

اثر تنش کمبود آب در مراحل رویشی و زایشی روی برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.)

Effect of Water Deficit Stress at Vegetative and Reproductive Stages on Some Physiological and Biochemical Characteristics of Sage (*Salvia officinalis* L.)

زهرا ایزدی*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶

(مقاله پژوهشی)

چکیده

به منظور بررسی اثرات تنش کمبود آب در مراحل رویشی و زایشی بر فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تجمع اسمولیت‌های سازگار، محتوای نسبی آب و عملکرد مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.)، آزمایشی با استفاده از طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان در سال ۱۳۹۹ انجام شد. تیمارهای آبیاری بر مبنای حداکثر تخلیه مجاز آب قابل دسترس خاک و ترکیب آن‌ها بودند که در مراحل رویشی و زایشی مدنظر قرار گرفتند، به طوری که ۳۵ درصد حداکثر تخلیه رطوبتی به عنوان شاهد و ۶۰ و ۸۵ درصد به عنوان سطوح متوسط و شدید تنش کمبود آب در طول دوره رشد گیاه اعمال شدند. هم‌چنین ۶۰ و ۸۵ درصد در مرحله رویشی، ۶۰ و ۸۵ درصد در مرحله زایشی به علاوه دوره‌های رویشی و زایشی شاهد نیز منظور گردیدند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز از تنش‌های متوسط و شدید در کل دوره رشد و دوره رشد رویشی به دست آمد. بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز در تنش‌های متوسط و شدید در دوره رشد زایشی و پراکسیداز در تنش شدید رویشی و زایشی حاصل گردید. محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش کمبود آب کاهش یافت، در حالی که میزان پرولین و درصد نشت الکترولیت‌ها افزایش یافت. تیمار شاهد بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک (۱۴۷۰۰ کیلوگرم در هکتار) را نشان داد. هم‌چنین بیش‌ترین میزان پروتئین از تیمارهای شاهد، متوسط در کل دوره رشد و دوره‌های رشد رویشی و زایشی به دست آمد. بیش‌ترین میزان کربوهیدرات محلول نیز متعلق به تنش متوسط در کل دوره رشد و دوره رشد زایشی بود.

واژه‌های کلیدی: پرولین، درصد نشت الکترولیت‌ها، سوپراکسید دیسموتاز، عملکرد بیولوژیک، محتوای نسبی آب

۱. استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، مجتمع آموزش عالی نهاوند، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

* نویسنده مسئول Email: z.izadi@basu.ac.ir

مقدمه

مسیر انتقال پیام، به عنوان پیام‌رسان‌های ثانویه تنش عمل نموده و باعث فعال شدن چندین واکنش دفاعی می‌شوند، اما تولید بیش از حد آن‌ها طی تنش کمبود آب به بروز تنش اکسیداتیو در گیاه منجر می‌گردد (میلر^{۱۱} و همکاران، 2010). گونه‌های واکنشگر اکسیژن از جمله رادیکال‌های سوپراکسید^{۱۲}، آب اکسیژنه یا پراکسید هیدروژن^{۱۳}، اکسیژن اتمی^{۱۴} و هیدروکسیل^{۱۵} از طریق صدمه اکسیداتیو به لیپیدهای غشاء، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و آنزیم‌های فتوسنتزی متابولیسم عادی سلول و گیاه را مختل می‌سازند (فاروق^{۱۶} و همکاران، 2009). گیاهان برای از بین بردن رادیکال‌های آزاد اضافی و کاهش آسیب ناشی از تنش اکسیداتیو بر سلول‌ها به انواع مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدان (آنزیمی و غیرآنزیمی) مجهز شده‌اند (شارما^{۱۷} و همکاران، 2012). از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌توان به سوپراکسید دیسموتاز (تبدیل سوپراکسید به پراکسید هیدروژن)، کاتالاز و پراکسیداز (تبدیل‌کننده پراکسید هیدروژن به آب) اشاره نمود که در شرایط ایجاد تنش در سلول‌های گیاهی به منظور حذف گونه‌های فعال اکسیژن ساخته می‌شوند (سوارس^{۱۸} و همکاران، 2019). تعادل بین تولید رادیکال‌های آزاد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان حائز اهمیت ویژه‌ای بوده و تعیین می‌کند که آیا فرایند پیام‌رسانی و یا آسیب اکسیداتیو اتفاق خواهد افتاد (آموآه^{۱۹} و همکاران، 2019). در منابع علمی، وجود رابطه تنگاتنگ بین فعالیت بالای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و مقاومت بالا به تنش کمبود آب در بسیاری از گیاهان گزارش شده است. به عنوان مثال، چی‌اپرو^{۲۰} و همکاران (2019) تغییرات فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در واکنش به تنش کمبود آب را در برگ‌های نعناع لعلی^{۲۱} بررسی نمودند و مشاهده کردند که تحت شرایط تنش کمبود آب فعالیت دو آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز افزایش یافت. در آزمایشی که توسط مومیوند^{۲۲} و همکاران (2021) روی گیاه ترخون^{۲۳} انجام گرفت، سطوح بالای تنش کمبود آب باعث افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز شد.

مریم‌گلی^۱ یکی از مهم‌ترین گیاهان معطر و دارویی، متعلق به خانواده نعناعیان^۲ می‌باشد (بوزرمی^۳ و همکاران، 2009). این گیاه بوته‌ای کوچک و چند ساله و بومی منطقه مدیترانه است، اما در حال حاضر در سراسر جهان کشت می‌شود (گردیسا^۴ و همکاران، 2015). زمان گل‌دهی گیاه اردیبهشت و خرداد می‌باشد. مریم‌گلی دارای طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های دارویی شامل اثرات ضدسرطان، ضدالتهایبی، ضدانعقادی، آنتی‌اکسیدانی، ضد درد و ضد میکروبی می‌باشد (قربانی و اسماعیل‌زاده^۵، 2017). برگ‌های این گیاه غنی از اسانس هستند و کشت آن نیز عمدتاً به منظور برداشت برگ‌های آن انجام می‌شود (نواک^۶ و همکاران، 2010). از مهم‌ترین اجزای اسانس گیاه مریم‌گلی می‌توان به مونوترپن‌ها اشاره کرد (نواک و همکاران، 2010).

امروزه کم‌آبی یکی از مهم‌ترین عواملی است که تولید محصولات در نواحی خشک و نیمه خشک را محدود می‌کند. کاهش رشد در اثر تنش کمبود آب به مراتب بیش‌تر از سایر تنش‌های محیطی دیگر می‌باشد (کوچکی^۷ و همکاران، 2011). بخش اعظم کشور ایران را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد. گیاهان از طریق مکانیسم‌های مختلف همانند سیستم ریشه‌ای عمیق، حفظ آماس سلولی، سنتز اسمولیت‌ها و تنظیم اسمزی باعث کاهش اثرات مخرب تنش کمبود آب می‌شوند (عزیز^۸ و همکاران، 2018). آنچه مسلم است استفاده از گیاهان مقاوم به کم‌آبی یکی از راهکارهای مهم و پایدار در توسعه باغبانی و زراعت می‌باشد (عزیز و همکاران، 2018). بیش‌تر گیاهان دارویی، از جمله گیاهانی هستند که در اکوسیستم‌های طبیعی رشد می‌کنند. بنابراین دارای گونه‌هایی هستند که در بعضی شرایط به کمبود آب مقاوم می‌باشند (سانگ^۹ و همکاران، 2017). بسته شدن روزنه‌ها طی تنش کمبود آب معمولاً تثبیت دی‌اکسیدکربن را کاهش داده، زنجیره انتقال الکترون را مختل می‌سازد و باعث تولید مقادیر زیادی از گونه‌های واکنشگر اکسیژن^{۱۰} در کلروپلاست و میتوکندری می‌شود. گونه‌های واکنشگر اکسیژن که محصولات فرعی متابولیسم هوازی در سلول هستند، دارای نقش‌های مثبتی می‌باشند؛ برای مثال، در

11. Miller
12. O₂⁻
13. H₂O₂
14. O₂
15. HO.
16. Farooq
17. Sharma
18. Soares
19. Amoah
20. Chiappero
21. *Mentha piperita* L.
22. Mumivand
23. *Artemisia dracunculus* L.

1. *Salvia officinalis* L.
2. Lamiaceae
3. Boszormenyi
4. Grdisa
5. Ghorbani and Esmailzadeh
6. Nowak
7. Koocheki
8. Aziz
9. Song
10. Reactive Oxygen Species

با توجه به اهمیت گیاه دارویی مریم‌گلی و مصرف گسترده آن در صنایع مختلف، هم‌چنین محدودیتی که در منابع آب کشاورزی کشور وجود دارد و نظر به این که مطالعات اندکی در زمینه تأثیر تنش کمبود آب بر مریم‌گلی انجام گرفته است، از این رو هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر تنش کمبود آب در مراحل مختلف رشد (رویشی و زایشی) بر آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، پرولین، پروتئین محلول، کربوهیدرات محلول، درصد نشت الکتروولت‌های برگ، محتوای نسبی آب برگ و عملکرد این گیاه در شرایط بوم‌شناختی همدان بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش با استفاده از طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال زراعی ۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان با ارتفاع ۱۷۴۱/۵ متر از سطح دریا، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی اجرا گردید. میانگین بارندگی سالانه این منطقه ۲۸۰ میلی‌متر است که عمده پراکنش آن در فصول پاییز و زمستان می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای آماده‌سازی زمین جهت کشت، ابتدا زمین در بهار سال ۱۳۹۹ به‌وسیله گاواهن برگردان‌دار شخم زده شد و برای خرد کردن کلوخه‌ها از دیسک استفاده شد. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف به فاصله ۵۰ سانتی‌متر و به طول چهار متر بود. فاصله بین هر دو کرت، ۱۰۰ سانتی‌متر و فاصله هر دو بلوک از هم سه متر تعیین شد.

بذر گیاه مریم‌گلی از شرکت پاکان بذر اصفهان خریداری و در اسفندماه در سینی‌های نشاء با محیط‌کشت کوکوپیت و پیت‌ماس کشت شدند. نشاءها در مرحله ۴ برگی به زمین اصلی منتقل شدند و در عمق ۶ سانتی‌متری خاک با دست کشت گردیدند. بلافاصله بعد از کاشت، آبیاری انجام یافت. جهت جلوگیری از نشت آب به سایر کرت‌ها از آبیاری به‌صورت قطره‌ای-نواری (T-tape) استفاده گردید. تیپ‌های آبیاری روی ردیف‌های کاشت قرار گرفت و فقط به اندازه نیاز گیاه بر اساس تیمارهای آبیاری آب وارد مزرعه شد. تیمارهای آبیاری بر اساس درصد تخلیه آب قابل دسترس خاک^۷ در منطقه ریشه و عمق مدیریت آبیاری برای گیاه مریم‌گلی حدود ۳۰ سانتی‌متر با هفت سطح در نظر گرفته شد (بهره^۸ و پاندا^۸، ۲۰۰۹) (جدول ۲).

موسی و عبدالعزیز^۱ (۲۰۰۸) بیان کردند که تحت شرایط کمبود آب، تنظیم اسمزی از طریق تجمع مواد محلول درون سلول‌ها منجر به حفظ تورژانس سلول‌ها و فرایندهای وابسته به آن می‌گردد. این کار از طریق افزایش غلظت برخی از یون‌ها مانند پتاسیم، سدیم، کلسیم، نیترات و کلر در واکوئل و برخی متابولیت‌ها نظیر اسیدهای آمینه (به‌خصوص پرولین)، قندها (به‌ویژه مونوساکاریدها)، پلی‌اول‌ها (قندهای الکلی مثل سوربیتول و مانیتول)، پلی‌آمین‌ها، ترکیبات آمونیومی چهارتایی (خصوصاً گلاسیسین بتائین)، پروتئین‌های خاص و اسیدهای آلی (عمدتاً ملات و سترات) اتفاق می‌افتد و ادامه فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه را ممکن می‌سازند (مسعودی صادقانی^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). پرولین علاوه بر نقش تنظیم‌کننده اسمزی، منجر به برقراری ثبات در ساختار غشاء و پروتئین و مهار رادیکال‌های آزاد سلول در شرایط تنش می‌شود. تجمع پرولین در بسیاری از گونه‌های گیاهی در ایجاد مقاومت به تنش اهمیت دارد و میزان آن به‌طور عمومی در گیاهان مقاوم نسبت به گیاهان حساس بیشتر است (شبیر^۳ و همکاران، ۲۰۱۶). پرولین علاوه بر تنظیم اسمزی، به‌صورت یک ترکیب محافظ تحت شرایط تنش نیز عمل می‌کند. بدین ترتیب که به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم با ترکیبات درشت مولکول برهم‌کنش داشته و بدین صورت باعث حفظ شکل و ساختار طبیعی آن‌ها می‌گردد. قندهای محلول باعث ثبات غشاهای سلولی و حفظ تورژانس سلول‌ها می‌شوند. شبیر و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند در گیاهانی که تحت شرایط کمبود آب، قندهای محلول در آن‌ها افزایش می‌یابند، تنظیم اسمزی بهتر صورت می‌گیرد. در حقیقت در گیاهانی که قندهای محلول در پاسخ به تنش کمبود آب تجمع می‌یابند، تنظیم اسمزی بهتر صورت می‌گیرد (شبیر و همکاران، ۲۰۱۶). پژوهشگران زیادی گزارش کرده‌اند که تنش کمبود آب باعث کاهش قندها و پروتئین‌های محلول در برگ می‌شود (کروسکیول^۴ و همکاران، ۲۰۰۹). از دیگر صفاتی که تحت تأثیر کمبود آب قرار می‌گیرد، کاهش معنی‌دار در محتوای نسبی آب برگ است. در مطالعه‌ای که گیاه گل جعفری مکزیکی^۵ در شرایط کمبود آب قرار گرفت، کاهش معنی‌داری در محتوای نسبی آب برگ در گیاهان تیمار شده مشاهده شد و میزان آن با تجمع پرولین در برگ ارتباط مستقیم داشت (بابایی^۶ و همکاران، ۲۰۲۱).

1. Moussa and Abdel-Aziz
2. Masoudi-Sadaghiani
3. Shabbir
4. Crusciol
5. *Tagetes minuta* L.
6. Babaei

7. Available soil water (ASW)

8. Behera and Panda

جدول ۱: نتایج تجزیه خاک محل اجرای آزمایش

Table 1: Soil analysis of experimental site

عمق	هدایت الکتریکی	اسیدیته	ماده آلی	نیترژن کل	فسفر	پتاسیم	نقطه	درصد	بافت خاک
نمونه برداری	(دسی‌زیمنس بر	ته	(درصد)	(درصد)	(میلی‌گرم در	(میلی‌گرم در	پژمردگی دائم	ظرفیت	ک
(سانتی‌متر)	متر)	pH	O.C (%)	T.N (%)	کیلوگرم)	کیلوگرم)	(درصد)	زراعی	Texture
SD (cm)	EC (dS.m ⁻¹)				P (mg.kg ⁻¹)	K (mg.kg ⁻¹)	PWP (%)	FC (%)	
0-30	1.15	7.6	1.3	0.19	59.4	258	8.11	19.87	رسی-لومی Clay-Loam

هولی^۸ (1972) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۰ نانومتر انجام شد.

اندازه‌گیری پرولین مطابق روش بیس^۹ و همکاران (1973) صورت گرفت و جذب آن در طول موج ۵۳۲ نانومتر خوانده شد و با استفاده از منحنی استاندارد پرولین، مقدار این ماده محاسبه و برحسب میکرومول در گرم وزن تر برگ اعلام گردید. مقدار پروتئین محلول از روش برادفورد^{۱۰} (1976) و میزان کربوهیدرات محلول از روش بایسه و مرکس^{۱۱} (1993) تعیین گردید. تعیین درصد نشت الکتروولیت نیز بر اساس روش والنتویک^{۱۲} و همکاران (2006) انجام شد و آنگاه با استفاده از معادله ۱، درصد نشت محاسبه گردید.

رابطه ۱:
$$\%EL = (EL_1 / EL_2) \times 100$$
 که در آن EL_1 میزان نشت اولیه و EL_2 میزان نشت نهایی می‌باشد.

محتوای نسبی آب برگ نیز توسط روش ریتیچی و نگوین^{۱۳} (1990) اندازه‌گیری گردید و در نهایت محتوی نسبی آب برگ (برحسب درصد) با استفاده از رابطه ۲ به دست آمد.

رابطه ۲:
$$\%RWC = (F_w - D_w) / (T_w - D_w) \times 100$$
 که F_w ، D_w و T_w به ترتیب وزن تر برگ، وزن خشک برگ و وزن برگ در حالت تورژسانس می‌باشد.

به منظور اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیک پس از حذف حاشیه به مقدار نیم متر از ابتدا و انتها و دو ردیف کناری کرت، سطح باقی‌مانده از ارتفاع پنج سانتی‌متری برداشت شد و پس از توزین عملکرد آن محاسبه گردید.

برای تجزیه آماری داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۲ و به منظور مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد. نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردیدند.

آب قابل دسترس خاک عبارت از مقدار آب موجود در ناحیه ریشه بین ظرفیت زراعی^۱ و نقطه پژمردگی دائم^۲ است (بهره و پاندا، 2009). ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از روش صفحه فشاری در فشار ۰/۱ اتمسفر تعیین شدند. مقدار آب خاک ابتدا به روش وزنی و سپس با استفاده از دستگاه TDR^۳ مدل Trime-FM در عمق مذکور تعیین گردید. برای تعیین رابطه بین مقدار عددی ارائه شده توسط TDR و درصد حجمی رطوبت خاک اندازه‌گیری شده به روش وزنی از منحنی کالیبراسیون استفاده شد. برای استفاده از TDR، در مرکز هر واحد آزمایشی یک لوله دسترسی^۴ از جنس UPVC تعبیه شد (بهره و پاندا، 2009). هم‌چنین برای تعیین مقدار آب آبیاری از لوله‌های مجهز به کنتور استفاده گردید. مقدار آب استفاده شده برای آبیاری همه تیمارها که تنش در مرحله‌ی رویشی داشتند، تا زمانی که نشاءها به حدود ۸ تا ۱۰ برگ رسیده یکسان در نظر گرفته شد و بعد از این مرحله (۸ تا ۱۰ برگی) متفاوت بود. برای تیمارهایی که تنش در مرحله زایشی اعمال گردید، نیز میزان آبیاری تا ۱۰ تا ۱۵ درصد گل‌دهی یکسان انجام شد. نمونه‌برداری از واحدهای آزمایشی در زمان گل‌دهی کامل گیاه و با در نظر گرفتن اثر حاشیه در هر کرت از بالاترین برگ‌های سبز کاملاً توسعه یافته انجام گرفت.

به منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به روش اسپکتروفتومتری و بر اساس قابلیت بازدارندگی آن از احیای فتوشیمیایی نیتروبلوتترازولیم (NBT)^۵ در طول موج ۵۶۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید (بیچامپ و فریدوویچ^۶، 1971). فعالیت آنزیم کاتالاز طبق روش اسپکتروفتومتری ارائه شده توسط دهیندز^۷ و همکاران (1981) و بر اساس میزان ناپدید شدن آب اکسیژنه (H₂O₂) در طول موج ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز نیز از روش

1. Field capacity (FC)
2. Permanent wilting point (PWP)
3. Time-Domain Reflectometry
4. Access tube
5. Nitrobluetetrazolium (NBT)
6. Beauchamp and Fridovich
7. Dhindsa

8. Holy
9. Bates
10. Bradford
11. Buysse and Merckx
12. Valentovic
13. Ritchie and Nguyen

جدول ۲: تیمارهای آبیاری

Table 2: Irrigation treatments

دوره‌ها Stages		تیمارهای آبیاری (تخلیه رطوبتی) Irrigation treatments (water depletion)	
دوره رشد‌زایشی Reproductive growth stage	دوره رشد رویشی Vegetative growth stage		
✓	✓	35% (Control)	۳۵ درصد (شاهد)
✓	✓	60% (Moderate stress)	۶۰ درصد (تنش متوسط)
✓	✓	85% (Severe stress)	۸۵ درصد (تنش شدید)
-	✓	60% (Moderate stress)	۶۰ درصد (تنش متوسط)
-	✓	85% (Severe stress)	۸۵ درصد (تنش شدید)
✓	-	60% (Moderate stress)	۶۰ درصد (تنش متوسط)
✓	-	85% (Severe stress)	۸۵ درصد (تنش شدید)

نتایج و بحث

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

متوسط افزایش معنی‌داری در فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز داشت، اما در سطح تنش بالاتر، فعالیت آن افزایش معنی‌داری نشان نداد.

بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تنش‌های متوسط و شدید در دوره رشد زایشی به‌ترتیب با میانگین‌های ۴/۶۴ و ۴/۳۶ واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین برگ مشاهده گردید (شکل ۲). در شرایط عدم تنش، تنش‌های متوسط و شدید در دوره رشد رویشی کم‌ترین فعالیت آنزیمی را نشان دادند. مقایسه تیمارهای مختلف آبیاری با یکدیگر و شاهد نشان داد که کمبود آب، به‌ویژه در تنش متوسط موجب افزایش فعالیت کاتالاز نسبت به شاهد شد و پس از آن با افزایش مجدد تنش میزان آن کاهش یافت (شکل ۲). هم‌چنین گیاهانی که تمام دوره رشد تحت تنش‌های متوسط و شدید بودند از گیاهانی که در دوره رشد زایشی تحت این تیمارها قرار گرفتند فعالیت آنزیمی کم‌تری داشتند.

تنش شدید در دوره‌های رشد رویشی و زایشی بیش‌ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز را داشتند و کم‌ترین فعالیت این آنزیم مربوط به شاهد بود (شکل ۳). میزان فعالیت این آنزیم در تنش شدید در کل دوره نسبت به تنش شدید مرحله‌ای (رویشی و زایشی) کم‌تر بود.

تأثیر آبیاری در مراحل مختلف رشد بر میزان فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز در برگ‌های مریم‌گلی در سطح یک درصد و آنزیم کاتالاز در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). همان‌طوکه در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، مقایسه میانگین میزان فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، تیمارهای آزمایش را در دو گروه جداگانه قرار داد. بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تنش‌های متوسط و شدید در کل دوره رشد و دوره رشد رویشی به‌ترتیب ۷۳/۵۴، ۷۵/۶۳ و ۷۰/۸۱ و ۷۱/۲۶ واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین برگ مشاهده شد (شکل ۱). کم‌ترین میزان این آنزیم مربوط به شرایط عدم تنش (۲۱/۴۲) واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین برگ بود، هرچند بین این تیمار و تنش‌های متوسط و شدید در دوره رشد زایشی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. احتمالاً فعالیت این آنزیم نیاز به زمان داشته تا افزایش یابد و پس از آنزیم‌های دیگر فعالیت آن آغاز شده و به همین دلیل در تیمارهای باز یابی شده (تنش‌های متوسط و شدید در دوره رشد رویشی) و تیمارهای تنش در کل دوره رشد، میزان بالاتری را داشته و در تیمارهای تحت تنش در دوره رشد زایشی هنوز سطح این آنزیم افزایش نیافته است. از سوی دیگر، تنش

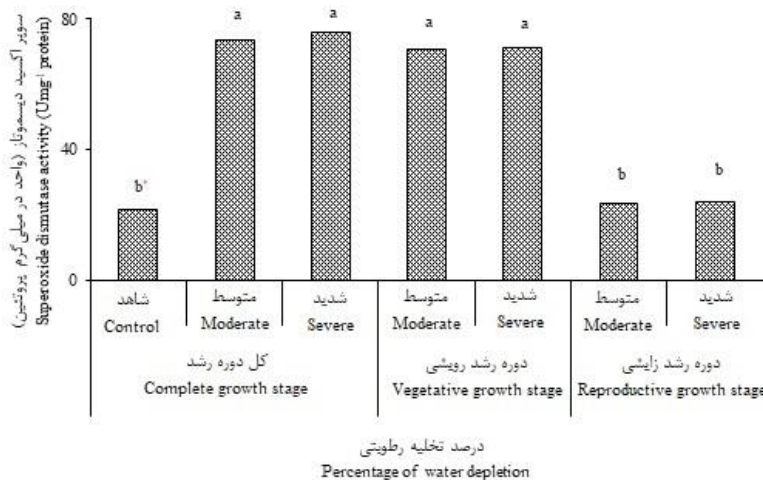
جدول ۳: نتایج تجزیه واریانس اثر آبیاری روی برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه مریم‌گلی

Table 3: Analysis of variance results of the effect of irrigation on some biochemical and physiological characteristics of sage plant

میانگین مربعات Mean square									df	منابع تغییرات Sources of Variations
عملکرد بیولوژیکی Biological yield	محتوای نسبی آب برگ Relative leaf water content	نشت الکترولیت‌ها Electrolyte leakage	کربوهیدرات محلول Soluble sugars	پروتئین Protein	پروترین Proline	فعالیت آنزیم پراکسیداز Peroxidase activity	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase activity	فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase activity		
6031.99	0.99	5.168	0.1247	0.0004	0.005	2.036	0.023	0.0016	2	تکرار Repeat
166458.32**	52.49**	21.52**	0.57*	0.002**	0.65**	25.13**	0.123*	0.245**	6	آبیاری Irrigation
19023.14	3.15	7.042	0.0008	0.0009	0.013	6.97	0.0291	0.0235	12	خطا Error
8.2	3.4	9.8	7.8	12.6	7.5	9.1	12.4	6.2	-	ضریب تغییرات (درصد) CV (%)

ns و ** و ***: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌دار

ns, ** and ***: Significant at 5 and 1% probability level and non-significant, respectively



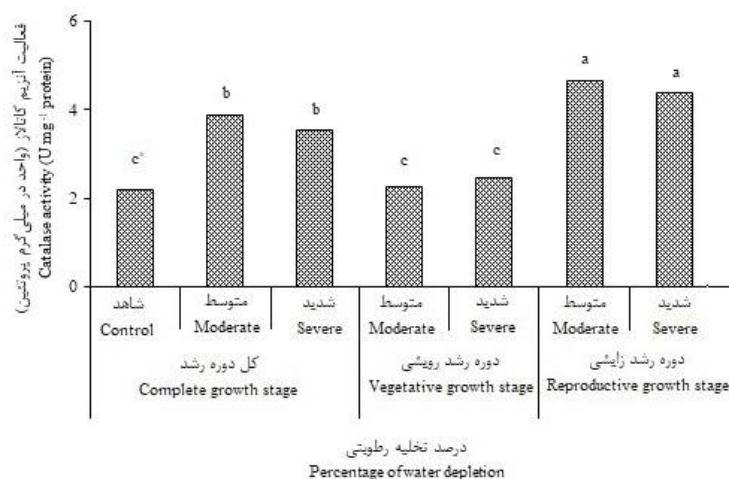
شکل ۱: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز گیاه

مریم‌گلی. *: میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig. 1: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on superoxide dismutase activity of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test

مرحله‌ای یا آنی روبرو می‌شود میزان این آنزیم بیش‌تر از تنش‌های مداوم است. از طرفی در تنش شدید در دوره رشد رویشی گرچه تنش حذف شده بود اما باز هم بیش‌ترین سطح این آنزیم را دارا بود.

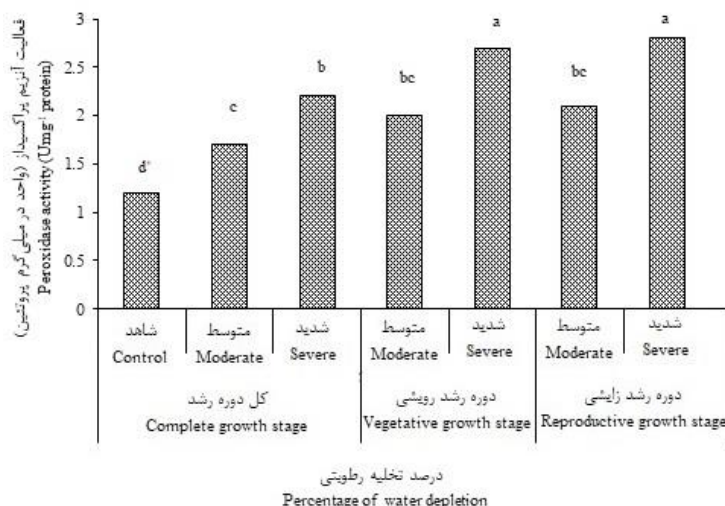
تنش متوسط در کل دوره رشد گرچه تفاوت معنی‌داری با تنش متوسط در دوره رشد رویشی و دوره رشد زایشی نداشت، اما از نظر عددی میزان فعالیت این آنزیم در تنش متوسط در کل دوره رشد نسبت به دو تیمار ذکر شده کم‌تر بود. با این نتایج می‌توان گفت زمانی که گیاه مریم‌گلی با تنش‌های



شکل ۲: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز گیاه مریم‌گلی. *:

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig. 2: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on catalase activity of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test



شکل ۳: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاه مریم‌گلی. *:

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig. 3: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on peroxidase activity of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test

کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن در سلول‌های مزوفیل برگ و تجمع NADPH می‌گردد که در این حالت اکسیژن به‌عنوان پذیرنده نهایی الکترون‌ها عمل می‌کند و رادیکال سوپراکسید ایجاد می‌شود (رهبریان^۴ و همکاران، ۲۰۱۱). آنزیم سوپراکسید دیسموتاز اولین سد دفاعی در برابر تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌باشد. افزایش فعالیت این آنزیم در شرایط وقوع تنش کمبود آب با فعال شدن سازوکار دفاعی و مقاومت به تنش وابسته است (آمو^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاهان مقاوم به تنش کمبود آب بیش‌تر از گیاهان حساس به این تنش می‌باشد و گزارش

مکانیسم‌هایی که تنش اکسیداتیو را کاهش می‌دهند، نقش مهمی در بهبود تحمل به تنش کم‌آبی ایفا می‌کنند (ابریشمچی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). از آن‌جا که تنش کمبود آب موجب تشکیل انواع فعال اکسیژن می‌گردد، بسیاری از ترکیبات سلولی از قبیل لیپیدها، اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها تخریب می‌شوند. جاروب کردن^۲ گونه‌های فعال اکسیژن به‌وسیله آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز صورت می‌گیرد (گیل و توتجا^۳، ۲۰۱۰). بستن روزنه‌ها منجر به

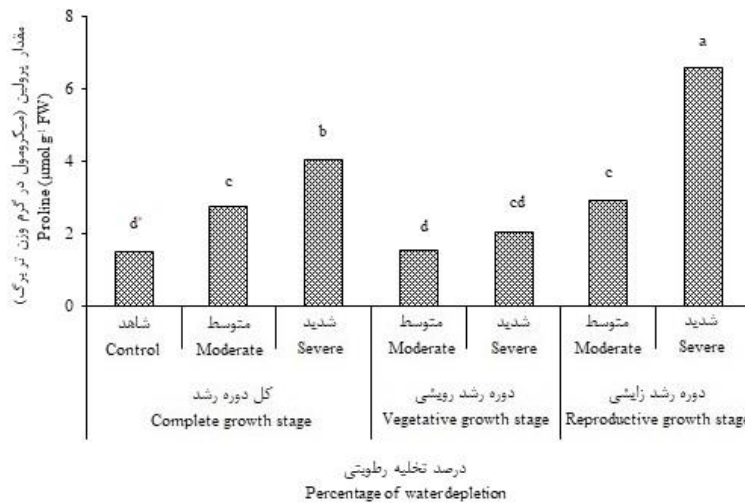
1. Abrishamchi
2. Scavenging
3. Gill and Tuteja

از آنزیمها در کنار هم که در زمانهای مختلف فعال می‌شوند توانایی حذف مواد اکسیدکننده را دارا می‌باشند.

پرولین

تأثیر آبیاری در مراحل متفاوت رشد بر پرولین آزاد برگ مریم‌گلی در سطح یک درصد (جدول ۳) معنی‌دار بود. تنش شدید در دوره رشد زایشی بیش‌ترین مقدار پرولین برگ را داشت (شکل ۴). کم‌ترین مقدار پرولین از تیمار شاهد حاصل شد. با این حال، اختلاف معنی‌داری بین شرایط عدم تنش، تنش‌های متوسط و شدید در دوره رشد رویشی مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که گیاه مریم‌گلی قادر بوده پس از حذف تنش میزان پرولین را به حالت اولیه برگرداند. تنش شدید در دوره رشد زایشی نسبت پرولین را در مقایسه با شاهد به ۴ برابر افزایش داد (شکل ۴). درحالی‌که تنش شدید در کل دوره رشد نسبت پرولین در مقایسه با شاهد حدود ۲/۵ برابر بود. احتمالاً تنش در کل دوره یک سازگاری اولیه را در برابر مقدار پرولین در گیاه ایجاد کرده است.

شده است که با افزایش شدت تنش، فعالیت این آنزیم در گیاهان تحت تنش به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (رهبریان و همکاران، ۲۰۱۱) که با نتایج پژوهش حاضر در تنش متوسط کل دوره رشد و دوره رشد رویشی مطابقت داشت. یکی دیگر از آنتی‌اکسیدان‌های مؤثر در سیستم دفاعی اکثر گیاهان در مقابله با تنش‌های غیرزنده آنزیم کاتالاز می‌باشد. افزایش سرعت فعالیت این آنزیم با افزایش محتوی پراکسید هیدروژن همبستگی دارد و در جهت افزایش مقاومت به تنش خشکی انجام می‌شود (آمو و همکاران، ۲۰۱۹). فاروق و همکاران (۲۰۲۱) آسیب کم‌تر وارد شده بر غشاءهای یک رقم نخودفرنگی^۱ مقاوم به خشکی تحت شرایط تنش شدید خشکی را با فعالیت بالاتر سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز در مقایسه با یک رقم حساس به خشکی مرتبط دانستند. میوناوار^۲ و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که تحت شرایط کمبود آب، آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز به‌صورت مشترک گونه‌های فعال اکسیژن را به آب و اکسیژن مولکولی تبدیل می‌کنند و از این طریق از آسیب سلولی گیاه جلوگیری می‌نمایند. در مطالعه‌ای که روی گیاه کینوا^۳ انجام گرفت



شکل ۴: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر غلظت پرولین برگ گیاه مریم‌گلی. *:

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig.4: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on Leaf proline concentration of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test

1. *Pisum sativum* L.
2. Munawar
3. *Chenopodium quinoa* L.
4. Faghire
5. *Hyssopus officinalis* L.
6. Ahmadi
7. *Glycyrrhiza glabra* L.
8. Hosseini
9. Abedini and Daei-Hassani
10. *Triticum aestivum* L.
11. Chawla
12. *Oriza sativa* L.

به نظر می‌رسد تولید پرولین تحت تنش متوسط در کل دوره رشد و دوره‌های رشد رویشی و زایشی به علت تخریب پروتئین نبوده بلکه احتمالاً به خاطر فعال شدن مسیرهای تولیدی پرولین بوده است، اما با افزایش کمبود آب در تنش شدید محتوای پروتئین به شدت کاهش یافت که این امر می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین و نیز تجمع اسیدهای آمینه آزاد از جمله پرولین مرتبط باشد. روبیسکو مهم‌ترین و فراوانترین پروتئین محلول برگ است، هرگونه کاهش در غلظت پروتئین محلول نشانه کاهش غلظت روبیسکو بوده که این امر می‌تواند کاهش فعالیت فتوسنتز جاری را در پی داشته باشد (خلودندی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱). کاهش محتوای پروتئین محلول تحت تنش می‌تواند نتیجه واکنش پروتئین با رادیکال آزاد، افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین، کاهش سنتز پروتئین و نیز تجمع اسید آمینه آزاد از جمله پرولین مرتبط باشد (حسن^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸). با افزایش میزان تنش کمبود آب، میزان پروتئین محلول در برگ‌های سویا^{۱۲} کاهش یافت (بحرالعلوم^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۹). نعیمی^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۲) نیز در گیاه کدوی پوست کاغذی^{۱۵} گزارش کردند که با افزایش شدت تنش کمبود آب، از میزان پروتئین محلول کاسته شد. در تطابق با نتایج این پژوهش، در بررسی تنش کمبود آب روی خار مریم میزان پروتئین تا ۵۰ درصد نیاز آبی تغییری نشان نداد اما با افزایش میزان تنش، میزان آن کاهش یافت (سارانی ملاک و همکاران، ۱۴۰۱).

کربوهیدرات‌های محلول

اثر آبیاری در مراحل مختلف رشد بر غلظت کربوهیدرات‌های محلول برگ مریم‌گلی در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). غلظت کربوهیدرات محلول گیاهان شاهد کم‌تر از گیاهان تحت تنش بود و با افزایش سطح تنش و رسیدن به تنش متوسط در کل دوره رشد میزان کربوهیدرات محلول افزایش چشمگیری نشان داد. با افزایش بیش‌تر شدت تنش، از غلظت کربوهیدرات‌های محلول برگ به‌طور معنی‌داری کاسته شد (شکل ۶). بالاترین غلظت کربوهیدرات‌های محلول برگ از تنش متوسط در کل دوره رشد و دوره رشد زایشی حاصل شد. بنابراین گیاه مریم‌گلی تنها تا سطح ۶۰ درصد تخلیه رطوبتی از تنظیم اسمزی با افزایش میزان کربوهیدرات‌های محلول قادر به

پرولین در تمام اندام‌های گیاه سالم در طی تنش کمبود آب تجمع می‌یابد و به‌طور گسترده‌تر و وسیع‌تر در برگ‌ها ظاهر می‌شود. افزایش سریع پرولین با آغاز کاهش پتانسیل آب برگ در شرایط تنش هم‌زمان است و هر عاملی که باعث پایین رفتن آب شود، باعث تجمع این اسید آمینه می‌شود (کویکرو^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). رایج‌ترین مسیر برای سنتز پرولین در گیاهان مسیر گلوتامات است و طی تنش کمبود آب، مقدار گلوتامات بیش‌تری به پرولین تبدیل می‌شود. کاهش تجزیه پرولین و تخریب و اختلال در فرایند سنتز پروتئین‌ها نیز در پتانسیل پایین آب، در افزایش پرولین نقش دارد (کافی و همکاران، ۱۳۸۸). بعضی از پژوهشگران اظهار کردند که پرولین به عنوان یک اسمولیت سازگار می‌تواند بدون آسیب رساندن به مولکول‌های بزرگ، در غلظت‌های زیاد در سلول تجمع یابد (کریمی^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). بعضی از پژوهشگران معتقدند که تجمع پرولین در گیاه به هنگام کمبود آب نقش ذخیره کربن و نیتروژن را بازی می‌کند که نقش آن در مراحل بعد از تنش حائز اهمیت است (کای^۳، ۲۰۱۱). فلاح ایمانی و همکاران (۱۴۰۱) گزارش کردند در گیاه مریم‌گلی مقدار پرولین در اثر تنش کمبود آب افزایش یافت و تجمع آن را می‌توان به عنوان یک شاخص حساس برای تعیین وضعیت آماس برگ‌های این گیاه در نظر گرفت. گومز^۴ و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که در نارگیل^۵ اثر تنش خشکی منجر به افزایش میزان پرولین در این گیاه شد. گزارش شده است که در گیاه خارمریم^۶ نیز با افزایش کمبود آب میزان پرولین افزایش یافت (السید^۷ و همکاران، ۲۰۱۹). پژوهش‌های مختلفی افزایش محتوای پرولین را در اثر تنش خشکی گزارش کردند (الو^۸ و همکاران، ۲۰۱۷؛ میراندا-آپودا^۹ و همکاران، ۲۰۱۸).

پروتئین محلول برگ

محتوای پروتئین محلول برگ مریم‌گلی تحت تأثیر آبیاری در مراحل مختلف رشد در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). تنش شدید در کل دوره رشد و دوره‌های رشد رویشی و زایشی کم‌ترین میزان پروتئین محلول برگ را داشتند و سایر تیمارها با دارا بودن مقدار بیش‌تر در یک گروه قرار گرفتند (شکل ۵).

10. Khalvandi
11. Hasan
12. *Glycine max* L.
13. Bahrololoumi
14. Naeemi
15. *Cucurbita pepo* L.

1. Cvikrova
2. Karimi
3. Kai
4. Gomes
5. *Cocos nucifera* L.
6. *Silybum marianum* L.
7. Elsayed
8. Elewa
9. Miranda-Apodaca

مقاومت به کمبود آب وجود دارد. در مطالعات انجام شده توسط سایر محققان افزایش میزان کربوهیدرات‌های محلول تحت شرایط کمبود آب گزارش شده است (خسروشاهی^۸ و همکاران، 2020؛ گوپتا و همکاران، 2021).

نشت الکترولیت‌های برگ

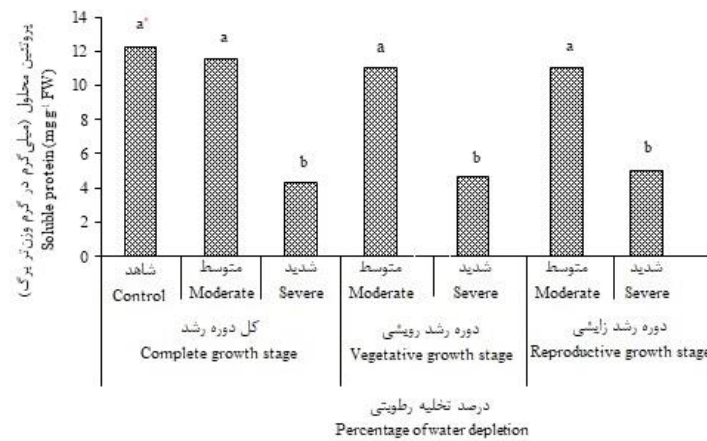
بر اساس جدول ۳، اثر آبیاری در مراحل مختلف رشد بر نشت الکترولیت‌های برگ مریم‌گلی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین‌های درصد نشت الکترولیت‌های برگ بین تیمارهای مختلف آبیاری اختلاف معنی‌داری را نشان داد (شکل ۷). بیش‌ترین درصد نشت را گیاهانی نشان دادند که تحت تنش شدید در کل دوره رشد و دوره‌های رشد رویشی و زایشی قرار گرفتند (شکل ۷). حتی گیاهانی که تمام دوره رشد تحت تنش‌های متوسط و شدید بودند از گیاهانی که در دوره رشد زایشی تحت این تیمارها قرار گرفتند نشت کم‌تری داشتند.

این موضوع نشان می‌دهد که تنش در کل دوره یک سازگاری اولیه را در برابر نشت در گیاه ایجاد کرده است. کم‌ترین نشت مربوط به شرایط عدم تنش و تنش متوسط در کل دوره رشد و دوره‌های رشد رویشی و زایشی بود. به‌طور کلی اگر اختلاف نشت را در شاهد و تنش شدید در نظر بگیریم میزان نشت در آن حدود ۳۰ درصد می‌باشد.

تحمل تنش کمبود آب می‌باشد. هم‌چنین اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای شاهد و تیمارهای تحت تنش در دوره رشد رویشی مشاهده نگردید (شکل ۶). این موضوع نشان می‌دهد که تحت شرایط تنش، میزان کربوهیدرات‌های محلول گیاه مریم‌گلی افزایش می‌یابد و در صورتی که تنش حذف گردد مقدار کربوهیدرات‌های محلول نیز به حالت نرمال بر می‌گردد. احتمالاً دلیل عدم توانایی گیاه در تنش شدید در کل دوره رشد و دوره رشد زایشی اختلال در سیستم فتوسنتزی گیاهان و یا فعالیت آنزیم‌های دخیل در تجزیه نشاسته یا متابولیسم دیگر قندها در این سطوح می‌باشد. کربوهیدرات‌ها در تنظیم و تسهیل بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی همانند فتوسنتز، گل‌دهی و پیری اندام‌های مختلف گیاه هنگام مواجه با تنش خشکی در گیاهان مختلف حائز اهمیت هستند (سامی^۱ و همکاران، 2016). از جمله راهبردهای گیاهان برای مقاومت تحت تنش‌های کمبود آب، تجمع یون‌های فلزی (مانند پتاسیم) و محلول‌های آلی شامل قندهای محلول (مانند ساکاروز، فروکتوز، گلوکز، ترهالوز و رافینوز)، قندهای غیرمحلول (مانند آمیلوز، آمیلوپکتین و نشاسته) و اسیدهای آمینه مانند پرولین می‌باشد (گوپتا^۲ و همکاران، 2021). عوامل متعددی برای افزایش کربوهیدرات‌های محلول برگ در شرایط کمبود آب ذکر شده است (لیو^۳ و همکاران، 2020).

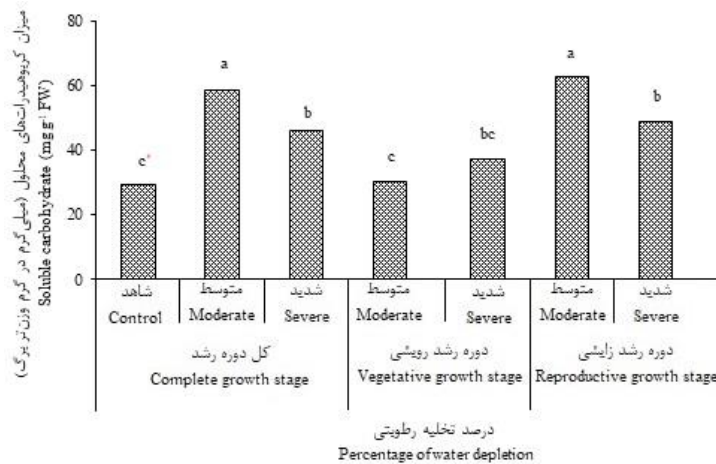
مشخص شده است که در بسیاری از گونه‌های گیاهی، تجمع کربوهیدرات‌های محلول در برگ‌ها طی تنش خشکی ارتباط تنگاتنگی با تحمل به خشکی آن‌ها دارد (لیو و همکاران، 2020). لیانگ^۴ و همکاران (2021) اظهار داشتند که در شرایط تنش، تجزیه هیدرات‌های کربن نامحلول افزایش می‌یابد و باعث بالارفتن سطح قندهای محلول می‌شود. هو^۵ و همکاران (2018) در گندم گزارش کردند میزان کربوهیدرات‌های محلول گیاهان تحت تنش ۳۰ تا ۱۴۴ درصد در مقایسه با گیاهان شاهد افزایش یافت. لطفی^۶ و همکاران (2014) اظهار داشتند که گیاه ترخون در شرایط کمبود آب با ذخیره انرژی به‌صورت کربوهیدرات باعث کاهش رشد گیاه می‌گردد و از این طریق انرژی را برای دوره بعد از برطرف شدن شرایط تنش ذخیره می‌نماید. پیرزاد^۷ و همکاران (2011) تجمع کربوهیدرات‌های محلول را به‌عنوان یک معیار تحمل به تنش مطرح کردند و گزارش کردند که همبستگی بالایی بین تجمع این عامل و

1. Sami
2. Gupta
3. Liu
4. Liang
5. Hou
6. Lotfi
7. Pirzad



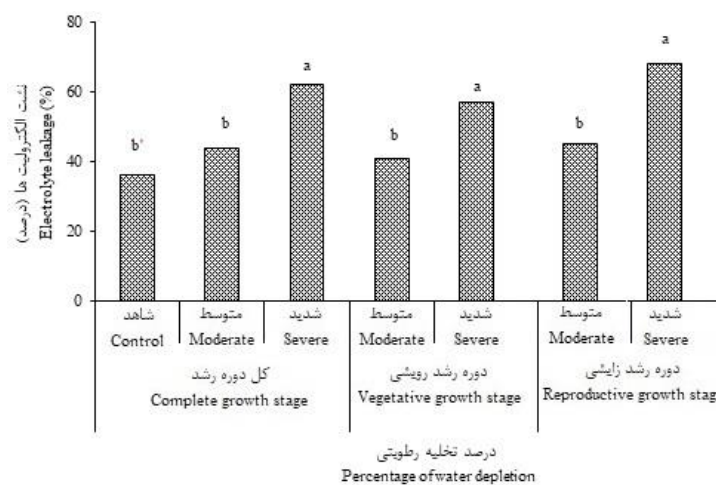
شکل ۵: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر میزان پروتئین محلول برگ گیاه مریم‌گلی. *: میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig. 5: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on Leaf protein of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test



شکل ۶: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر میزان کربوهیدرات محلول برگ گیاه مریم‌گلی. *: میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig 6: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on soluble carbohydrate of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test



شکل ۷: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر نشت الکترولیت‌های برگ گیاه مریم‌گلی. *: میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig 7: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on electrolyte leakage of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test

به‌دست آمد (شکل ۸). گیاه مریم‌گلی در تنش متوسط در دوره رشد رویشی با شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت. به نظر می‌رسد این گیاه توانست پس از اتمام دوره تنش، مجدداً آب جذب نموده و محتوای نسبی آب برگ‌های خود را به حالت اولیه برگرداند. البته این موضوع در مورد تنش شدید صدق نمی‌کند. کمبود آب بر تنش متوسط در دوره رشد زایشی نیز تأثیر معنی‌داری نداشت.

محتوای نسبی آب برگ معرف خوبی از وضعیت آب گیاه به شمار می‌آید. گزارش شده است که هرچه میزان آب اندام‌های گیاهی بیش‌تر باشد، گیاه کم‌تر در شرایط نامساعد محیطی و تولید رادیکال‌های آزاد قرار می‌گیرد و با کاهش محتوای نسبی آب در برگ‌ها، متابولیسم سلولی تغییر یافته، فتوسنتز کاهش و تنفس افزایش نشان می‌دهد (تالوکدار^۸، ۲۰۱۳). در مطالعات انجام شده توسط سایر محققان کاهش محتوای نسبی آب تحت شرایط کمبود آب در گیاهان گل مریم^۹ (علیپور و همکاران، ۱۳۹۳) و جو^{۱۰} (گان^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۵) گزارش شده است. محتوای نسبی آب بالاتر به معنای توانایی برگ در حفظ مقادیر بیش‌تر آب در شرایط کمبود آب است و در صورت کاهش آن سبب تغییر در غشای یاخته و نهایتاً افزایش نشت الکترولیت‌ها از یاخته‌ها می‌گردد (شمسی^{۱۲}، ۲۰۱۰). گزارش شده است که گیاهانی که توانایی بستن روزنه‌هایشان را دارا می‌باشند، می‌توانند محتوای آب برگ‌هایشان را در مقادیر بالاتری حفظ نمایند (کافی و همکاران، ۱۳۸۸). بشارتی^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند تحت شرایط کمبود آب، محتوای نسبی آب در چای ترش^{۱۴} کاهش معنی‌داری پیدا کرد.

سهیلی موحد و همکاران (۱۳۹۶) اظهار کردند محتوای نسبی آب بالاتر گیاهان احتمالاً به علت افزایش غلظت شیره سلولی یا جذب بیش‌تر آب از طریق توسعه سیستم ریشه و یا وجود سازو کارهای کاهش‌دهنده تلفات آب از روزنه‌ها (بسته شدن روزنه‌ها) باشد. محققان بیان کردند که کمبود آب، محتوای نسبی آب در برگ گیاهان خرفه پریپهن^{۱۵} و بادام زمینی^{۱۶} را کاهش داد (راهداری^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۲؛ مهر^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۸).

زیاد بودن میزان نشت به تخریب غشاء سلولی منجر شده و این موضوع بیانگر عدم تحمل گیاه مریم‌گلی نسبت به این سطح تنش می‌باشد. گیاه مریم‌گلی قادر است پس از حذف تنش متوسط در دوره رشد رویشی، وضعیت سلولی خود را بهبود دهد و مانع از نشت گردد، در صورتی که این موضوع برای تنش شدید در دوره رشد رویشی صادق نیست. تنش‌های غیرزنده باعث آسیب و تخریب غشاهای زیستی، افزایش نفوذپذیری و نشت الکترولیت‌ها و نیز غیرفعال شدن پروتئین‌های غشاء می‌گردد که از فعالیت فتوسنتزی و توانایی غشاء پلاسمایی در به‌دست آوردن آب و مواد غذایی کاسته و نهایتاً منجر به مرگ سلول می‌شود (کمالی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). کمبود آب یکسری تغییرات در فسفولیپیدهای غشاء ایجاد می‌کند. در تنش‌های شدید بعضی از قسمت‌های فسفولیپیدهای دو لایه‌ای غشاء حالت هگزاگونال (نش و جهی) و ساختار غشاء به ساختار منفردار تبدیل شده و نشت مواد رخ می‌دهد. سانچز-رودریگز^۲ و همکاران (۲۰۱۰) میزان نشت را یکی از بهترین شاخص‌های تفکیک ارقام متحمل و حساس گوجه‌فرنگی^۳ به تنش کمبود آب معرفی کردند. عبدی^۴ و همکاران (۲۰۲۱) نیز شاخص پایداری غشاء را از جمله صفات مفید برای گزینش گیاهان مختلف تحت تنش کمبود آب گزارش کرده‌اند. جونگ‌کلانگ^۵ و همکاران (۲۰۱۷) نیز روی گل لاله تابستان^۶ اظهار داشتند میزان نشت الکترولیت‌ها در شرایط کمبود آب افزایش یافت. آن‌ها گزارش کردند که کمبود آب باعث ایجاد اختلال در سیستم‌های آنزیمی کاهش‌دهنده فعالیت اکسیژن فعال و افزایش پراکسیداسیون چربی‌های غشاء شده و نهایتاً منجر به خسارت غشای سلولی می‌گردد و میزان نشت الکترولیت‌ها افزایش می‌یابد. افزایش میزان نشت الکترولیت‌ها بر اثر تنش کمبود آب در پژوهش‌های مختلفی نیز گزارش شده است (جونگ‌کلانگ و سانگنیل^۷، ۲۰۱۲؛ کمالی و همکاران، ۲۰۱۲).

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس محتوای نسبی آب برگ در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اثر آبیاری بر محتوای نسبی آب برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین درصد محتوای نسبی آب از تیمار شاهد و کم‌ترین درصد آن نیز از تنش شدید در کل دوره رشد و دوره‌های رشد رویشی و زایشی

8. Talukdar

9. *Polianthetuberosa*L.

10. *Hordeum vulgare* L.

11. Gan

12. Shamsi

13. Besharati

14. *Hibiscus sabdariffa* L.

15. *Portulaca oleracea* L.

16. *Arachis hypogaea* L.

17. Rahdari

18. Meher

1. Kamali

2. Sanchez-Rodriguez

3. *Solanum lycopersicum*L.

4. Abdi

5. Jungklang

6. *Curcuma alismatifolia* L.

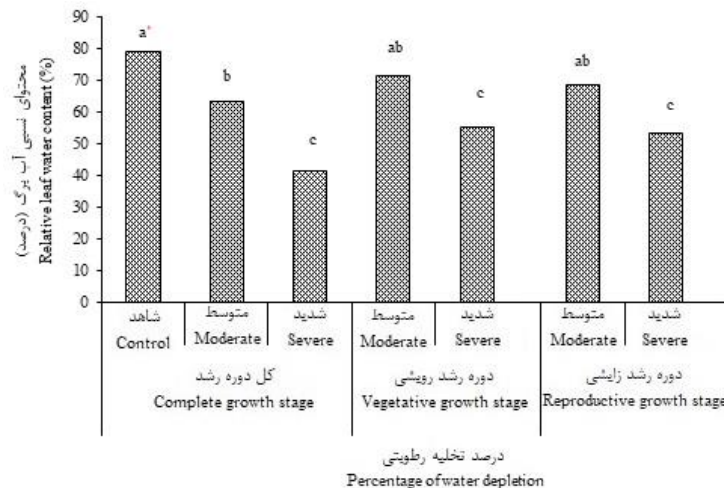
7. Jungklang and Saengnil

عملکرد بیولوژیک

افزایش ماده خشک تولیدی در گیاهان تحت شرایط معمول می‌تواند به دلیل گسترش بیشتر سطح برگ و نیز دوام آن باشد، که با ایجاد منبع فیزیولوژیک کارآمد به منظور استفاده هرچه بیشتر از نور دریافتی، باعث افزایش تولید ماده خشک بیشتر شده است. سارانی ملاک و همکاران (۱۴۰۱) نیز گزارش کردند تنش کمبود آب از طریق کاهش پتانسیل آب گیاه خارمریم سبب کاهش رشد این گیاه گردید.

همچنین آن‌ها بیان داشتند کاهش ماده خشک می‌تواند به دلیل کاهش میزان فتوسنتز از طریق کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی به خصوص کلروفیل باشد. بصیری و همکاران (۱۳۹۹) و جهانی^۲ و همکاران (۲۰۲۱) نیز اظهار داشتند که در شرایط تنش کمبود آب، جذب آب و مواد غذایی کاهش می‌یابد و انرژی بیشتری توسط ریشه صرف جذب آب و مواد غذایی می‌گردد. از طرفی سطح فتوسنتز کننده گیاه نیز کاهش یافته که متعاقب آن نیز باعث کاهش فتوسنتز و تولید شیره پرورده می‌شود و نهایتاً کاهش رشدونمو و عملکرد گیاه را منجر می‌گردد. پژوهشگران دیگری گزارش کردند که با افزایش شدت تنش کمبود آب، عملکرد گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که با نتایج این پژوهش همسو بود (راستیسانی^۳ و همکاران، ۲۰۱۴؛ کشاورز میرزا محمدی^۴ و همکاران، ۲۰۲۱).

تأثیر آبیاری در مراحل متفاوت رشد بر عملکرد بیولوژیک مریم‌گلی در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). تیمار شاهد بیش‌ترین عملکرد با میانگین ۱۴۷۰۰ کیلوگرم در هکتار را دارا بود (شکل ۹). تنش متوسط در دوره‌های رشد رویشی و زایشی اختلاف معنی‌داری از این لحاظ با تیمار شاهد نداشتند. تنش شدید در کل دوره رشد و دوره‌های رشد رویشی و زایشی کم‌ترین عملکرد را دارا بودند. احتمالاً تأثیر تنش خشکی نسبت به سایر عوامل زیست‌محیطی روی کاهش عملکرد بیش‌تر است و در این راستا طول دوره تنش خشکی و شدت تنش بسیار مهم هستند. فاروق و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند تنش کمبود آب منجر به کاهش اندازه برگ، گسترش ساقه و تکثیر ریشه، ایجاد اختلال در روابط آبی گیاهان و کاهش کارایی مصرف آب گردید. آن‌ها گزارش کردند تحت شرایط خشکی از محتوای رطوبت نسبی، پایداری غشاء سلولی و میزان کلروفیل کاسته شده و نهایتاً منجر به کاهش عملکرد می‌گردد. کاهش عملکرد بیولوژیک می‌تواند ناشی از کاهش توانایی گیاه مریم‌گلی در جذب عناصر غذایی و ساخت و انتقال مواد پرورده در اثر کمبود آب باشد. محققین دیگری کاهش عملکرد را تحت شرایط کمبود آب گزارش کردند (داریانتو^۱ و همکاران، ۲۰۱۷).



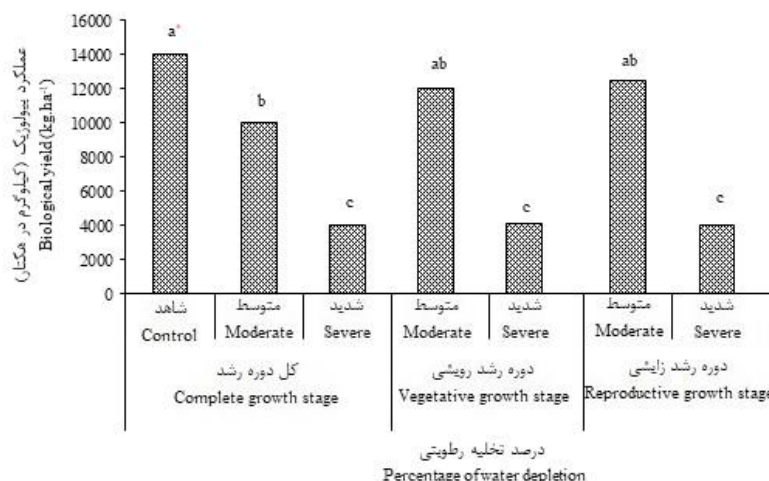
شکل ۸: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر محتوای نسبی آب برگ گیاه مریم‌گلی. *:

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig. 8: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on relative leaf water content of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test

2. Jahani
3. Rastisani
4. Keshavarz Mirzamohammadi

1. Daryanto



شکل ۹: اثر تیمارهای مختلف آبیاری (حداکثر تخلیه آب قابل دسترس خاک) بر عملکرد بیولوژیک گیاه مریم‌گلی. *: میانگین‌هایی دارای حروف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌دار ندارند

Fig. 9: The effect of different irrigation treatments (maximum allowable depletion of available soil water) on biological yield of sage plant. *: Means with the same letters are not significantly different at 5% Duncan test

نتیجه‌گیری کلی
 سطوح تنش می‌باشد. افزایش کربوهیدرات‌های محلول برگ نیز تحت تنش متوسط در کل دوره رشد و دوره رشد زایشی چشمگیر بود و با افزایش بیش‌تر تنش، از غلظت آن کاسته شد. بیش‌ترین عملکرد در گیاهان شاهد و به میزان ۱۴۷۰۰ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد که با گیاهانی که تحت تنش متوسط در دوره‌های رشد رویشی و زایشی در یک گروه آماری قرار گرفتند. به‌طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که گیاه مریم‌گلی در تنش‌های متوسط خشکی قادر به تولید عملکرد مناسب می‌باشد که یکی از دلایل آن بروز مکانیسم‌های کاهش شدت تنش به‌وسیله این گیاه همانند افزایش محتویات اسمولیت‌های سازگار و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان با افزایش کمبود آب می‌باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بررسی شده در این پژوهش شامل سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز در شرایط تنش در گیاه مریم‌گلی فعال شدند، بنابراین نتیجه‌گیری گردید که در شرایط تنش کمبود آب در این گیاه مجموعه‌ای از آنزیم‌ها در کنار یکدیگر در حذف رادیکال‌های آزاد نقش دارند. در بین اسمولیت‌های اندازه‌گیری شده در این آزمایش، پرولین تحت شرایط تنش شدید افزایش چشمگیری در دوره رشد زایشی نشان داد. هم‌چنین تنش شدید در کل دوره رشد و دوره‌های رشد رویشی و زایشی بیش‌ترین درصد نشت الکترولیت‌ها را داشتند و این موضوع بیانگر عدم تحمل این گیاه نسبت به این

منابع

- بصری، م.، قمرنیا، ه. و قبادی، م. ۱۳۹۹. اثر شدت‌های مختلف کم‌آبی و شوری بر رشد برگ، ساقه و ریشه گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.). مجله مدیریت آب و آبیاری، ۱۰ (۱): ۱-۱۴.
- علیپور، س.، نصیبی، ف. و فرهمند، ه. ۱۳۹۳. بررسی اثر غلظت‌های متفاوت سدیم نیتروپروساید بر صفات فیزیولوژیکی و افزایش عمر گل شاخه بریده مریم (*Polianthes tuberosa* L.). مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)، ۲۷: ۹۱۴-۹۰۴.
- سارانی ملاک، م.، اله دو، م.، مهرآوران، ل. و پیری، ح. ۱۴۰۱. تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری روی صفات فیزیولوژی و بیوشیمیایی گیاه داروئی خارمریم (*Silybum marianum*). مجله تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک، ۱ (۴): ۱۲۷-۱۱۳.
- سهیلی موحد، س.، اسماعیلی، م.، ع.، جباری، ف.، خرم‌دل، س. و فولادی، ع. ۱۳۹۶. تأثیر کمبود آب بر محتوای نسبی آب برگ، شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و عملکرد دانه چهار رقم لوبیا چیتی. نشریه تولید گیاهان زراعی، ۱۰ (۱): ۱۹۰-۱۶۹.
- فلاح ایمانی، ا.، گماریان، م.، قربان پور، م.، رامک، پ. و چاوشی، س. ۱۴۰۱. بررسی تغییرات مورفولوژیکی و فیتوشیمیایی اسانس گیاه (*Salvia mirzayanii* L.) در شرایط خشکی و نانو سدیم اکساید. فصلنامه اکوفیتوشیمی گیاهان داروئی، ۳۸: ۴۰-۱۷.

کافی، م.، برزوئی، ا.، صالحی، م.، کمندی، ع.، معصومی، ع. و نباتی، ج. ۱۳۸۸. فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. چاپ اول. ۵۰۲ صفحه.

- Abdi, N., Biljon, A., Steyn, C. and Labuschagne, M.T. 2021. Bread wheat (*Triticum aestivum*) responses to arbuscular mycorrhizae inoculation under drought stress conditions. *Plants*, 10 (9): 1-13.
- Abedini, M. and Daie-Hassani, B. 2015. Salicylic acid affects wheat cultivars antioxidant system under saline and nonsaline condition. *Russian Journal of Plant Physiology*, 62: 604-610.
- Abrishamchi, P., Ganjeali, A. and Sakeni, H. 2012. Evaluation of morphological traits, proline content and antioxidant enzymes activity in chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Pulses Research*, 3 (2): 17-30.
- Ahmadi, H., Babalar, M., Askary Sarcheshmeh, M. A., Morshedloo, M. R. and Shokrpour, M. 2020. Effects of exogenous application of citrulline on prolonged water stress damages in hyssop (*Hyssopus officinalis* L.): Antioxidant activity, biochemical indices, and essential oils profile. *Food Chemistry*, 333: 1-24.
- Amoah, J. N., Ko, C. S., Yoon, J. S. and Weon, S. Y. 2019. Effect of drought acclimation on oxidative stress and transcript expression in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Interactions*, 14 (1): 492-505.
- Aziz, A., Akram, N. A. and Ashraf, M. 2018. Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants under water deficit regimes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 123: 192-203.
- Babaei, K., Moghaddam, M., Farhadi, N. and Ghasemi Pirbalouti, A. 2021. Morphological, physiological and phytochemical responses of Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 284: 1-9.
- Bahrololoumi, S. M. J., Raeini Sarjaz, M. and Pirdashti, H. 2019. The effect of drought stress on the activity of enzymatic antioxidants, malondialdehyde levels, soluble protein and total nitrogen of soybean leaf (*Glycine max* L.). *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 12 (1): 12-28.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39: 205-207.
- Beauchamp, C. and Fridovich, I. 1971. Superoxide dismutase improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44 (1): 276-287.
- Behera, S. K. and Panda, R. K. 2009. Integrated management of irrigation water and fertilizer for wheat crop using field experiments and simulation modeling. *Agricultural Water Management*, 96: 1532-1540.
- Besharati, J., Shirmardi, M., Meftahizadeh, H., Dehestani Ardakani, M. and Ghorbanpour, M. 2021. Changes in growth and quality performance of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in response to soil amendments with hydrogel and compost under drought stress. *South African Journal of Botany*, Article in Press. DOI:10.1016/j.sajb.2021.03.018.
- Boszormenyi, A., Hethelyi, E., Farkas, A., Horvath, G., Papp, N., Lemberkovics, E. and Szoke, E. 2009. Chemical and genetic relationships among sage (*Salvia officinalis* L.) cultivars and judean sage (*Salvia judaica* Boiss.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57: 4663-4667.
- Bradford, M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitative estimation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Annals of Chincial Biochemistry*, 72: 248-254.
- Buysse, J. and Merckx, R. 1993. An improved colorimetric method to quantify sugar content of plant tissue. *Journal of Experimental Botany*, 44: 1627-1629.
- Chawla, J., Zhu, C., Li, L., Sun, Z. and Pan, X. 2013. Effects of exogenous salicylic acid on growth and H₂O₂ metabolizing enzymes in rice seedlings under lead stress. *Journal of Environmental Sciences*, 191: 44-49.
- Chiappero, J., Rosario Cappellari, L., Sosa Alderete, L. G., Palemo, T. B. and 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: 1-9.
- Crusciol, C. A. C., Pulz, A. L., Lemos, L. B., Soratto, R. P. and Lima, G. P. P. 2009. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. *Crop Science*, 49: 949-954.
- Cvikrova, M., Gemperlova, L., Martincova, O. and Vankova, R. 2013. Effect of drought and combined drought and heat stress on polyamine metabolism in proline-over-producing tobacco plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 73: 7-15.
- Daryanto, S., Wang, L. and Jacinthe, P. A. 2017. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*, 179: 18-33.
- Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P. and Thorpe, A. 1981. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, 32: 93-101.
- Elewa, T. A., Sadak, M. S. and Dawood, M. G. 2017. Improving drought tolerance of quinoa plant by foliar treatment of trehalose. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19 (Special Issue): 245-254.
- Elsayed, A. I., Elhamahmy, M. A. M., Rafudeen, M., Mohamed, A. H. and Omar, A. A. 2019. The impact of drought stress on antioxidant responses and accumulation of flavonolignans in milk thistle (*Silybum marianum* L Gaertn). *Plants*, 8 (12): 611-625.
- Fghire, R., Ali, O. I., Anaya, F., Benlhabib, O., Jacobsen, S. E. and Wahbi, S. 2013. Protective antioxidant enzyme activities are affected by drought in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 3 (4): 62-68.

- Farooq, M., Basra, S. M. A., Wahid, A. and Rehman, H. 2009. Exogenously applied nitric oxide enhances the drought tolerance in fine grain aromatic rice. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195: 254-261.
- Farooq, M., Ahmad, R., Shahzad, M., Sajjad, Y., Hassan, A., Maroof Shah, M., Naz, Naz, S. and Ali Khan, S. 2021. Differential variations in total flavonoid content and antioxidant enzymes activities in pea under different salt and drought stresses. *Scientia Horticulturae*, 287: 1-8.
- Gan, L., Wu, X. and Zhong, Y. 2015. Exogenously applied nitric oxide enhances the drought tolerance in hullless barley. *Plant Production Science*, 18: 52-56.
- Ghorbani, A. and Esmailzadeh, M. 2017. Pharmacological properties of *Salvia officinalis* and its components. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 7: 433-440.
- Gill, S. S. and Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48: 909-930.
- Grdisa, M., Jug-dujakovic, M., Loncaric, M., Carovic-Stanko, K., Nincevic, T., Liber, Z., Radosavljevic, I. and Satovic, Z. 2015. Dalmatian Sage (*Salvia officinalis* L.): A review of biochemical contents, medical properties and genetic diversity. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 80: 69-78.
- Gomes, F. P., Oliva, M. A., Mielke, M. S., Almeida, A. A. F. and Aquino, L. A. 2010. Osmotic adjustment, proline accumulation and cell membrane stability in leaves of *Cocos nucifera* submitted to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 126 (3): 379-384.
- Gupta, P., Vasudev, S., Yadav, D.K. and Dash, P. 2021. Ex-foliar application of glycine betaine and its impact on protein, carbohydrates and induction of ROS scavenging system during drought stress in flax (*Linum usitatissimum*). *Journal of Biotechnology*, 337 (20): 80-89.
- Hasan, M., Ma, F., Prodhon, Z., Li, F., Shen, H., Chen, Y. and Wang, X. 2018. Molecular and physio-biochemical characterization of cotton species for assessing drought stress tolerant. *International Journal of Molecular Sciences*, 19 (9): 26-36.
- Holy, M. C. 1972. Indole acetic acid oxidase: a dual catalytic enzyme. *Journal of Plant Physiology*, 50: 15-18.
- Hosseini, M. S., Samsampour, D., Ebrahimi, M., Abadla, J. and Khanahmadi, M. 2018. Effect of drought stress on growth parameters, osmolyte contents, antioxidant enzymes and glycyrrhizin synthesis in licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) grown in the field. *Phytochemistry*, 156: 124-134.
- Hou, J., Huang X., Sun, W., Du, C., Wang, C., Xie Y., Ma, Y. and Ma, D. 2018. Accumulation of water-soluble carbohydrates and gene expression in wheat stems correlates with drought resistance. *Journal of Plant Physiology*, 231: 182-191.
- Jahani, F., Tohidi-Moghadam, H. R., Larijani, H. R., Ghooshchi, F. and Oveysi, M. 2021. Influence of zinc and salicylic acid foliar application on total chlorophyll, phenolic components, yield and essential oil composition of peppermint (*Mentha piperita* L.) under drought stress condition. *Arabian Journal of Geosciences*, 14 (8): 1-12.
- Jungklang, J. and Saengnil, K. 2012. Effect of paclobutrazol on *Patumma* cv. Chiang Mai Pink under water stress. *Songklanakarin Journal Science Technology*, 34: 361-366.
- Jungklang, J., Saengnil, K. and Uthaiutra, J. 2017. Effects of water-deficit stress and paclobutrazol on growth, relative water content, electrolyte leakage, proline content and some antioxidant changes in *Curcuma alismatifolia* Gagnep. cv. Chiang Mai Pink. *Saudi Journal Biological Sciences*, 24: 1505-1512.
- Kai, Y. 2011. Effect of drought stress on physiological and biochemical characteristics of sweet potato in different habitats. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 4: 59-69.
- Kamali, M., Kharazi, S. M., Selahvarzi, Y. and Tehranifar, A. 2012. Effect of salicylic acid on growth and some morphophysiological characteristics of *Gomphrena* (*Gomphrena globosa* L.) under salinity stress. *Journal of Horticultural Science*, 26 (1): 104-112.
- Karimi, S., Zahedi, B. and Mumivand, H. 2020. Evaluation of the effect of drought stress on growth, essential oil and some physiological traits of four Basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivars. *Journal of Plant Production Research*, 27 (2): 201-213.
- Keshavarz Mirzamohammadi, H., Modarres-Sanavy, S. A. M., Sefidkon, F., Mokhtassi-Bidgoli, A. and Mirjalili, M. H. 2021. Irrigation and fertilizer treatments affecting rosmarinic acid accumulation, total phenolic content, antioxidant potential and correlation between them in peppermint (*Mentha piperita* L.). *Irrigation Science*, 39: 671-683.
- Khalvandi, M., Siosemardeh, A., Roohi, E. and Keramati, S. 2021. Salicylic acid alleviated the effect of drought stress on photosynthetic characteristics and leaf protein pattern in winter wheat. *Heliyon*, 7 (1): 1-11.
- Khosrowshahi, Z. H., Ghassemi-Golezani, K., Salehi-Lisar, S. V. and Motafakkerazad, R. 2020. Changes in antioxidants and leaf pigments of saflower (*Carthamus tinctorius* L.) affected by exogenous spermine under water deficit. *Biologia Futura Journal*, 2 (12): 66-82.
- Koocheki, A., Mokhtari, V., Taherabadi, S. H. and Kalantari, S. 2011. The effect of water stress on yield, yield components and quality characteristics of *Plantago ovata* and *Plantago psyllium*. *Journal of Water and Soil*, 25 (3): 565-569.
- Liang, Y., Wei, G., Ning, K., Li, M., Zhang, G., Luo, L., Zhao, G., Wei, J., Liu, Y., Dong, L. and Chen, S. 2021. Increase in carbohydrate content and variation in microbiome are related to the drought tolerance of *Codonopsis pilosula*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165: 19-35.
- Liu, Y., Zhang, P., Li, M., Chang, L., Chang, L., Cheng, H., Chai, S. and Yang, D. 2020. Dynamic responses of accumulation and remobilization of water soluble carbohydrates in wheat stem to drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 155: 262-270.

- Lotfi, M., Abbaszadeh, B. and Mirza, M. 2014. The effect of drought stress on morphology, proline content and soluble carbohydrates of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants, 30 (1): 19-28.
- Masoudi-Sadaghiani, F., Abdollahi- Mandoulakani, B., Zardoshti, M. R., Rasouli-Sadaghiani, M. H. and Tavakoli, A. 2011. Response of proline, soluble sugars, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in potato (*Solanum tuberosum* L.) to different irrigation regimes in greenhouse condition. Australian Journal of Crop Science, 5 (1): 55-60.
- Meher, P., Shivakrishna, P., Ashok Reddy, K. and Maohar D. 2018. Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. Saudi Journal of Biological Sciences, 25 (2): 285-289.
- Miller, G. A. D., Suzuki, N., Ciftci- Yilmaz, S. U. L. T. A. N. and Mittler, R. O. N. 2010. Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. Plant, Cell and Environment, 33 (4): 453-467.
- Miranda-Apodaca, J., Yoldi-Achalandabaso, A., Aguirresarobe, A., Del-Canto, A. and Pérez-López, U. 2018. Similarities and differences between the responses to osmotic and ionic stress in quinoa from a water use perspective. Agricultural Water Management, 203: 344-352.
- Moussa, H. and Abdel-Aziz, S. M. 2008. Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress. Australian Journal of Crop Science, 1 (1): 31-36.
- Mumivand, H., Ebrahimi, A., Morshedloo, M. R. and Shayganfar, A. 2021. Water deficit stress changes in drug yield, antioxidant enzymes activity and essential oil quality and quantity of Tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). Industrial Crops and Products, 164: 1-14.
- Munawar, A., Akram, N. A., Ahmad, A. and Ashraf, M. 2019. Nitric oxide regulates oxidative defense system, key metabolites and growth of broccoli (*Brassica oleracea* L.) plants under water limited conditions. Scientia Horticulturae, 254: 7-13.
- Naeemi, M., Ali Akbari, G., Shirani Rad, A. H., Hassanloo, T. and Akbari, G. 2012. Effect of zeolite application and selenium spraying on water relations traits and antioxidant enzymes in medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) under water deficit stress conditions. Journal of Crops Improvement, 14 (1): 67-81.
- Pirzad, A., Shakiba, M. R., ZehtabSalmasi, S., Mohammadi, S. A., Darvishzadeh, R. and Samadi, A. 2011. Effect of water stress on leaf relative water content, chlorophyll, proline and soluble carbohydrates in *Matricaria chamomilla* L. Journal of Medicinal Plants Research, 5 (12): 2483-2488.
- Rahbarian, R., Khavari-Nejad, R., Ganjeali, A., Bagheri A. R. and Najafi, F. 2011. Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. Acta Biologica Cracoviensia, 53: 47-56.
- Rahdari, P., Hosseini, S. M. and Tavakoli, S. 2012. The studying effect of drought stress on germination, proline, sugar, lipid, protein and chlorophyll content in purslane (*Portulaca oleracea* L.) leaves. Journal of Medicinal Plants Research, 6 (9): 1539-1547.
- Rastisani, M. S., Lahouti, M. and Gangeali, A. 2014. Effects of drought stress on morpho-physiological and chlorophyll fluorescence of seedlings of red beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Iranian Journal of Pulse Crops, 5 (1): 103-116.
- Ritchie, S. and Nguyen, H. 1990. Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotype differing in drought resistance. Crop Science, 30: 105-111.
- Sami, F., Yousuf, M., Faizan, M., Faraz, A. and Hayat, S. 2016. Role of sugars under abiotic stress. Plant Physiology and Biochemistry, 109: 57-61.
- Sanchez-Rodriguez, E., Rubio-Wilhelmi, M., Cervilla, L. M., Blasco, B., Rios, J. J., Rosales, M. A., Romero, L. and Ruiz, J. M. 2010. Genotypic differences in some physiological parameters symptomatic for oxidative stress under moderate drought in tomato plant. Plant Science, 178: 30-40.
- Shabbir, R. N., Waraich, E. A., Ali, H., Nawaz, F., Ashraf, M. Y., Ahmad, R., Awan, M. I., Ahmad, S., Irfan, M., Hussian, S. and Ahmad, Z. 2016. Supplemental exogenous NPK application alters biochemical processes to improve yield and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). Environmental Science and Pollution Research, 23: 2651-2662.
- Shamsi, K. 2010. The effects of drought stress on yield, relative water content, proline, soluble carbohydrates and chlorophyll of bread wheat cultivars. Journal of Animal and Plant Sciences, 8 (3): 1051-1060.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S. and Pessarakli, M. 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. Journal of Botany, 10: 37-53.
- Soares, C., Carvalho, M. E. A., Azevedo, R. A. and Fidalgo, F. 2019. Plants facing oxidative challenges-a little help from the antioxidant networks. Environmental and Experimental Botany, 61: 4-25.
- Song, Q., Liu, C., Bachir, D. G., Chen, L. and Hu, Y. G. 2017. Drought resistance of new synthetic hexaploid wheat accessions evaluated by multiple traits and antioxidant enzyme activity. Field Crops Research, 210: 91-103.
- Talukdar, D. 2013. Selenium priming selectively ameliorates weed-induced phytotoxicity by modulating antioxidant defense components in Lentil (*Lens culinaris* Medik.) and Grass Pea (*Lathyrus sativus* L.). Annual Research and Review in Biology, 3: 195-212.
- Valentovic, P., Luxova, M., Kolarovic, L. and Gasparikova, O. 2006. Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and water relations in two maize cultivars. Plant Soil Environment, 52 (4): 186-191.

Effect of Water Deficit Stress at Vegetative and Reproductive Stages on Some Physiological and Biochemical Characteristics of Sage (*Salvia officinalis* L.)

Izadi^{1*}, Z.

Abstract

In order to study the effect of water deficit stress at vegetative and reproductive stages on activity of some antioxidant enzymes, accumulation of compatible osmolytes, relative water content and yield in sage (*Salvia officinalis* L.), a field experiment was conducted a randomized complete block design with three replications at the Experimental Field of the Hamedan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center during 2020. Treatments were irrigation levels based on maximum allowable depletion of available soil water and their combination that considered for both vegetative and reproductive stages, so that 35% maximum water depletion as the control and 60% and 85% as water deficit stress levels were applied as moderate and severe stress, respectively during the plant growth. Also, 60% and 85% at vegetative stage, 60% and 85% at reproductive stage as well as vegetative and reproductive control were considered. The results showed that, the highest superoxide dismutase activity belonged to moderate and severe stress at complete and vegetative growth stages. The highest catalase activity were obtained from moderate and severe stress at reproductive stage and highest peroxidase activity from severe stress at vegetative and reproductive growth stages. Leaf relative water content was reduced under water deficit stress, while the amount of proline and electrolyte leachage percentage were increased. Control treatment showed the highest biological yield (14700 kg.ha⁻¹). Also the highest amount of protein was obtained from the control, moderate stress at the complete and vegetative and reproductive growth stages. The greatest percentage of soluble carbohydrate were belonged to moderate stress at the complete and reproductive growth stage.

Keywords: Proline, Electrolyte leachage percentage, Superoxide dismutase, Biological yield, Leaf relative water content

1. Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences and Engineering, Nahavand Higher Education Complex, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

*: Corresponding author Email: z.izadi@basu.ac.ir