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، رقـم P1 با بالاترین تحمل به کم‌آبی شناخته شد و ارقام P2 و P4 به‌ترتیب در رده‌های بعدی از نظر تحمل به خشکی قرار گرفتند.

منابع

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, *105*, 121-126. https://doi. org/10, 1016, S0076-6879.

Ahmad, S., Ahmad, R., Ashraf, M. Y., Ashraf, M., Waraich, E. A. (2009). Sunflower (*Helianthus annuus* L.) response to drought stress at germination and seedling growth stages. *Pakistan Journal of Botany*, *41* (2), 647-654.

Álvarez, S., Navarro, A., Bañón, S., Sánchez-Blanco, M. J. (2009). Regulated deficit irrigation in potted Dianthus plants: Effects of severe and moderate water stress on growth and physiological responses. *Scientia Horticulturae*, *122* (4), 579-585.

Bajji, M., Kinet, J. M., Lutts, S. (2002). The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. *Plant Growth Regulation*, *36*, 61-70.

Bates, L. S., Waldren, R., Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207.

Blum, A., Ebercon, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat 1. *Crop Science*, *21*(1), 43-47.

Chaves, M. M., Oliveira, M. M. (2004). Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: Prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany*, *55* (407), 2365-2384.

Chegah, S., Chehrazi, M., Albaji, M. (2013). Effects of drought stress on growth and development of Frankenia plant (*Frankenia laevis*). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, *19* (4), 659-666.

Cherki, G. H., Foursy, A., Fares, K. (2002). Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environmental and experimental Botany, 47*(1), 39-50.

Chirivì, D., Betti, C. (2023). Molecular links between flowering and abiotic stress response: A focus on Poaceae. *Plants*, *12* (2), 331.

Dolatkhahi, A., Shoor, M., Bannayan, M., Tehranifar, A., Alizadeh, A. (2020). Water deficit decreases gas exchange parameters and marketable quality of *Rosa hybrida* ‘Club-Nika’ irrespective of training systems. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *22* (3), 837-849.

Ebrahimi, M., Zamani, G. R., Alizadeh, Z. (2017). Investigation of qualitative traits and evaluation of flower yield of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) during its growth period under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *10* (2), 293-306.

Farahani, H. A., Valadabadi, S. A., Daneshian, J., Khalvati, M. A. (2009). Evaluation of essential oil of balm (*Melissa officinalis* L.) under water deficit stress conditions. *Journal of Medicinal Plants Research*, *3* (5), 329-333.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Sustainable Agriculture*, 153-188.

Ferreira, L. C., Cataneo, A. C., Remaeh, L. M. R., Corniani, N., de Fátima Fumis, T., de Souza, Y. A., Scavroni, J., Soares, B. J. A. (2010). Nitric oxide reduces oxidative stress generated by lactofen in soybean plants. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *97* (1), 47-54.

Franco, J. (2011). Root development under drought stress. *Technology and Knowledge Transfer E-Bulletin*, *2* (6), 1.

Franks, S. J. (2011). Plasticity and evolution in drought avoidance and escape in the annual plant *Brassica rapa*. *New Phytologist*, *190* (1), 249-257.

Gholami, M., Rahemi, M., Kholdebarin, B., Rastegar, S. (2012). Biochemical responses in leaves of four fig cultivars subjected to water stress and recovery. *Scientia Horticulturae*, *148*, 109-117.

Ghoulam, C., Foursy, A., Fares, K. (2002). Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, *47* (1), 39-50.

Giannopolitis, C. N., Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, *59* (2), 309-314.

Giordano, M., Petropoulos, S. A., Cirillo, C., Rouphael, Y. (2021). Biochemical, physiological, and molecular aspects of ornamental plants adaptation to deficit irrigation. *Horticulturae*, *7* (5), 107.

Goldani, M., Dolatkhahi, A., Parsa, M., Vahdati, N., Rasouli, Z. (2021). Investigation of improving the drought tolerance in Persian petunia (*Petunia* sp.) by exogenous application of salicylic acid and gibberellic acid. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, *20* (1), 37-48.

Hatamifar, N., Babadaei Samani, R. (2017). Effect of paclobutrazol on some morphological and physiological characteristics of petunia under drought stress. *Journal of Ornamental Plants*, *7* (2), 125-136.

Jafari, S., Garmdareh, S. E. H., Azadegan, B. (2019). Effects of drought stress on morphological, physiological, and biochemical characteristics of stock plant (*Matthiola incana* L.). *Scientia Horticulturae*, *253*, 128-133.

Khosravi, S., & Haghighi, M. (2021). The Effect of Foliar Spray of Brassinosteroid on Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.) Seedling under Drought Stress. *Journal of Horticultural Science*, *35*(3), 367-381.

Kocheva, K., Lambrev, P., Georgiev, G., Goltsev, V., Karabaliev, M. (2004). Evaluation of chlorophyll fluorescence and membrane injury in the leaves of barley cultivars under osmotic stress. *Bioelectrochemistry*, *63* (1-2), 121-124.

Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A. N., Sheikh, I., Kumar, V., Dhaliwal, H. S., Saxena, A. K. (2020). Amelioration of drought stress in Foxtail millet (*Setaria italica* L.) by P-solubilizing drought-tolerant microbes with multifarious plant growth promoting attributes. *Environmental Sustainability*, *3*, 23-34.

Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *In Methods in Enzymology* (Vol. 148, pp. 350-382). Elsevier.

Liu, F., Stützel, H. (2004). Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*, *102* (1), 15-27.

Manivannan, P., Jaleel, C. A., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., Lakshmanan, G. A., Panneerselvam, R. (2007). Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *59* (2), 141-149.

McCready, R., Guggolz, J., Silviera, V., Owens, H. (1950). Determination of starch and amylose in vegetables. *Analytical Chemistry*, *22* (9), 1156-1158.

Naing, A. H., Campol, J. R., Kang, H., Xu, J., Chung, M. Y., Kim, C. K. (2022). Role of ethylene biosynthesis genes in the regulation of salt stress and drought stress tolerance in petunia. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 844449.

Oraee, A., Tehranifar, A. (2020). Evaluating the potential drought tolerance of pansy through its physiological and biochemical responses to drought and recovery periods. *Scientia Horticulturae*, *265*, 109225.

Pourghayoumi, M., Bakhshi, D., Rahemi, M., Kamgar-Haghighi, A. A., Aalami, A. (2017). The physiological responses of various pomegranate cultivars to drought stress and recovery in order to screen for drought tolerance. *Scientia Horticulturae*, *217*, 164-172.

Rebi, A., Ejaz, I., Khatana, M. A., Alvi, A. B. A., Irfan, M., Wang, G., Gang, Y. Y., Wang, L., Meng, Y., Ghazanfar, S. (2024). Effect of irrigation levels on the physiological responses of petunia cultivars for selection. *Ecological Frontiers*, *44* (1), 206-216.

Rezaei, H., Mirzaie-Asl, A., Abdollahi, M. R., Tohidfar, M. (2023). Comparative analysis of different artificial neural networks for predicting and optimizing in vitro seed germination and sterilization of petunia. *PLOS ONE*, *18* (5), e0285657.

Riaz, A., Younis, A., Taj, A. R., Karim, A., Tariq, U., Munir, S., Riaz, S. (2013). Effect of drought stress on growth and flowering of marigold (*Tagetes erecta* L.). *Pakistan Journal of Botany*, *45* (S1), 123-131.

Sánchez-Blanco, M. J., Álvarez, S., Navarro, A., Bañón, S. (2009). Changes in leaf water relations, gas exchange, growth and flowering quality in potted geranium plants irrigated with different water regimes. *Journal of Plant Physiology*, *166* (5), 467-476.

Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, *10* (2), 259.

Shams, J., Najafi, P., Etemadi, N. A. (2015). Effect of water deficiency on growth indices of *Petunia hybrida* cultivars and *Petunia violacea* grown in Isfahan region of Iran. *Crop Research*, *49* (1 to 3), 55-61.

Shamshiri, M., Mozafari, V., Sedaghati, E., Bagheri, V. (2011). Response of petunia plants (*Petunia hybrida* cv. Mix) inoculated with *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* to phosphorous and drought stress. Journal *of Agricultural Science and Technology*, *13* (6), 929-942.

Sivakumar, R., Srividhya, S. (2016). Impact of drought on flowering, yield and quality parameters in diverse genotypes of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Advances in Horticultural Science*, *30*, 3-1.1.

Tafaghodi, R., Marashi, H., Moshtaghi, N., Zarghami, M. (2018). Expression patterns of catalase and superoxide dismutase (Cu/Zn-SOD) genes under drought stress in petunia hybrid. *Journal of Advanced Plant Science*, *1*, 209.

Takeno, K. (2016). Stress-induced flowering: The third category of flowering response. *Journal of Experimental Botany*, *67* (17), 4925-4934.

Teisseire, H., Guy, V. (2000). Copper-induced changes in antioxidant enzymes activities in fronds of duckweed (*Lemna minor*). Plant science, *153*(1), 65-72.

Toscano, S., Ferrante, A., Romano, D. (2019). Response of Mediterranean ornamental plants to drought stress. *Horticulturae*, *5* (1), 6.

Tran, N.-H. T., Van Hoang, D., Phan, L. T. (2024). Drought stress induces early flowering and the stress tolerance of offspring in *Petunia hybrida*. *Plant Biotechnology*, *41* (1), 53-63.

Vakilian, K. A., Massah, J. (2017). A farmer-assistant robot for nitrogen fertilizing management of greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, *139*, 153-163.

Wang, C., Turner, V. K., Wentz, E. A., Zhao, Q., Myint, S. W. (2021). Optimization of residential green space for environmental sustainability and property appreciation in metropolitan Phoenix, Arizona. *Science of the Total Environment*, *763*, 144605.

Yamada, M., Morishita, H., Urano, K., Shiozaki, N., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., Yoshiba, Y. (2005). Effects of free proline accumulation in petunias under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, *56* (417), 1975-1981.

Flower and Ornamental Plants (2024), 9(2): 337-358
Research article

Physiological and biochemical responses of four petunia cultivars under different levels of water deficit stress

Leyla Cheheltanan, Ali Tehranifar*, Mahmoud Shoor, Hossein Nemati, Saeed Khosravi

Department of Horticultural Science and Landscape, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad
tehranifar@um.ac.ir
Received: 2024/09/13, Revised: 2024/09/27, Accepted: 2024/09/27

Abstract
This study investigated the effects of water deficit stress on the growth, physiological, and biochemical parameters of four Petunia cultivars: 1. Iranian Petunia (P1), 2. Hybrid Supercascade White Petunia (P2), 3. Hybrid Grandiflora Frost Blue Petunia (P3), and 4. Hybrid Grandiflora Crimson Star Petunia (P4) under different levels of water deficit (90%, 60%, and 30% of field capacity). The experiment was conducted in a factorial design with four replications in a completely randomized layout. The results showed that water deficit stress significantly reduced the fresh and dry weight of shoots and roots. The greatest reductions in shoot and root fresh and dry weights were observed in cultivars P4 and P3. Under severe stress conditions, stem height in cultivars P1 and P2 decreased by 40.4% and 43.3%, respectively. Moreover, the number of lateral branches in cultivars P1 and P3 increased under moderate water deficit stress (by 24.4% and 42.9%, respectively), but significantly declined under severe stress. Water deficit stress also significantly reduced root diameter in cultivar P3 (by 48%). Severe water stress decreased both flower diameter and the number of flowers in all four cultivars, with the greatest reduction in flower diameter (22.97%) observed in cultivar P4 and the highest reduction in flower number (72.3%) recorded in cultivar P1. Electrolyte leakage increased under severe water deficit stress, with cultivar P4 exhibiting the highest electrolyte leakage (36.1%). Leaf relative water content decreased under drought conditions, with the greatest reduction (24.4%) observed in cultivar P4. Proline content reached its highest level in cultivar P1 under severe stress conditions (2.24 µmol g^{-1} fresh weight). Total carbohydrate concentration increased in cultivars P1 and P2 under severe stress (by 21.6% and 19.5%, respectively). Chlorophyll a and b contents decreased under drought conditions, with cultivar P4 showing the lowest chlorophyll b content (0.53 mg g^{-1} fresh leaf weight) under severe stress. Superoxide dismutase (SOD) activity increased under moderate stress in cultivars P1, P2, and P3 (by 34.45%, 52.5%, and 24.9%, respectively), but showed no significant changes under severe stress. Catalase (CAT) activity increased in cultivar P1 (by 29.5%), while it decreased in the other three cultivars. Peroxidase (POD) activity was highest in cultivar P1 under non-stress conditions (5.65 units g^{-1} fresh weight) and further increased (by 9.6%) under water deficit stress. Pearson correlation analysis revealed that proline and total carbohydrate contents were positively correlated with antioxidant enzyme activities, and chlorophyll a and b were closely associated with each other. Overall, cultivar P1 exhibited the highest drought tolerance, followed by cultivars P2 and P4, respectively.
Keywords: Antioxidant enzymes, Growth parameters, Photosynthetic pigments, Carbohydrate.