



Investigation of physiological and biochemical mechanisms in caper (*Capparis spinosa* L.) genotypes in response to drought stress extracts

Zahra Radmanesh^{1,2}, Farid Shekari^{1*}, Mohammad Hassan Assareh¹
², Bernardo Pascual Espana³

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Seed and Plant Certification and Registration Institute, Karaj - Iran

3. Department of Plant Production- Universitat De Valencia, Valencia – Spain

ARTICLE INFO

Article history

Submitted: 2026-2-27

Revised: 2026-5-10

Accepted: 2026-5-16

KEYWORDS

Proline, polyethylene glycol, oxidative stress, antioxidant capacity, chlorophyll.

ABSTRACT

In order to evaluate the physiological and biochemical responses of different ecotypes of caper (*Capparis spinosa* L.) to osmotic stress, an experiment was conducted under laboratory conditions in 2023 at the Seed Quality Analysis Laboratory of the Seed and Plant Certification and Registration Research Institute, Karaj, Iran, using a completely randomized design with three replications. In this study, seeds of nine native caper ecotypes collected from Ardabil Province (Moghan), Alborz Province (Karaj), Ilam Province (Mehran), North Khorasan Province (Bojnord), Kermanshah Province (Dalahoo), and Khuzestan Province (Ramhormoz, Hendijan, Mahshahr, and Ahvaz) were evaluated. Osmotic stress was imposed using polyethylene glycol (PEG 6000) at an osmotic potential of -6 bar. The results indicated that osmotic stress significantly increased malondialdehyde content from approximately 6.5 to 11.3 nmol g⁻¹ FW and hydrogen peroxide from 3.1 to 6.0 μmol g⁻¹ FW, while total chlorophyll content decreased from 0.35 to 0.21 mg g⁻¹ FW. In contrast, proline content (12.7–45.8 μg g⁻¹ FW), total phenolic content (2.6–3.6 mg gallic acid g⁻¹ FW), and antioxidant capacity (38–47% DPPH inhibition) showed significant increases under osmotic conditions. Comparison of ecotypes showed that under non-stress conditions, the Karaj and Moghan ecotypes exhibited better physiological performance than the other ecotypes due to higher levels of photosynthetic pigments and lower levels of oxidative stress indicators. In contrast, under osmotic stress conditions, the Mahshahr and Hendijan ecotypes were identified as drought-tolerant ecotypes because they showed the lowest oxidative damage indices and the highest accumulation of protective compounds. Overall, the results indicate the key role of the antioxidant system and osmotic regulation in the adaptation of caper plants to drought conditions.

* Corresponding author: *Farid Shekari*

✉ E-mail: shekari@znu.ac.ir



بررسی سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های گیاه دارویی

کبر (*Capparis spinosa* L.) در پاسخ به تنش اسمزی

زهرا رادمنش^۱، فرید شکاری^{۱*}، محمدحسن عصاره^۲، برناردو پاسکال اسپانا^۳

۱. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲. مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، کرج، ایران

۳. گروه تولید گیاه، دانشگاه والنسیا، والنسیا، اسپانیا

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴-۱۲-۸

بازنگری: ۱۴۰۵-۲-۲۰

پذیرش: ۱۴۰۵-۲-۲۶

واژگان کلیدی:

پرویلین، پلی‌اتیلن گلیکول، تنش اکسیداتیو، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، کلروفیل

چکیده: به‌منظور ارزیابی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی اکوتیپ‌های مختلف گیاه دارویی کبر (*Capparis spinosa* L.) به تنش اسمزی، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال کرج اجرا گردید. در این مطالعه، بذره‌های متعلق به نه اکوتیپ بومی کبر شامل استان اردبیل (مغان)، استان البرز (کرج)، استان ایلام (مهران)، استان خراسان شمالی (بجنورد)، استان کرمانشاه (دالاهو) و استان خوزستان (رامهرمز، هندیجان، ماهشهر و اهواز) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تنش اسمزی با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ در سطح پتانسیل اسمزی ۶- بار اعمال گردید. نتایج نشان داد که تنش اسمزی موجب افزایش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید از حدود ۶/۵ به ۱۱/۳ نانومول بر گرم وزن تر و پراکسید هیدروژن از ۳/۱ به ۶/۰ میکرومول بر گرم وزن تر گردید، در حالی‌که کلروفیل کل از ۰/۳۵ به ۰/۲۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر کاهش یافت. در مقابل، محتوای پرویلین (۱۲/۷ تا ۴۵/۸ میکروگرم بر گرم وزن تر)، فنل کل (۲/۶ تا ۳/۶ میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن تر) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی (۳۸ تا ۴۷ درصد مهار DPPH) افزایش معنی‌داری نشان دادند. مقایسه اکوتیپ‌ها نشان داد که در شرایط بدون تنش، اکوتیپ‌های کرج و مغان با داشتن مقادیر بالاتر رنگیزه‌های فتوسنتزی و سطوح پایین‌تر شاخص‌های تنش اکسیداتیو نسبت به سایر اکوتیپ‌ها عملکرد فیزیولوژیکی مطلوب‌تری نشان دادند، در حالی‌که تحت تنش اسمزی اکوتیپ‌های ماهشهر و هندیجان با دارا بودن کم‌ترین شاخص‌های آسیب اکسیداتیو و بیش‌ترین تجمع ترکیبات حفاظتی به‌عنوان اکوتیپ‌های متحمل معرفی شدند. به‌طور کلی، نتایج بیانگر نقش کلیدی سیستم آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اسمزی در سازگاری گیاه کبر به شرایط خشکی می‌باشد.

*نویسنده مسئول: فرید شکاری



مقدمه

و نواحی خشک غرب و مرکز آسیا گزارش شده است. کبر به دلیل سازگاری بالا با دماهای زیاد، تابش شدید نور و بارندگی محدود، به عنوان گونه‌ای مناسب برای کشت در اکوسیستم‌های کم‌آب مطرح شده است (Radmanesh et al., 2025). اندام‌های مختلف این گیاه، به‌ویژه غنچه‌های گل، میوه‌های نارس و شاخساره‌های جوان، دارای کاربرد گسترده غذایی و دارویی بوده و به دلیل ارزش اقتصادی بالا، در برخی منابع از آن به عنوان «خاویار گیاهی» یاد شده است (آروین و فیروزه، ۱۴۰۲).

اهمیت دارویی گیاه کبر عمدتاً به حضور ترکیبات زیست‌فعال نظیر پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها، آلکالوئیدها و سایر متابولیت‌های ثانویه نسبت داده می‌شود که دارای فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی، ضد دیابتی، محافظت‌کننده کبد و ضد میکروبی هستند (Alsharif & Boylan, 2025). مطالعات فارماکولوژیک نشان داده‌اند که این گیاه در پیشگیری و درمان طیف وسیعی از بیماری‌ها از جمله دیابت، اختلالات

ایران به دلیل تنوع اقلیمی گسترده و شرایط جغرافیایی ویژه، یکی از غنی‌ترین مراکز تنوع زیستی گیاهان در جهان به شمار می‌رود و از نظر تنوع گیاهان دارویی جایگاه برجسته‌ای دارد. گزارش‌ها نشان می‌دهد بیش از ۸۰۰۰ گونه گیاهی در مناطق مختلف ایران شناسایی شده‌اند که از این میان حدود ۲۴۰۰ گونه دارای ارزش‌های دارویی، معطر، ادویه‌ای، آرایشی و بهداشتی هستند (مهرنیا و حسینی، ۱۴۰۳). این تنوع ژنتیکی غنی، ظرفیت قابل توجهی را برای بهره‌برداری پایدار از گیاهان دارویی و توسعه صنایع داروسازی، غذایی و آرایشی-بهداشتی فراهم ساخته است (مجرد آشناباد و محبی، ۱۴۰۴). در میان این گونه‌ها، گیاه دارویی کبر (*Capparis spinosa* L.) متعلق به خانواده Capparaceae، به‌عنوان یکی از گونه‌های ارزشمند مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود (Yousefi et al., 2025). این گیاه درختچه‌ای چندساله، خزان‌کننده و مقاوم به شرایط نامساعد محیطی بوده و خاستگاه اصلی آن مناطق مدیترانه‌ای

بررسی سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های گیاه دارویی کبر (*Capparis spinosa* L.) ... / رادمنش، شکاری، عصاره، پاسکال

بروز تنش اکسیداتیو در سلول‌های گیاهی است. تجمع بیش از حد این رادیکال‌ها موجب پراکسیداسیون لیپیدها، تخریب غشاهای سلولی، کاهش پایداری رنگیزه‌های فتوسنتزی و اختلال در عملکرد آنزیم‌ها می‌شود (Afshari et al., 2022). گیاهان برای مقابله با این شرایط، مجموعه‌ای از سازوکارهای دفاعی شامل تنظیمات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را فعال می‌کنند. در این میان، تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی شامل افزایش سنتز ترکیبات فنلی، فلاونوئیدها، تجمع اسمولیت‌هایی نظیر پرولین و فعال‌سازی سیستم‌های خنثی‌کننده رادیکال‌های آزاد، نقش اساسی در حفظ یکپارچگی سلولی و افزایش تحمل به خشکی ایفا می‌کند (Tan & Gören, 2024). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تنش خشکی موجب کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل a و b در گیاهان دارویی مختلف شده که این امر عمدتاً ناشی از افزایش تنش اکسیداتیو و تخریب رنگدانه‌ها است (Afshari et al., 2022; Mizani et al., 2025). هم‌چنین گزارش‌ها بیانگر

کبدی، بیماری‌های پوستی، روماتیسم و اختلالات عصبی نقش مؤثری ایفا می‌کند (Shahrajabian et al., 2021). افزون بر این، مقاومت طبیعی کبر به تنش‌های محیطی، آن را به گزینه‌ای مناسب برای توسعه کشاورزی پایدار در شرایط تغییر اقلیم تبدیل کرده است (Radmanesh et al., 2025).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد و تولید گیاهان محسوب می‌شود. کاهش بارندگی و افزایش تبخیر-تعرق منجر به کاهش پتانسیل آب خاک و اختلال در وضعیت آبی گیاه شده و در نتیجه تعادل بین جذب و از دست دادن آب برهم می‌خورد (Mizani et al., 2025). تداوم کمبود آب موجب اختلال در فرآیندهای اساسی فیزیولوژیکی نظیر فتوسنتز، تعرق، تقسیم سلولی و فعالیت‌های متابولیکی شده و در نهایت رشد و عملکرد گیاه را به شدت کاهش می‌دهد (Wahab et al., 2022). یکی از پیامدهای اصلی تنش خشکی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و

سطوح مختلف تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش

طرح آزمایشی و مواد گیاهی

به منظور ارزیابی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های گیاه دارویی کبر به تنش اسمزی، آزمایشی در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی در سال ۱۴۰۲ در آزمایشگاه تجزیه کیفی بذر مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال کرج انجام شد. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار اجرا گردید. در این مطالعه، بذره‌های متعلق به نه اکوتیپ بومی کبر شامل استان اردبیل (مغان)، استان البرز (کرج)، استان ایلام (مهران)، استان خراسان شمالی (بجنورد)، استان کرمانشاه (دالاهو) و استان خوزستان (رامهرمز، هندیجان، ماهشهر و اهواز) مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۱). به منظور شبیه‌سازی تنش اسمزی در شرایط آزمایشگاهی، از پلی اتیلن گلیکول با وزن مولکولی ۶۰۰۰ (PEG-6000) استفاده شد. با توجه به حجم بالای داده‌ها و تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش، تنها یک سطح تنش اسمزی انتخاب شد

تغییرات وابسته به گونه در تجمع ترکیبات فنلی تحت تنش خشکی بوده، به طوری که افزایش یا کاهش پلی فنول‌ها در گیاهانی مانند علف لیمو مشاهده شده است (Król et al., 2014). افزون‌براین، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و فعالیت آنزیم‌های دفاعی نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز به عنوان یکی از مهم‌ترین سازوکارهای سازگاری گیاهان دارویی در برابر تنش خشکی گزارش شده است (Gorzi et al., 2017).

با وجود اهمیت اکولوژیک و دارویی گیاه کبر و سازگاری ذاتی آن با شرایط کم‌آبی، اطلاعات علمی محدودی درباره سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی دخیل در تحمل تنش خشکی در این گونه وجود دارد. شناخت این پاسخ‌ها می‌تواند نقش مهمی در تبیین مکانیسم‌های مقاومت به خشکی و بهره‌برداری هدفمند از این گیاه در سامانه‌های کشاورزی مناطق خشک داشته باشد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مرتبط با سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی اکوتیپ‌های مختلف گیاه دارویی کبر در

مناسب شکست خواب (خیساندن در آب مقطر) بر روی آن‌ها اعمال گردید. کشت بذرها به روش بین کاغذ انجام شد و نمونه‌ها به مدت ۳۰ روز در اتاق رشد تحت شرایط کنترل شده شامل دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در دوره روشنایی (۱۶ ساعت) و ۲۰ درجه سانتی‌گراد در دوره تاریکی (۸ ساعت)، شدت نور ۳۲۴ میکرومول فوتون بر متر مربع بر ثانیه و رطوبت نسبی ۸۰ درصد نگهداری شدند. در پایان دوره جوانه‌زنی، گیاهچه‌های نرمال انتخاب شده و جهت ارزیابی شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی مورد بررسی قرار گرفتند.

که بر اساس مطالعات و منابع علمی پیشین تعیین گردید. تیمارهای تنش شامل دو سطح پتانسیل اسمزی، شاهد (صفر) و تنش اسمزی (۶- بار) القاشده با محلول PEG-6000 (معادل ۲۲۳/۶۶ گرم در لیتر آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) بودند (Michel & Kaufmann, 1973). پیش از کشت، بذرها به‌منظور جلوگیری از آلودگی‌های میکروبی، ابتدا به مدت ۵ دقیقه در اتانول ۷۰ درصد و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در محلول هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد ضدعفونی شدند. پس از آن، بذرها سه مرتبه با آب مقطر استریل شستشو داده شده و تیمارهای

جدول ۱- پراکنش جغرافیایی اکوتیپ گیاه کبر در مناطق منتخب ایران

کد اکوتیپ	نام اکوتیپ	استان	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	طبقه‌بندی اقلیم
E1	مغان	اردبیل	39° 20' 41.88" N	47° 30' 23.04" E	نیمه‌گرمسیری ی
E2	هندیجان	خوزستان	30° 14' 24" N	49° 42' 36" E	گرمسیری
E3	اهواز	خوزستان	31° 21' 0" N	48° 45' 0" E	گرمسیری تابستان
E4	مهران	ایلام	33° 7' 19.92" N	46° 9' 52.56" E	معتدل و زمستان سرد
E5	ماهشهر	خوزستان	30° 32' 44.88" N	49° 10' 49.08" E	گرمسیری

تابستان معتدل و زمستان سرد	57° 18' 51.48" E	37° 28' 12.72" N	خراسان شمالی	بجنورد	E6
گرمسیری	49° 36' 23.04" E	31° 16' 41.88" N	خوزستان	رامهرمز	E7
تابستان معتدل و زمستان سرد	64° 35' 23.04" E	43° 46' 41.88" N	کرمانشاه	دالاهو	E8
تابستان معتدل و زمستان سرد	50° 58' 12" E	35° 49' 12" N	البرز	کرج	E9

درصد تیوباربیتوریک اسید (TBA) اضافه گردید. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بلافاصله در یخ، سرد شد. سپس نمونه‌ها مجدداً به مدت پنج دقیقه سانتریفیوژ شدند. ماده قرمز رنگ مالون‌دی‌آلدهید-تیوباربیتوریک اسید تولید شده، در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتوفتومتر (Spectronic 20، ساخت شرکت Milton Roy، آمریکا) اندازه‌گیری شد. تعیین غلظت مالون‌دی‌آلدهید از ضریب خاموشی معادل $(\epsilon=155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1})$ بر حسب نانومول بر گرم بافت تازه محاسبه شد.

سنجش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

کل (DPPH)

سنجش میزان مالون‌دی‌آلدهید

(MDA)

برای سنجش پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء، غلظت مالون‌دی‌آلدهید به‌عنوان محصول پراکسیده شدن اسیدهای چرب غشاء به روش ارائه شده توسط Hichem و Mounir (۲۰۰۹) اندازه‌گیری شد. به‌طور خلاصه، در ابتدا ۰/۱۵ گرم از بافت تازه خرد شده و به آن تری‌کلرو استیک اسید (TCA) ۲۰ درصد اضافه شد. عصاره به‌دست آمده به مدت ۲۰ دقیقه با دستگاه سانتریفیوژ در دور ۲۰۰۰۰ در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. سپس، به ۰/۸ میلی‌لیتر از محلول رویی، یک میلی‌لیتر محلول ۲۰ درصد TCA حاوی ۰/۵

میکرولیتر بافر فسفات ۱۰ میلی‌مولار و ۵۰۰ میکرولیتر محلول پتاسیم‌یدید یک مولار اضافه و میزان جذب در طول موج ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. محتوی پراکسید هیدروژن با کمک منحنی استاندارد سنجیده شد و به‌صورت میکرومول بر گرم وزن تر گزارش گردید (Sergiev et al., 1997).

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل و

کاروتنوئید

به‌منظور اندازه‌گیری محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، مقدار ۰/۱ گرم از بافت تازه گیاهچه به‌طور دقیق توزین شده و در هاون چینی حاوی ۱ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد سرد کاملاً همگن گردید. عصاره حاصل به‌منظور استخراج کامل رنگیزه‌ها در شرایط تاریکی تهیه شده و سپس جهت حذف ذرات جامد به مدت ۱۰ دقیقه در دور $10000 \times g$ سانتریفیوژ شد. محلول رویی شفاف برای قرائت جذب نوری مورد استفاده قرار گرفت. جذب نوری عصاره استخراج‌شده با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه، از طریق خاصیت خنثی‌کنندگی رادیکال آزاد با استفاده از روش ارائه شده توسط Mounir و Hichem (۲۰۰۹) تعیین شد. برای این منظور، به ۳۰۰ میکرولیتر از عصاره استخراجی متانولی، ۲ میلی‌لیتر محلول ۰/۱ میلی‌مولار DPPH اضافه گردید و به مدت ۲۰ دقیقه در شرایط تاریکی نگهداری شد. سپس میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر قرائت گردید. ظرفیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها به‌صورت درصد بازدارندگی DPPH با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{DPPH (\%)} = [(Ac - Ae) / Ac] \times 100 \quad (1)$$

که Ac و Ae به ترتیب مقادیر جذب کنترل و عصاره می‌باشند.

سنجش میزان پراکسید-

هیدروژن (H_2O_2)

برای سنجش محتوی پراکسید هیدروژن، ۰/۱۵ گرم از نمونه با یک میلی‌لیتر TCA ۰/۲ درصد سائیده شد و مخلوط هموزن در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۲۰۰۰۰g، به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس ۵۰۰ میکرولیتر از محلول رویی به ۵۰۰

به شدت تکان داده شد تا پرولین وارد فاز تولوئن شود. سرانجام بعد از ۲۰ دقیقه، میزان جذب محلول‌های استاندارد پرولین و نمونه‌ها در طول موج ۵۱۵ نانومتر اندازه‌گیری شد و بر اساس میکروگرم پرولین در میلی‌گرم وزن تر گزارش گردید.

سنجش محتوای فنل کل

ارزیابی محتوای فنل کل با روش Folin-Ciocalteu برگرفته از روش Mishra و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد. در این روش ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره متانولی استخراج شده و استانداردها را با ۲۰۰ میکرولیتر معرف فولین مخلوط کرده و پس از ۵ دقیقه انکوباسیون در دمای اطاق، ۸۰۰ میکرولیتر محلول سدیم بی‌کربنات ۷/۵ درصد به آن اضافه شد. مقدار جذب مخلوط واکنش، پس از یک ساعت نگهداری در شرایط تاریکی در طول موج ۷۶۵ نانومتر قرائت شد. مقدار فنل کل از روی منحنی استاندارد گالیک اسید بر حسب میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر بیان شد.

سنجش محتوای فلاونوئید کل

مقدار فلاونوئید کل با روش آلومینیوم کلراید اندازه‌گیری شد

بر اساس ضرایب جذب اختصاصی و روابط استاندارد محاسبه شده و نتایج به صورت میلی‌گرم در گرم وزن تر بافت گیاهی بیان شدند (Lichtenthaler & Buschmann, 2001).

$$20.2 \text{ (mg/g FW) = میزان کلروفیل کل}$$

$$(A_{645}) + 8.02 (A_{663}) \quad (2)$$

$$12.7 \text{ (mg/g FW) = میزان کلروفیل a}$$

$$- 2.69 (A_{645}) \quad (3)$$

$$22.9 \text{ (mg/g FW) = میزان کلروفیل b}$$

$$- 4.68 (A_{663}) \quad (4)$$

$$1000A_{470} \text{ (mg/g FW) = میزان کاروتنوئید}$$

$$- 3.27 [\text{Chl a}] - 104 [\text{Chl b}] / 227 \quad (5)$$

تعیین میزان غلظت پرولین

اندازه‌گیری میزان پرولین با معرف ناین-هیدرین طبق روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) انجام شد. به طور خلاصه، ۱ میلی‌لیتر از عصاره استخراجی با سولفوسالسیلیک اسید ۳٪ با ۱ میلی‌لیتر معرف ناین-هیدرین و ۱ میلی‌لیتر گلاسیال استیک اسید مخلوط شد. سپس مخلوط واکنش به مدت ۶۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شد. پس از خنک شدن، ۲ میلی‌لیتر تولوئن به هر کدام از نمونه‌ها افزوده شد و

تجزیه واریانس و مقایسات

میانگین

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تنش اسمزی و اکوتیپ‌های گیاه دارویی کبر بر تمامی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مورد بررسی معنی‌دار بود؛ به طوری که این اثر بر MDA، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)، کلروفیل b، پرولین، فنل کل و فلاونوئید در سطح احتمال ۱ درصد و بر H_2O_2 ، کلروفیل a، کلروفیل کل و کاروتنوئید در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲).

مقدار MDA به‌عنوان شاخص آسیب اکسیداتیو تحت تنش اسمزی افزایش معنی‌داری نشان داد. در شرایط شاهد، کم‌ترین میزان MDA در اکوتیپ کرج $2/82$ نانومول بر گرم وزن تر و بیش‌ترین مقدار در اکوتیپ دالاهو $7/34$ نانومول بر گرم وزن تر مشاهده شد. اعمال تنش اسمزی موجب افزایش میانگین MDA تا $11/81$ نانومول بر گرم وزن تر (در اکوتیپ دالاهو) گردید. در شرایط تنش، اکوتیپ‌های رامهرمز و کرج کم‌ترین تجمع MDA ($8/34$) و $8/27$ نانومول بر گرم وزن تر) را نشان دادند، درحالی‌که اکوتیپ‌های بجنورد،

(Chang et al., 2002). ابتدا به 500 میکرولیتر از عصاره استخراج شده به ترتیب 2 میلی‌لیتر آب مقطر، $0/15$ میکرولیتر سدیم کربنات 5 درصد، $0/15$ میکرولیتر آلومینیوم کلراید 10 درصد اضافه و به خوبی مخلوط گردید. پس از 15 دقیقه، میزان جذب در طول موج 415 نانومتر قرائت گردید. سپس مقدار فلاونوئید کل از روی منحنی استاندارد کروسین بر حسب میلی‌گرم کروسین در گرم وزن تر گزارش شد.

تجزیه و تحلیل آماری

بعد از جمع‌آوری داده‌ها، در ابتدا برای بررسی نرمال بودن خطای آزمایش از روش کولموگروف-اسمیرنوف استفاده گردید. سپس، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه $9/2$ تجزیه و تحلیل واریانس شده‌اند. برای مقایسه میانگین‌ها، از آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن با سطح احتمال 5 درصد استفاده شد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار Minitab نسخه 18 ، همبستگی ساده بین صفات مورد و هم‌چنین تجزیه کلاستر (گروه‌بندی اکوتیپ‌ها) صورت گرفت.

نتایج

تنش ۶- بار در اکوتیپ بجنورد برابر با ۸/۲۴ نانومول بر گرم وزن تر بود که علاوه بر آن، اکوتیپ کرج نیز دارای بالاترین میانگین پراکسید هیدروژن بود (۷/۵۴ نانومول بر گرم وزن تر). کمترین مقدار آن در شرایط بدون تنش اسمزی در اکوتیپ‌های مغان، هندیجان، اهواز، ماهشهر، رامهرمز و کرج به ترتیب با میانگین ۳/۳۸، ۳/۲، ۳/۲، ۳/۲۱، ۳/۱۸ و ۳/۱ نانومول بر گرم وزن تر مشاهده شد (جدول ۲).

تحت تنش اسمزی توانایی فتوسنتزی سیستم گیاه کبر با اثر بر آنزیم‌های متابولیسم کلروفیل و رنگدانه‌های فتوسنتزی کاهش یافت. بیشترین محتوای کلروفیل a مربوط به تیمار شاهد (۰/۲۳۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در اکوتیپ رامهرمز بود که علاوه بر آن، اکوتیپ‌های دالاهو و اهواز نیز دارای بالاترین میانگین این صفت بودند. کمترین محتوای کلروفیل a در اکوتیپ بجنورد تحت تنش اسمزی ۶- بار (۰/۱۰۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) مشاهده شد. بیشترین محتوای کلروفیل b در تمامی اکوتیپ‌های تحت شرایط بدون تنش اسمزی (به جز هندیجان، بجنورد و رامهرمز) به دست

ماهشهر و مهران بیشترین میزان پراکسیداسیون لیپیدی (به ترتیب ۱۰/۰۶، ۱۰/۷۲ و ۱۰/۳۵ نانومول بر گرم وزن تر) را داشتند (جدول ۲).

بر اساس جدول مقایسه میانگین، بیشترین فعالیت جاروبی DPPH در تنش اسمزی ۶- بار با میانگین ۴۸/۴۴ درصد مربوط به اکوتیپ البرز بود. این در حالی است که کمترین مقدار DPPH در تیمار بدون تنش اسمزی (۳۴/۴۸ درصد) در اکوتیپ ماهشهر مشاهده گردید. در شرایط شاهد (بدون تنش اسمزی)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل (DPPH) بین ۳۳/۵۲ تا ۴۰/۲۶ درصد متغیر بود و بیشترین مقدار در اکوتیپ کرج مشاهده شد. تنش اسمزی موجب افزایش این شاخص در تمامی اکوتیپ‌ها گردید و میانگین فعالیت آنتی‌اکسیدانی به ۴۸/۴۴ درصد رسید. در شرایط تنش، اکوتیپ‌های کرج (۴۸/۴۴ درصد)، رامهرمز (۴۷/۳۸ درصد) و اهواز (۴۷/۶۳ درصد) بالاترین ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی را نشان دادند (جدول ۲).

مقدار پراکسید هیدروژن (H_2O_2) تحت تنش اسمزی افزایش یافت، به طوری که بیشترین میزان H_2O_2 در

آسمری، بیشترین محتوای کارتنوئید در اکوتیپ ماهشهر با میانگین ۰/۰۸۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر مشاهده شد درحالی‌که، اکوتیپ رامهرمز، کمترین میانگین این صفت (۰/۰۳۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) را داشت (جدول ۲).

محتوای پرولین به‌عنوان شاخص تنظیم آسمری به‌طور معنی‌داری تحت تنش آسمری افزایش یافت. میزان پرولین از ۷/۸۵ میکرومول در گرم وزن تر در شرایط بدون تنش آسمری در اکوتیپ رامهرمز به ۵۳/۵۹ میکرومول بر گرم وزن تر در اکوتیپ دالاهو تحت تنش آسمری رسید که افزایش بیش از ۶ برابری را نشان داد (جدول ۲).

مقایسه میانگین اثر تنش آسمری بر میزان فنل نشان داد که بیشترین میانگین این صفت در سطح خشکی ۶- بار با میانگین ۳/۹۸ میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن تر مربوط به اکوتیپ ماهشهر کبر بود که در مقایسه با تیمار بدون تنش این اکوتیپ، افزایش ۲۰ درصدی داشت. کمترین میزان فنل کل در اکوتیپ دالاهو با میانگین ۲/۰۱ میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن تر تحت شرایط بدون تنش آسمری مشاهده شد (جدول ۲).

آمد. کمترین محتوای کلروفیل b در اکوتیپ هنديجان تحت تنش آسمری (۰/۰۴۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) ثبت شد. بااین‌حال، اکوتیپ‌های مغان و بجنورد در شرایط تنش توانستند مقادیر بالاتری از کلروفیل b حفظ نمایند که نسبت به سایر اکوتیپ‌ها کاهش کمتری نشان دادند. کلروفیل کل نیز روند مشابهی با محتوای کلروفیل a و b نشان داد. در شرایط بدون تنش، بیشترین مقدار کلروفیل کل در اکوتیپ‌های رامهرمز و دالاهو (به‌ترتیب با میانگین ۰/۳۶۹ و ۰/۳۷۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به‌دست آمد. اعمال تنش آسمری موجب کاهش این شاخص تا میانگین ۰/۱۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در اکوتیپ هنديجان شد. در شرایط تنش، اکوتیپ‌های ماهشهر و رامهرمز به‌عنوان اکوتیپ‌های متحمل‌تر از نظر حفظ سیستم فتوسنتزی شناسایی شدند (جدول ۲).

در شرایط بدون تنش، بیشترین میزان کارتنوئید در اکوتیپ ماهشهر (۰/۱۳۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) ثبت شد، درحالی‌که اکوتیپ رامهرمز کمترین مقدار (۰/۰۷۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) را نشان داد. در شرایط تنش

نتایج نشان داد که تنش اسمزی منجر به افزایش میزان فلاونوئید گردید؛ به طوری که بیشترین محتوی فلاونوئید در اکوتیپ‌های دالاهو و کرج به ترتیب با میانگین ۸/۱۷ و ۸/۳۶ میلی‌گرم کروسین بر گرم وزن تر تحت شرایط تنش اسمزی به دست آمد که افزایش بیش از ۲۵ درصدی در مقایسه با تیمار شاهد داشتند. کمترین میانگین نیز با میانگین ۲/۲۶ میلی‌گرم کروسین بر گرم وزن تر، مربوط به اکوتیپ هندیجان تحت شرایط بدون تنش اسمزی بود (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسات میانگین اثر متقابل تنش اسمزی و اکوتیپ‌های گیاه کبر بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه کبر در شرایط آزمایشگاهی

Flavonoids (mg/g FW)	Phenol (mg/g FW)	Proline (μg/mg FW)	Car (mg/g FW)	Total Chl (mg/g FW)	Chl b (mg/g FW)	Chl a (mg/g FW)	H ₂ O ₂ (μmol/g FW)	DPPH (%)	MDA (nmol/g FW)	اکوتیپ	تنش اسمزی
۲/۴۸±۰/۰۸jk	۲/۶۸±۰/۰۴f	۱۰/۶۴±۱/۳۴gh	۰/۰۹۹±۰/۰۰۳b c	۰/۳۰۴±۰/۰۱d	۰/۱۳۴±۰/۰۰۲ab	۰/۱۷±۰/۰۰۸efg	۲/۳۸±۰/۵۳e	۳۵/۰۹±۰/۶۲f g	۴/۷±۰/۶۲gh	مغان	
۲/۲۶±۰/۱۲k	۲/۶۶±۰/۰۵f	۱۹/۴۴±۱/۲۵de	۰/۰۹۶±۰/۰۰۷b c	۰/۳۳۷±۰/۰۰۸b c	۰/۱۳۱±۰/۰۱b	۰/۲۰۶±۰/۰۰۹bc d	۳/۲±۰/۳۹e	۳۳/۵۲±۱/۰۸g	۳/۸۷±۰/۴۱hi	هندیجان	
۳/۰۷±۰/۱۷hi	۲/۵۵±۰/۰۳fg	۱۲/۲۸±۱/۴۲fg	۰/۱۱۳±۰/۰۰۳b h	۰/۳۵۸±۰/۰۰۸a b	۰/۱۴۲±۰/۰۰۲ab	۰/۲۱۶±۰/۰۰۷ab c	۳/۲±۰/۴۳e	۴۰/۱۳±۰/۴۲d e	۶/۸۵±۰/۲۳f	اهواز	
۲/۸۹±۰/۲۱hi j	۲/۳۷±۰/۰۴gh	۱۷/۵۵±۱/۶۲de	۰/۱۱۲±۰/۰۰۶b d	۰/۳۰۷±۰/۰۰۸c d	۰/۱۳۹±۰/۰۰۵ab	۰/۱۶۸±۰/۰۱efg ۰/۲۰۲±۰/۰۲۴bc	۵/۴۵±۰/۴۴c d	۳۴/۵۷±۱/۲۹f g	۵/۹۱±۰/۴۲fg	مهران	
۳/۵۲±۰/۰۸fg	۳/۱۴±۰/۰۲bc	۲۸/۱۴±۱/۵۴c	۰/۱۳۶±۰/۰۰۶a c	۰/۳۶±۰/۰۲۱ab d	۰/۱۵۸±۰/۰۰۵a	d	۳/۲±۰/۳۳e	۳۴/۴۸±۰/۶۸f g	۶/۵۴±۰/۱۳f	ماهشهر	شاهد
۲/۶۵±۰/۱۲ijk	۲/۶۷±۰/۰۶f	۱۱/۲۴±۱/۳۶gh	۰/۱۰۲±۰/۰۰۸b c	۰/۳۱±۰/۰۰۷bc d	۰/۱۲±۰/۰۱۲b	۰/۱۹±۰/۰۱cde	۵/۸۶±۰/۲۳c d	۳۵/۳±۰/۷۳fg	۶/۳۹±۰/۳۲f	بجنورد	
۳/۵۷±۰/۱۱ef g	۲/۳۲±۰/۰۷h	۷/۸۵±۰/۸۶h	۰/۰۷۸±۰/۰۰۶d	۰/۳۶۹±۰/۰۰۶a	۰/۱۳۳±۰/۰۱۵b	۰/۲۳۶±۰/۰۱a	۳/۱۸±۰/۱۹e	۳۶/۲۲±۰/۵۹f g	۷/۱۱±۰/۰۸ef	رامهرمز	
۵/۶۶±۰/۱۵c	۲/۰۱±۰/۰۵i	۳۲/۶۱±۲/۷۸c	۰/۱۱۱±۰/۰۰۵b c	۰/۳۷۹±۰/۰۰۷a c	۰/۱۵۸±۰/۰۱۲a	۰/۲۲۲±۰/۰۱۶ab ۰/۱۸۳±۰/۰۰۳de	۵/۵۸±۰/۳۹c d	۳۴/۶۶±۰/۵۴f g	۷/۳۴±۰/۴ef	دالاهو	
۵/۸۲±۰/۱۶c	۳/۱۳±۰/۱۶bc	۱۸/۰۶±۰/۹۶de	۰/۱۰۳±۰/۰۰۴b c	۰/۳۱۷±۰/۰۰۱c d	۰/۱۳۴±۰/۰۰۲ab	f	۳/۱±۰/۳e	۴۰/۲۶±۱/۹۱d e	۲/۸۲±۰/۳۱i	کرج	
۳/۲±۰/۱gh	۳/۱۲±۰/۰۶bc	۱۶/۴۱±۰/۸۲de f	۰/۰۴۸±۰/۰۰۱f g	۰/۱۹۸±۰/۰۰۶e f	۰/۰۷۵±۰/۰۰۲cd e	۰/۱۲۳±۰/۰۰۶ij	۶/۳۷±۰/۴۹b c	۳۷/۵۴±۰/۶۸e f	۸/۹۲±۰/۶۴cd	مغان	
۲/۸۶±۰/۱۴hij	۲/۸۹±۰/۱e	۲۸/۶۴±۱/۷۵c	۰/۰۷۲±۰/۰۰۵d e	۰/۱۵۶±۰/۰۰۸g	۰/۰۴۷±۰/۰۰۵f	۰/۱۰۸±۰/۰۰۵j	۴/۷۵±۰/۴۳d	۳۵/۳۷±۱/۱۹f g	۸/۸۳±۰/۱۵cd	هندیجان	
۳/۹±۰/۱ef	۳/۱۵±۰/۰۳bc	۳۲/۹۶±۱/۵c	۰/۰۸±۰/۰۰۳d e	۰/۱۸۵±۰/۰۰۶f	۰/۰۵۵±۰/۰۰۵ef	۰/۱۳±۰/۰۰۷hij	۵/۷±۰/۶۵cd	۴۷/۶۳±۰/۸۷a	۸/۹۷±۰/۴cd	اهواز	
۳/۹۹±۰/۰۸e	۳/۰۱±۰/۰۳cde	۲۷/۸۹±۳/۱۴c	۰/۰۶۲±۰/۰۰۲e f	۰/۱۹۹±۰/۰۰۱e f	۰/۰۸۲±۰/۰۰۵cd	۰/۱۱۶±۰/۰۰۴ij	۷/۷۷±۰/۲۶a b	۳۷/۰۲±۱/۱۹f	۱۰/۳۵±۰/۴۹b	مهران	تنش ۶- بار
۷/۰۹±۰/۲b	۳/۹۸±۰/۰۲a	۳۸/۰۸±۰/۶۳b	۰/۰۸۷±۰/۰۱۲c d	۰/۲۲۷±۰/۰۰۹e	۰/۰۹۲±۰/۰۰۸c	۰/۱۳۵±۰/۰۰۳hij	۵/۱۳±۰/۳cd	۴۴/۷۷±۰/۹۱b c	۱۰/۷۲±۰/۴۹a b	ماهشهر	
۳/۱۷±۰/۰۷gh	۳/۱±۰/۱bcd	۱۴/۵۷±۱/۰۹ef g	۰/۰۵±۰/۰۰۳fg	۰/۱۸۹±۰/۰۰۴f	۰/۰۸۱±۰/۰۰۴cd	۰/۱۰۸±۰/۰۰۸j	۸/۲۴±۰/۴۶a	۴۲/۹۲±۰/۸۹c d	۱۰/۰۶±۰/۴۱b c	بجنورد	

زیست فناوری گیاهان دارویی، دانشگاه زنجان، دوره ۱۱، شماره ۲، صص ۱۹۸-۱۷۱

۴/۵۲±۰/۱۳d	۲/۹۱±۰/۰۳de	۱۹/۲۹±۱/۶۵de	۰/۰۳۸±۰/۰۰۲g	۰/۲۴۴±۰/۰۱e	۰/۰۸۹±۰/۰۰۳c	۰/۱۵۵±۰/۰۱۲fg	h	۵/۸±۰/۵cd	۴۷/۳۸±۰/۴ab	۸/۳۴±۰/۹۱de	رامهرمز
۸/۱۷±۰/۱۹a	۳/۲۱±۰/۰۵bc	۵۳/۵۹±۱/۴۲a	۰/۰۵۴±۰/۰۰۳f	۰/۱۹۷±۰/۰۱ef	۰/۰۶۱±۰/۰۰۶de	۰/۱۳۶±۰/۰۰۴hij	f	۶/۶±۰/۴۴bc	۴۳/۸۶±۰/۶۸c	۱۱/۸۱±۰/۳۳a	دالاهو
۸/۳۶±۰/۲۲a	۳/۳۱±۰/۰۶b	۲۰/۸۷±۱/۵۷d	۰/۰۴۶±۰/۰۰۲f	۰/۲۰۴±۰/۰۱۳e	۰/۰۶۱±۰/۰۱۲de	۰/۱۴۳±۰/۰۰۳gh	g	۷/۵۴±۰/۹۲a	۴۸/۴۴±۱/۰۷a	۸/۲۷±۰/۶۴de	کرج

ANOVA Interactions

**	**	**	*	*	**	*	*	**	**	تنش اسمزی × اکوتیپ
۵/۷۸	۳/۹۳	۱۲/۱۹	۱۰/۹۲	۵/۸۷	۱۲/۴۸	۱۰/۱۵	۱۵/۱۹	۴/۱۶	۱۰/۳۱	ضریب تغییرات (/.)

میانگین‌هایی (±SE) که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند، طبق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند. * و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد. MDA: مالون دی آلدئید، DPPH: ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل، H₂O₂: پراکسید هیدروژن، Chl a: کلروفیل a، Chl b: کلروفیل b، Total Chl: کلروفیل کل، Car: کارتنوئید، Proline: پرولین، Phenol: فنل کل، Flavonoids: فلاونوئید.

همبستگی ساده بین صفات

نتایج ضرایب همبستگی (جدول ۳) نشان داد که بین شاخص‌های تنش اکسیداتیو، سیستم آنتی‌اکسیدانی و رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاهچه‌های کبر روابط معنی‌دار و منسجمی برقرار است. مالون‌دی‌آلدئید همبستگی مثبت و معنی‌داری با پراکسید هیدروژن و پرولین نشان داد که بیانگر افزایش خسارت اکسیداتیو هم‌زمان با فعال شدن مکانیسم‌های دفاعی در شرایط تنش اسمزی است. در مقابل، MDA با کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید همبستگی منفی و معنی‌دار

داشت که کاهش ظرفیت فتوسنتزی تحت تنش را تأیید می‌کند. ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل ارتباط مثبت و معنی‌داری با فنل کل و فلاونوئید نشان داد و نقش تعیین‌کننده ترکیبات فنلی در تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه را آشکار ساخت. پرولین، فنل و فلاونوئید همبستگی مثبت با شاخص‌های تنش اکسیداتیو و همبستگی منفی با رنگیزه‌های فتوسنتزی نشان دادند که بیانگر نقش حفاظتی متابولیت‌های اسمزی و آنتی‌اکسیدانی در تعدیل اثرات مخرب تنش اسمزی در گیاه کبر می‌باشد.

جدول ۳- ضرایب همبستگی بین صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های اکوتیپ‌های مختلف گیاه کبر تحت تنش اسمزی

Flavonoids	Phenol	Proline	Carotenoids	Total Chl	Chl b	Chl a	H ₂ O ₂	DPH	MDA	
*	*	**	**	**	**	**	**	**	1.00	MDA
**	**	*	**	**	**	*	*	1.00	0.50	DPPH
*	ns	ns	**	**	**	**	1.00	0.45	0.70	H ₂ O ₂
ns	**	*	**	**	**	1.00	0.70	-	0.60	Chl a
*	**	*	**	**	1.00	0.80	0.60	-	0.70	Chl b
					0.60	0.60	0.61	0.60	0.60	

ns	**	*	**	1.00	0.9	0.9	0.7	-	0.7	-	Total
					6	7	0	0.55	0		Chl
*	*	ns	1.0	0.76	0.8	0.6	0.6	-	0.6		Car
			0		1	7	9	0.60	2		
**	*	1.00	0.1	-0.39	0.4	0.3	0.2	0.31	0.5		Proline
			3		0	6	8		9		
*	1.00	0.44	0.3	-0.63	0.5	0.6	0.2	0.61	0.4		Phenol
			7		7	4	9		7		
1.00	0.49	0.63	0.3	-0.25	0.3	0.1	0.3	0.63	0.4		Flavonoids
			2		1	8	3		1		

ns و **: غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

Total .b کلروفیل، Chl b .a کلروفیل، Chl a: پرآکسید هیدروژن، H₂O₂: ظرفیت آنتی اکسیدانی کل، DPPH: ظرفیت آنتی اکسیدانی کل، MDA: مالون دی آلدئید، Car: کارتنوئید، Proline: پرولین، Phenol: فنل کل، Flavonoids: فلاونوئید.

تجزیه کلاستر (خوشه‌ای)

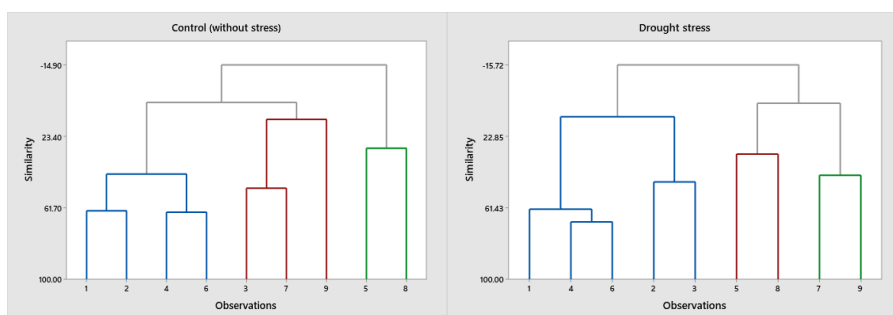
نتایج تجزیه کلاستر (شکل ۱ و جدول ۴) نشان داد که اکوتیپ‌های گیاه کبر در هر دو شرایط بدون تنش و تنش اسمزی بر اساس صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی به سه گروه مجزا تقسیم شدند که بیانگر وجود تنوع قابل توجه در پاسخ اکوتیپ‌ها به تنش اسمزی است. در شرایط بدون تنش اسمزی، کلاستر اول شامل بیشترین تعداد اکوتیپ‌ها (۴) اکوتیپ: مغان، هندیجان، مهران و بجنورد) بوده و با مقادیر بالاتر H₂O₂ (۴/۴۷) میکرومول بر گرم وزن تر) و مقادیر پایین رنگیزه‌های فتوسنتزی مشخص شد. کلاستر دوم (۳ اکوتیپ:

اهواز، رامهرمز و کرج) دارای بیشترین میزان کلروفیل a (۰/۲۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی DPPH (۳۸/۸۷ درصد) و فنل کل (۲/۶۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) بود که نشان‌دهنده وضعیت فیزیولوژیکی مطلوب‌تر در شرایط نرمال است. در مقابل، کلاستر سوم (۲ اکوتیپ: ماهشهر و دالاهو) با بیشترین تجمع MDA (۶/۹۴ نانومول بر گرم وزن تر)، پرولین (۳۰/۳۸ میکروگرم بر میلی‌گرم وزن تر)، فلاونوئید (۴/۵۹ میکروگرم بر میلی‌گرم وزن تر) و هم‌چنین کلروفیل b، کل و کارتنوئید مشخص گردید که

بررسی سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های گیاه دارویی کبر (*Capparis spinosa* L.)
.../ رادمش، شکاری، عصاره، پاسکال

کارتنوئید، کلروفیل b و MDA را نشان داد که بیانگر فعال‌سازی قوی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی در پاسخ به تنش اسمزی است. کلاستر سوم (۲ اکوتیپ: رامهرمز و کرج) نیز با مقادیر نسبتاً بالاتر کلروفیل کل و a، پراکسید هیدروژن و DPPH مشخص شد و به‌عنوان اکوتیپ‌های دارای پایداری بیشتر دستگاه فتوسنتزی تحت تنش اسمزی شناخته شدند.

بیانگر ظرفیت دفاعی بالاتر حتی در شرایط بدون تنش می‌باشد. در شرایط تنش اسمزی، الگوی گروه‌بندی اکوتیپ‌ها تغییر محسوسی نشان داد. کلاستر اول (۵ اکوتیپ: مغان، مهران، بجنورد، هندیجان و اهواز) در هیچ یک از صفات مورد بررسی برتری معنی‌دار نداشتند. کلاستر دوم (۲ اکوتیپ: ماهشهر و دالاهو) بیشترین میزان پرولین، فنل کل، فلاونوئید،



شکل ۱- تجزیه کلاستر (گروه‌بندی) اکوتیپ‌های کبر در دو شرایط بدون تنش اسمزی (چپ) و تنش اسمزی (راست)

۱- مغان، ۲- هندیجان، ۳- اهواز، ۴- مهران، ۵- ماهشهر، ۶- بجنورد، ۷- رامهرمز، ۸- دالاهو، ۹- کرج

جدول ۴- تجزیه کلاستر اکوتیپ‌های مختلف کبر در دو شرایط بدون تنش و تنش اسمزی

تنش اسمزی			بدون تنش اسمزی			متغیر
کلاستر ۳	کلاستر ۲	کلاستر ۱	کلاستر ۳	کلاستر ۲	کلاستر ۱	
۸/۳۱	۱۱/۲۷	۹/۴۳	۶/۹۴	۵/۶	۵/۲۲	MDA
۴۷/۹۱	۴۴/۳۱	۴۰/۱	۳۴/۵۷	۳۸/۸۷	۳۴/۶۲	DPPH
۶/۶۷	۵/۸۶	۶/۵۷	۴/۳۹	۳/۱۶	۴/۴۷	H ₂ O ₂

۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۱۸	Chl a
۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۳	Chl b
۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۳۱	Total Chl
۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۱	۰/۱	Car
۲۰/۰۸	۴۵/۸۴	۲۴/۰۹	۳۰/۳۸	۱۲/۷۳	۱۴/۷۲	Proline
۳/۱۱	۳/۵۹	۳/۰۵	۲/۵۸	۲/۶۷	۲/۵۹	Phenol
۶/۴۴	۷/۶۳	۳/۴۲	۴/۵۹	۴/۱۵	۲/۵۷	Flavonoids
۲	۲	۵	۲	۳	۴	تعداد اکوتیپ

بحث

اکوتیپ‌ها نیز بیانگر نقش مهم تنوع ژنتیکی در میزان تحمل به تنش اسمزی است. افزایش گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) یکی از نخستین پیامدهای فیزیولوژیکی تنش اسمزی در گیاهان محسوب می‌شود که منجر به اختلال در پایداری غشاءهای سلولی و آغاز فرآیند پراکسیداسیون لیپیدی می‌گردد. MDA به‌عنوان محصول نهایی این فرآیند، شاخصی قابل اعتماد برای ارزیابی شدت آسیب اکسیداتیو و میزان حساسیت گیاه به تنش آبی شناخته می‌شود (Poggi et al., 2024). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اعمال تنش اسمزی موجب افزایش معنی‌دار MDA در گیاهچه‌های کبر گردید که بیانگر تشدید تخریب غشایی و افزایش تنش اکسیداتیو است. این

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اعمال تنش اسمزی تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کبر داشت، به‌طوری‌که این تنش موجب افزایش شاخص‌های تنش اکسیداتیو شامل مالون‌دی‌آلدئید، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)، ترکیبات فنلی، فلاونوئید و پرولین گردید، درحالی‌که محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل‌ها و تا حدودی کاروتنوئیدها کاهش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده فعال شدن سازوکارهای دفاعی گیاه در برابر تنش کمبود آب و تلاش برای حفظ تعادل متابولیکی و ساختارهای سلولی می‌باشد. تفاوت مشاهده‌شده بین

جاروب‌کنندگی رادیکال آزاد، ارتباط مستقیمی با تحمل تنش‌های اکسیداتیو دارد (شهرکی و همکاران، ۱۳۹۹). افزایش فعالیت DPPH تحت تنش اسمزی در گونه‌های مختلف دارویی از جمله *Coleus amboinicus* و *Coleus forskholii* (Prathyusha & Chaitanya, 2019)، مریم‌گلی (Bhakta & Ganjewala, 2009) و *Achillea* (Gharibi et al., 2016) نیز گزارش شده است که همسو با نتایج حاضر می‌باشد. عملکرد برتر اکوتیپ‌های کرج، اهواز و رامهرمز در این صفت نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی یکی از مهم‌ترین راهبردهای تحمل اسمزی در گیاه کبر است.

افزایش محتوای فنل کل و فلاونوئید در شرایط تنش اسمزی در این پژوهش نیز تأییدکننده نقش کلیدی متابولیت‌های ثانویه در دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه است. گیاهان در مواجهه با تنش‌های محیطی معمولاً مسیرهای بیوسنتزی ترکیبات فنولی را فعال می‌کنند تا از طریق خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد، جلوگیری از تجزیه هیدروپراکسیدها و کلاته‌سازی یون‌های

افزایش احتمالاً ناشی از برهم خوردن تعادل بین تولید ROS و ظرفیت سیستم‌های دفاعی گیاه می‌باشد (Mohagheghian et al., 2025). نتایج مشابهی توسط Lin و Chao (۲۰۲۱) گزارش شد که افزایش MDA را پیامد مستقیم پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی و کاهش کارایی فیزیولوژیکی گیاه تحت کمبود آب دانستند. در این تحقیق، تجمع کمتر MDA در برخی اکوتیپ‌ها نظیر کرج و رامهرمز نشان می‌دهد که این اکوتیپ‌ها از سازوکارهای حفاظتی کارآمدتری برای محدودسازی خسارت اکسیداتیو برخوردار بوده‌اند.

افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل (DPPH) در شرایط تنش اسمزی مشاهده شده در این مطالعه بیانگر فعال‌سازی سیستم دفاع غیرآنزیمی گیاه کبر در پاسخ به تنش است. گیاهان تحت شرایط کمبود آب با تنظیم مسیرهای متابولیکی مختلف، از طریق ترکیبات آنتی‌اکسیدانی قادر به خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و جلوگیری از آسیب به پروتئین‌ها، لیپیدها و اسیدهای نوکلئیک می‌شوند (Rao et al., 2025). افزایش ظرفیت

فلزی از ساختارهای سلولی محافظت نمایند (Sarker & Oba, 2018). افزایش ترکیبات فنولی تحت تنش اسمزی در گونه‌های *Ocimum basilicum* و *Ocimum ciliatum* (Pirbalouti et al., 2017)، *Origanum vulgare* (Minaei et al., 2019) و *Dracocephalum kotschy* (کیانی و همکاران، ۱۴۰۴) گزارش شده است. در پژوهش حاضر نیز اکوتیپ‌هایی نظیر ماهشهر و دالاهو با تجمع بیشتر فنل و فلاونوئید، پاسخ دفاعی قوی‌تری در برابر تنش اسمزی نشان دادند که با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل همبستگی داشت.

تجمع پرولین یکی دیگر از پاسخ‌های شاخص گیاهان به تنش اسمزی بود که در این مطالعه افزایش چشمگیری نشان داد. پرولین علاوه بر نقش تنظیم اسمزی، در پایداری ساختار غشاءها، حفاظت ساختار پروتئین‌ها و حذف گونه‌های فعال اکسیژن مشارکت دارد (Afshari et al., 2022). افزایش این اسید آمینه معمولاً ناشی از تجزیه پروتئین‌ها و تغییر مسیر متابولیسم نیتروژن در شرایط تنش است و به حفظ تعادل آب سلولی کمک می‌کند

کاهش معنی‌دار رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل تحت تنش اسمزی در این مطالعه نشان‌دهنده اختلال در عملکرد دستگاه فتوسنتزی گیاه کبر است. کاهش کلروفیل می‌تواند ناشی از اختلال در جذب عناصر ضروری مانند منیزیم و آهن، کاهش فعالیت آنزیم‌های سنتزی و یا افزایش تجزیه کلروپلاست‌ها در اثر تجمع ROS باشد (Gorzi et al., 2017; Afshari et al., 2022). افزایش گونه‌های فعال

تنش می‌تواند از تخریب فتوسیستم‌ها جلوگیری نماید. نتایج مطالعات انجام‌شده در گیاهان مختلف نشان داد که تغییرات کاروتنوئید بخشی از سازوکار سازگاری گیاه با تنش کم‌آبی است. هم‌چنین گزارش شد که افزایش کاروتنوئیدها به‌عنوان سپر حفاظتی در برابر اکسیداسیون نوری عمل می‌کند (Gorzi et al., 2017).

نتایج تجزیه کلاستر نشان داد که تنش اسمزی موجب تغییر معنی‌دار در الگوی گروه‌بندی اکوتیپ‌های گیاه کبر گردید که بیانگر تفاوت در راهبردهای سازگاری فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی آن‌ها به شرایط کم‌آبی است. به‌طور کلی، در شرایط بدون تنش، تفکیک اکوتیپ‌ها عمدتاً بر اساس ظرفیت فتوسنتزی و سطح متابولیسم پایه انجام شد، درحالی‌که تحت تنش خشکی، خوشه‌بندی اکوتیپ‌ها بیشتر وابسته به شدت پاسخ‌های دفاعی شامل افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، تجمع پرولین و ترکیبات فنلی و همچنین میزان آسیب اکسیداتیو (MDA و H_2O_2) بود. اکوتیپ‌های قرارگرفته در خوشه‌های دارای مقادیر بالاتر ترکیبات حفاظتی و مقادیر کمتر شاخص‌های

اکسیژن سبب پراکسیداسیون لیپیدی و تخریب کلروفیل‌ها می‌شود، هم‌چنین مهار بیوسنتز کلروفیل از طریق کاهش فعالیت آنزیم‌هایی نظیر نیترات ردوکتاز نیز در این فرآیند مؤثر است (Mizani et al., 2025). علاوه‌براین، افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌از و کاهش پیش‌سازهای سنتز کلروفیل مانند ۵-آمینولولینیک‌اسید نیز از عوامل کاهش رنگیزه‌ها در شرایط تنش محسوب می‌شود. گزارش‌های گریزی و همکاران (۲۰۱۷)، ظفری و همکاران (۲۰۲۰) و افشاری و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که تنش اسمزی معمولاً موجب کاهش کلروفیل a و تغییر در نسبت کلروفیل‌ها می‌شود که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. حفظ مقادیر بالاتر کلروفیل در اکوتیپ‌های ماهشهر و رامهرمز بیانگر پایداری بیشتر سیستم فتوسنتزی در این اکوتیپ‌ها تحت تنش اسمزی است.

کاروتنوئیدها نیز به‌عنوان اجزای کلیدی سیستم دفاع نوری، نقش مهمی در خاموش‌سازی اکسیژن یگانه و حفاظت از کلروفیل‌ها ایفا می‌کنند (Zhang et al., 2021). افزایش یا حفظ سطح این رنگیزه‌ها در شرایط

نشان‌دهنده فعال شدن سازوکارهای دفاعی گیاه در مقابله با تنش اسمزی می‌باشد. بررسی تفاوت‌های اکوتیپی نشان داد که پاسخ به تنش اسمزی به شدت وابسته به منشأ ژنتیکی اکوتیپ‌ها است. در شرایط بدون تنش، اکوتیپ‌های کرج و مغان با برخورداری از مقادیر بالاتر کلروفیل کل، کاروتنوئید و وضعیت اکسیداتیو پایدار، از برتری فیزیولوژیکی بیشتری برخوردار بودند. در مقابل، تحت شرایط تنش اسمزی، اکوتیپ‌های ماهشهر و هندیجان با حفظ بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی، تجمع بالاتر پرولین و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و مقادیر کمتر MDA و H_2O_2 به‌عنوان اکوتیپ‌های متحمل به خشکی شناسایی شدند. در مجموع، نتایج نشان داد که تحمل کم‌آبی در گیاه کبر عمدتاً با توانایی تنظیم تعادل اکسیداتیو، حفاظت از ساختار غشایی و حفظ عملکرد فتوسنتزی مرتبط بوده و اکوتیپ‌های جنوبی کشور می‌توانند به‌عنوان منابع ژنتیکی ارزشمند در برنامه‌های اصلاحی و توسعه کشت این گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک معرفی شوند. با این حال، این پژوهش با محدودیت‌هایی از جمله بررسی تنها

پراکسیداسیون لیپیدی به‌عنوان اکوتیپ‌های متحمل‌تر شناخته شدند، درحالی‌که افزایش نشانگرهای تنش اکسیداتیو و کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی در سایر خوشه‌ها بیانگر حساسیت بیشتر آن‌ها به تنش اسمزی بود. این نتایج نشان می‌دهد که تحمل خشکی در اکوتیپ‌های کبر عمدتاً با توانایی حفظ تعادل اکسیداتیو و پایداری سیستم فتوسنتزی مرتبط است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش اسمزی القاشده توسط PEG-6000 موجب بروز تنش اکسیداتیو قابل توجه در گیاهچه‌های کبر شده و به‌طور هم‌زمان تغییرات معنی‌داری در شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ایجاد نمود. افزایش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن همراه با کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی بیانگر آسیب غشایی و اختلال در عملکرد دستگاه فتوسنتزی تحت شرایط کم‌آبی بود، درحالی‌که تجمع پرولین، ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی و افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

بررسی سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های گیاه دارویی کبر (*Capparis spinosa* L.)
... / رادمنش، شکاری، عصاره، پاسکال

مراحل رشدی متفاوت گیاه و هم‌چنین شرایط مزرعه‌ای مورد بررسی قرار گیرد تا درک جامع‌تری از سازوکارهای تحمل به کم‌آبی در اکوتیپ‌های مختلف گیاه کبر حاصل شود.

یک سطح تنش اسمزی و انجام آزمایش در مرحله گیاهچه‌ای و در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی همراه بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، سطوح مختلف تنش اسمزی،

منابع

مجرد آشنا‌باد، م.، و محبی، ف. (۱۴۰۴). مروری بر وضعیت ذخایر ژنتیکی گیاهان دارویی در ایران. زیست‌قوم‌شناسی و حفاظت تنوع زیستی، ۲(۳)، ۶۲-۷۳.
مهرنیا، م.، و حسینی، ز. (۱۴۰۳). مطالعه اتنوبوتانی گیاهان دارویی بومی منطقه بلومان (استان لرستان). زیست‌قوم‌شناسی و حفاظت تنوع زیستی، ۱(۴)، ۱-۲۱.

آروین، پ.، و فیروزه، ر. (۱۴۰۲). بررسی فیتوشیمیایی و فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی ریشه، برگ و میوه گیاه کور در دو رویشگاه از استان خراسان شمالی، پژوهش‌های گیاهی، ۳۶(۴)، ۴۰۴-۳۸۹.

شهرکی، ه.، مهدی‌نژاد، ن.، و فاخری، ب. (۱۳۹۹). تأثیر ایستورهای غیر زیستی بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی و خواص آن‌تی‌اکسیدانی کنگر فرنگی خاردار. زیست‌فناوری گیاهان دارویی، ۶(۱)، ۱-۱۳.

کیانی، ص.، احمدی، ج.، شیران، ب.، فابریکی اورنگ، ص.، و فلاحی، ح. (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات فیتوشیمیایی در مراحل رویشی و گلدهی زرین گیاه تحت شرایط تنش خشکی، پژوهش‌های پیشرفته در گیاهان دارویی، ۲(۳)، ۵۶-۴۵.

Afshari, F., Nakhaei, F., Mosavi, S., & Seghatoleslami, M. (2022). Physiological and biochemical responses of *Stevia rebaudiana* Bertoni to nutri-priming and foliar nutrition under water supply restrictions. *Industrial Crops and Products*, 176, 114399
Alsharif, B., & Boylan, F. (2025). *Capparis* L. (Capparaceae): A scoping review of

- Biotechnology, 178, 796-809
- Gorzi, A., Omidi, H., & Bostani, A. (2017). Morpho-physiological responses of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) to various priming treatments under drought stress. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16, 4753-4771
- Hichem, H., & Mounir, D. (2009). Differential responses of two maize (*Zea mays* L.) varieties to salt stress: changes on polyphenols composition of foliage and oxidative damages. *Industrial Crops and Products*, 30, 144-151
- Khan, P., Abdelbacki, A.M., Albaqami, M., Jan, R., & Kim, K.M. (2025). Proline promotes drought tolerance in maize. *Biology*, 14, 41
- Król, A., Amarowicz, R., & Weidner, S. (2014). Changes in the composition of phenolic compounds and antioxidant properties of grapevine roots and leaves (*Vitis vinifera* L.) under continuous of long-term drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36, 1491-1499
- phytochemistry, ethnopharmacology and pharmacological activities. *Molecules*, 30, 3705
- Bates, L.S., Waldren, R.P., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207
- Bhakta, D., & Ganjewala, D. (2009). Effect of leaf positions on total phenolics, flavonoids and proanthocyanidins content and antioxidant activities in *Lantana camara* (L). *Journal of Scientific Research*, 1, 363-369
- Chang, C.C., Yang, M.H., Wen, H.M., & Chern, J.C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10, 1-3.
- Gharibi, S., Tabatabaei, B.E.S., Saeidi, G., & Goli, S.A.H. (2016). Effect of drought stress on total phenolic, lipid peroxidation, and antioxidant activity of *Achillea* species. *Applied Biochemistry and*

- properties of antioxidants using DPPH assay: A critical review and results. *Food Chemistry*, 130, 1036-1043
- Mizani, A., Masuod Sinaki, J., Rezvan, S., Abedini Esfahlani, M., & Damavandi, A. (2025). Assessment of foliar and nano-potassium fertilization on physiological and biochemical traits of sesame seed oil, fatty acids, and lignans under different irrigation regimes. *Journal of Plant Nutrition*, 19, 3417-3442
- Mohagheghian, B., Saeidi, G., & Arzani, A. (2025). Phenolic compounds, antioxidant enzymes, and oxidative stress in barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes under field drought-stress conditions. *BMC Plant Biology*, 25, 709
- Pirbalouti, A.G., Malekpoor, F., Salimi, A., Golparvar, A., & Hamedi, B. (2017). Effects of foliar of the application chitosan and reduced irrigation on essential oil yield, total phenol content and antioxidant activity of
- Lichtenthaler, H.K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1, F4. 3.1-F4. 3.8
- Lin, P.H., & Chao, Y.Y. (2021). Different drought-tolerant mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and djulis (*Chenopodium formosanum* Koidz.) based on physiological analysis. *Plants*, 10, 2279
- Michel, B.E., & Kaufmann, M.R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51, 914-916.
- Minaei, A., Hassani, A., Nazemiyeh, H., & Besharat, S. (2019). Effect of drought stress on some morphophysiological and phytochemical characteristics of oregano (*Origanum vulgare* L. ssp. *gracile*). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 35, 252-265
- Mishra, K., Ojha, H., & Chaudhury, N.K. (2012). Estimation of antiradical

defense system in plants: reactive oxygen species production, signaling, and scavenging during abiotic stress-induced oxidative damage. *Horticulturae*, 11, 477

Sarker, U., & Oba, S. (2018). Drought stress effects on growth, ROS markers, compatible solutes, phenolics, flavonoids, and antioxidant activity in *Amaranthus tricolor*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 186, 999-1016

Sergiev, I., Alexieva, V., & Karanov, E. (1997). Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Compt Rend Acad Bulg Sci*, 51, 121-124

Shahrajabian, M.H., Sun, W., & Cheng, Q. (2021). Plant of the Millennium, Caper (*Capparis spinosa* L.), chemical composition and medicinal uses. *Bulletin of the National Research Centre*, 45, 131

Tan, U., & Gören, H.K. (2024). Comprehensive evaluation of drought stress

extracts from green and purple basil. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 16, 45-51

Poggi, G.M., Corneti, S., & Aloisi, I. (2024). The quest for reliable drought stress screening in tetraploid wheat (*Triticum turgidum* spp.) seedlings: why MDA quantification after treatment with 10% PEG-6000 falls short. *Life*, 14, 517

Prathyusha, I.V.S.N., & Chaitanya, K.V. (2019). Effect of water stress on the physiological and biochemical responses of two different *Coleus* (*Plectranthus*) species. *Biologia Futura*, 70, 312-322

Radmanesh, Z., Shekari, F., Assareh, M.H., & Pascual Espana, B. (2025). Enhancing seedling growth in *Capparis spinosa* L. Seeds: Effects of soaking and cold stratification. *Journal of Medicinal plants and By-Products*, 14, 425-434

Rao, M.J., Duan, M., Zhou, C., Jiao, J., Cheng, P., Yang, L., Wei, W., Shen, Q., Ji, P., & Yang, Y. (2025). Antioxidant

Zhang, R.R., Wang, Y.H., Li, T., Tan, G.F., Tao, J.P., Su, X.J., Xu, Z.S., Tian, Y.S., & Xiong, A.S. (2021). Effects of simulated drought stress on carotenoid contents and expression of related genes in carrot taproots. *Protoplasma*, 258, 379-390.

on medicinal plants: a meta-analysis. *PeerJ*, 12, e17801

Wahab, A., Abdi, G., Saleem, M.H., Ali, B., Ullah, S., Shah, W., Mumtaz, S., Yasin, G., Muresan, C.C., & Marc, R.A. (2022). Plants' physio-biochemical and phyto-hormonal responses to alleviate the adverse effects of drought stress: A comprehensive review. *Plants*, 11, 1620

Yousefi, E., Abedi, M., Aghajanzadeh, T.A., & Moreno, D.A. (2025). Caper bush (*Capparis spinosa* L.) bioactive compounds and antioxidant capacity as affected by adaptation to harsh soils. *Scientific Reports*, 15, 11893

Zafari, M., Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., & Sedghi, M. (2020). Safflower (*Carthamus tinctorius*) biochemical properties, yield and oil content affected by 24-epibrassinosteroid and genotype under drought stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68, 6040-6047