

مقاله پژوهشی

مقایسه پاسخ‌های فیزیولوژیکی و مولکولی بادرنبویه (*Melissa officinalis* L.) به تنش خشکی و شوری با پتانسیل اسمزی برابر در کشت هیدروپونیک

محمدرضا دهقانی و مریم دهجی‌پور حیدرآبادی*

گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹)

چکیده

این پژوهش به منظور مقایسه برخی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و مولکولی گیاه بادرنبویه به تنش اسمزی حاصل از خشکی و شوری با پتانسیل اسمزی برابر انجام شد. گیاهان بادرنبویه رشدیافته در کشت هیدروپونیک، در معرض تنش خشکی و شوری با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ و کلرید سدیم به مدت ۱۴ روز قرار گرفتند. سپس نمونه‌برداری از گیاهچه‌ها جهت بررسی میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی، پرولین، ترکیبات فنلی، مالون دی‌آلدئید، درصد نشت یونی، فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالاز و میزان اسید رزمارینیک انجام شد. همچنین بیان ژن‌های فنیل آلانین آمونیالاز و رزمارینیک اسید سینتاز با روش Real-time PCR بررسی شد. این آزمایش به صورت کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تنش خشکی و شوری میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی، ترکیبات فنلی، پرولین آزاد، مالون دی‌آلدئید، نشت یونی، فعالیت آنزیم و بیان نسبی ژن فنیل آلانین آمونیالاز، بیان نسبی ژن رزمارینیک اسید سینتاز و میزان اسید رزمارینیک را در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر قرار داد. کاهش معنی‌دار رنگیزه‌های فتوسنتزی در تنش خشکی و شوری مشاهده شد. میزان ترکیبات فنلی در گیاهان تحت تنش شوری نسبت به گیاهان تحت تنش خشکی و شاهد افزایش یافت. افزایش میزان پرولین آزاد در گیاهان تحت تنش خشکی و شوری به ترتیب ۱۱ و ۲۵ درصد بود. میزان مالون دی‌آلدئید و درصد نشت یونی در گیاهان تحت تنش خشکی و شوری نسبت به گیاهان شاهد افزایش نشان داد. افزایش بیان نسبی ژن و فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالاز در تنش شوری مشاهده شد. افزایش بیان نسبی ژن رزمارینیک اسید سینتاز در تنش خشکی و شوری، افزایش میزان اسید رزمارینیک را به میزان ۴۲ و ۶۰ درصد نسبت به گیاهان شاهد موجب شد. براساس نتایج به دست آمده، گیاه بادرنبویه به تنش خشکی و شوری با پتانسیل اسمزی برابر واکنش متفاوتی نشان داد. این گیاه با افزایش بیشتر محتوای پرولین، ترکیبات فنلی، اسید رزمارینیک، بیان ژن و فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالاز، به تنش اسمزی حاصل از شوری پاسخ مناسب‌تری نسبت به تنش اسمزی حاصل از خشکی داده است.

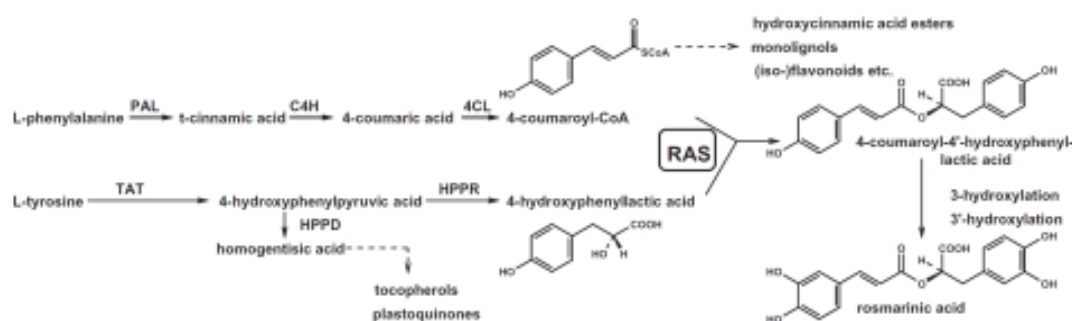
واژه‌های کلیدی: اسید رزمارینیک، بادرنبویه، خشکی، شوری، فنیل آلانین آمونیالاز

مقدمه

ضداسپاسم، آنتی‌اکسیدان، ضدباکتری، ضدویروس، ضدجوش و آرام‌بخش است. در سال‌های اخیر این گیاه دارویی به دلیل تولید متابولیت‌های ثانویه مهم و کاربرد این ترکیبات در

بادرننبویه (*Melissa officinalis* L.) گیاهی علفی از خانواده نعناعیان با خواص دارویی متعدد مانند تسکین‌دهنده،

* نویسنده مسؤول، نشانی پست الکترونیکی: m.dahaji@vru.ac.ir



شکل ۱- مسیر بیوسنتزی اسیدرزمارینیک در گیاهان تولیدکننده این متابولیت ثانویه (Weitzel and Petersen, 2011)

تخریب ساختارهای سلولی جلوگیری می‌کند (Amini et al., 2015). از طرفی دیگر ترکیبات فنلی به‌عنوان آنتی‌اکسیدان در پاسخ به تنش‌های محیطی قادرند اثرات منفی تنش اکسیداتیو ناشی از تنش‌های غیرزیستی را با حذف گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) تا حدودی کاهش دهند (Samec et al., 2021).

تنش اسمزی با تولید و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) به‌عنوان محصولات جانبی متابولیسم سلولی، فعالیت‌های آنزیمی و بیان ژن‌ها را نیز تغییر می‌دهد (Cramer et al., 2011). در گیاهان تولیدکننده اسید رزمارینیک، ارتباط سنتز اسید رزمارینیک با بیان ژن‌های دخیل در مسیر بیوسنتزی آن مانند ژن‌های فنیل‌آلانین آمونیلایز و رزمارینیک اسید سینتاز تأیید شده است (Weitzel and Petersen, 2011).

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است سنتز اسید رزمارینیک، فعال‌ترین و فراوان‌ترین ترکیب دارویی موجود در گیاه بادرنجبویه، از طریق مسیر بیوسنتزی فنیل‌پروپانئیدی با استفاده از پیش‌ماده فنیل‌آلانین و با دخالت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیلایز (PAL: EC 4.3.1.5) شروع و تشکیل اسید رزمارینیک در این مسیر بیوسنتزی توسط آنزیم رزمارینیک اسید سینتاز (RAS: EC 2.3.1.140) کاتالیز می‌شود.

ژن‌های فنیل‌آلانین آمونیلایز و رزمارینیک اسید سینتاز جداسازی شده از گیاه بادرنجبویه به‌ترتیب شامل یک اینترون و فاقد اینترون هستند که پروتئین‌هایی مشتمل بر ۸۳۶ و ۴۲۷ اسید آمینه را به رمز در می‌آورند. همچنین تنها حضور یک نسخه از ژن رزمارینیک اسید سینتاز در بادرنجبویه گزارش شده است (Weitzel and Petersen, 2011). براساس

زمینه‌های مختلف پزشکی، صنایع آرایشی-بهداشتی و صنایع غذایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Moradkhani et al., 2010). اسید رزمارینیک (استر اسید کافئیک و ۳، ۴ دی هیدروکسی فنیل لاکتیک اسید) به‌عنوان ترکیب دارویی فعال و غالب در گیاه بادرنجبویه شناسایی شده است که حدود ۰/۵ تا ۶/۸ درصد از وزن خشک گیاه را تشکیل می‌دهد (Kittler et al., 2018).

خشکی و شوری اصلی‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر تولید محصولات زراعی در جهان و از جمله ایران هستند. این تنش‌ها به‌دلیل اثرگذاری‌های اسمزی بر دامنه گسترده‌ای از واکنش‌های سوخت‌وسازی، موجب اختلال در طیف گسترده‌ای از فرایندهای فیزیولوژیکی و متابولیسمی سلول می‌شوند. تنش اسمزی به‌علت تولید گونه‌های فعال اکسیژن با کاهش میزان فتوسنتز، رشدونمو گیاه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. چنانچه تولیدگونه‌های فعال اکسیژن به‌طور دقیق تنظیم نشود ممانعت رشدونمو گیاهی را موجب می‌شود (Isayenkov, 2012). نتایج مطالعات نشان داده است گونه‌های فعال اکسیژن تولیدشده در نتیجه تنش اسمزی با پراکسیده‌کردن لیپیدهای غشایی، افزایش میزان مالون دی‌آلدئید، نفوذپذیری غشا و نشت یونی را باعث می‌شوند (Morales and Munne-Bosch, 2019). تجمع ترکیبات سازگار مانند پرولین، در پاسخ به تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، شوری، فلزات سنگین و گرما در گیاهان مشاهده شده است. پرولین نه‌تنها به‌عنوان منبع انرژی و حذف‌کننده گونه‌های فعال اکسیژن در تعدیل تنش در گیاهان نقش دارد، بلکه با تنظیم اسمزی در شرایط تنش از

پژوهش‌های صورت گرفته، متابولیت‌های ثانویه تولیدشده در گیاهان دارویی با حذف گونه‌های فعال اکسیژن، به‌عنوان یک سازگاری با شرایط تنش در دفاع غیرآنزیمی این گیاهان در برابر تنش‌ها نقش مؤثری دارند (Isah, 2019).

طی دهه‌های اخیر، اثرات فیزیولوژیکی و مولکولی تنش‌های گیاهی بر رشد و تولید متابولیت‌های ثانویه در گونه‌های زراعی بررسی شده است. در مورد گیاهان دارویی اطلاعات چندانی در زمینه تنش و پاسخ‌های دفاعی همراه با تولید متابولیت‌های ثانویه وجود ندارد. لذا در این پژوهش تأثیر تنش خشکی و شوری با پتانسیل اسمزی برابر بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی و مولکولی متأثر از این تنش‌ها در کشت هیدروپونیک گیاه بادرنجبویه مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

ضدعفونی سطحی بذرها با استفاده از هیپوکلریت سدیم ۲۰ درصد (حجمی/حجمی) و اتانول ۷۰ درصد (حجمی/حجمی) انجام شد. بعد از جوانه‌زنی بذرها در تاریکی، گیاهچه‌های یکسان به ظروف کشت مخصوص کشت هیدروپونیک حاوی محیط تغییر یافته هوگلند انتقال و در اتاق رشد با دوره نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی، دمای 25°C و شدت نور $60 \mu\text{molm}^{-2}\text{S}^{-1}$ قرار داده شدند. تنش خشکی و شوری با استفاده از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ (PEG 6000) و کلرید سدیم (NaCl) اعمال شد. غلظت کلرید سدیم و پلی اتیلن مورد نیاز جهت ایجاد پتانسیل اسمزی برابر با ۱/۷ بار با استفاده از رابطه وانت هوف (۱) و میشل و کافمن (۲) محاسبه شد.

رابطه (۱)

$$\psi_s = -\text{MIRT}$$

رابطه (۲)

$$\psi_s = -(1.18 \times 10^{-2}) \times C - (1.18 \times 10^{-4}) \times C^2 + (2.67 \times 10^{-4}) \times C \times T + (8.39 \times 10^{-7}) \times C^2 \times T$$

در رابطه ۱، ψ_s پتانسیل اسمزی برحسب بار، M مولاریته محلول کلرید سدیم، I درجه یونیزاسیون کلرید سدیم، R ثابت گازها و T دما برحسب درجه کلوین و در رابطه ۲، ψ_s پتانسیل اسمزی بر حسب بار، C غلظت PEG برحسب گرم بر

کیلوگرم و T دما برحسب درجه سانتی گراد است.

نمونه برداری ۱۴ روز پس از آغاز تنش انجام و نمونه‌های گیاهی پس از انجماد با ازت مایع تا هنگام بررسی‌های بعدی به فریزر -80°C منتقل شدند. این آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد.

سنجش کلروفیل و کاروتنوئید: ۰/۱ گرم از نمونه برگ را در ۵ میلی لیتر استون ۸۰ درصد درون هاون چینی ساییده و توسط کاغذ صافی صاف و به حجم ۱۰ میلی لیتر رسانیده شد. شدت جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳ و ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Analytik Jena) خوانده شد. میزان کلروفیل و کاروتنوئید با استفاده از روابط زیر برحسب میلی گرم بر گرم وزن تر برگ محاسبه شد.

رابطه (۳)

$$\text{Chl a (mg g}^{-1}\text{)} = [12/V(A_{663}) - 2/69(A_{645})] \times V/(1000W)$$

رابطه (۴)

$$\text{Chl b (mg g}^{-1}\text{)} = [22/9(A_{645}) - 4/68(A_{663})] \times V/(1000W)$$

رابطه (۵)

$$\text{Chl a+b (mg g}^{-1}\text{)} = [20/2(A_{645}) - 8/02(A_{663})] \times V/(1000W)$$

رابطه (۶)

$$\text{Car (mg g}^{-1}\text{)} = [1000(A_{470}) - 1/82(\text{Chl a}) - 85/02(\text{Chl b})] / 198 \times V/(1000W)$$

در رابطه‌های فوق، V حجم نمونه استخراج شده برحسب میلی لیتر و W وزن تر نمونه برحسب گرم است (Arnon, 1949).

پراکسیداسیون لیپید و نشت یونی: محصول پراکسیداسیون لیپیدها، مالون دی آلدئید، با استفاده از روش تیوباربیتوریک اسید (TBA) تعیین شد. ۱ میلی لیتر TBA ۰/۵ درصد به ۱ میلی لیتر عصاره استخراج شده با تری کلرواستیک اسید (TCA) ۱۰ درصد اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 100°C نگهداری و بلافاصله روی یخ منتقل شد. جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Analytik Jena) خوانده شد. غلظت مالون دی آلدئید با استفاده

از ضریب خاموشی ($\epsilon=155 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$) محاسبه و برحسب میکرومول بر گرم وزن تازه بیان شد (De Vos et al., 1991). برای اندازه‌گیری نشت یونی ابتدا ۰/۳ گرم نمونه توزین و با آب مقطر شست‌وشو داده شد. سپس درون لوله‌های آزمایش حاوی ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر در دمای 25°C و به مدت ۲۴ ساعت با استفاده از شیکر تکان داده و پس از آن نشت یونی محلول L_1 با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC متر: مدل Eco Met ساخت کشور کره) اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد به نمونه‌ها ۲۰ سی‌سی آب مقطر اضافه و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای 121°C اتوکلاو و در پایان نشت یونی محلول L_2 اندازه‌گیری و میزان درصد نشت یونی EC با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد (Lutts et al., 1996).

رابطه (۷)

$$EC (\%) = [L_1 / (L_1 + L_2)] \times 100$$

سنجش پرولین آزاد کل: ۰/۲ گرم از برگ‌های جوان با ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالسیلیک اسید ۳ درصد (W/V) درون هاون چینی ساییده و به مدت ۱۰ دقیقه با دور $13000 \times g$ سانتریفیوژ شد. سپس به روشناور بدست آمده، ۲ میلی‌لیتر معرف ناین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال افزوده و به مدت یک ساعت در دمای 100°C قرار داده شد. پس از سرد کردن مخلوط واکنش روی یخ، به آن ۴ میلی‌لیتر تولوئن اضافه و پس از مخلوط‌شدن، جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Analytik Jena) خوانده شد (Bates et al., 1973).

استخراج و سنجش میزان فنل کل و اسیدرزمارینیک: ترکیبات فنلی کل براساس روش رنگ سنجی با استفاده از معرف فولین-سیوکالتیو اندازه‌گیری شد (Singleton and Rossi, 1965). ۰/۲ گرم نمونه خشک با استفاده از متانول با هم‌زدن پیوسته به مدت ۲۴ ساعت عصاره‌گیری شد. ۱۰۰ میکرولیتر معرف فولین-سیوکالتیو به ۲۰ میکرولیتر عصاره متانولی اضافه و بعد از گذشت ۵ دقیقه، ۳۰۰ میکرولیتر محلول کربنات سدیم اشباع شده اضافه و در تاریکی به مدت ۲ ساعت نگه‌داری شد. جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۶۵ نانومتر به وسیله

اسپکتروفتومتر خوانده و مقدار فنل کل برحسب منحنی استاندارد اسید گالیک محاسبه شد. برای استخراج اسید رزمارینیک عصاره‌گیری نمونه‌های خشک با استفاده از اتانول ۳۰٪ (v/v) صورت گرفت. مخلوط آزمایش شامل ۲۰۰ میکرولیتر از عصاره صاف شده، ۳ میلی‌لیتر اتانول و زیرکونیوم اکسی کلراید ZrOCl_2 در غلظت نهایی ۰/۵ مولار بود. مخلوط حاصل به مدت پنج دقیقه در تاریکی نگهداری و سپس جذب نمونه‌ها در طول موج ۳۶۲ نانومتر اندازه‌گیری و غلظت اسید رزمارینیک در هر نمونه، با استفاده از استاندارد اسید رزمارینیک برحسب میکروگرم بر گرم وزن خشک محاسبه شد (Ozturk et al., 2010).

سنجش میزان فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیا‌لیاز: به منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیا‌لیاز ۰/۲ گرم نمونه برگ‌ی منجمد را درون هاون توسط بافر Tris-HCl ۵۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۸/۸ حاوی مرکاپتواتانول دو میلی‌مولار ساییده و سپس با سرعت $9000 \times g$ به مدت ۱۰ دقیقه در دمای 4°C سانتریفیوژ و روشناور برای سنجش فعالیت آنزیم استفاده گردید. مخلوط واکنش شامل فنیل‌آلانین (۱۰ میلی‌مولار) به میزان ۰/۵ میلی‌لیتر، بافر Tris-HCl ۵۰ میلی‌مولار به میزان یک میلی‌لیتر با اسیدیته ۸/۸، آب مقطر به میزان ۰/۴ میلی‌لیتر و عصاره استخراجی به میزان ۰/۱ میلی‌لیتر بود. مخلوط واکنش به مدت یک ساعت در دمای 37°C نگهداری و واکنش آنزیمی با استفاده از اسید کلریدریک ۶ مولار متوقف شد. اسید سینامیک تولیدشده پس از استخراج توسط اتیل استات، در طول موج ۲۹۰ نانومتر مورد سنجش قرار گرفت. فعالیت آنزیم برحسب میزان اسید سینامیک به ازای میلی‌گرم پروتئین در مدت زمان یک ساعت بیان شد (Wang et al., 2006).

بررسی بیان نسبی ژن‌های فنیل‌آلانین آمونیا‌لیاز و رزمارینیک اسید سینتاز: استخراج RNA نمونه‌ها با استفاده از کیت Column RNA isolation kit براساس دستورالعمل شرکت سازنده (دنا زیست آسیا) انجام و پس از حذف DNA ژنومی با استفاده از آنزیم DNase1، محصول شرکت Thermo Scientific، کمیت و کیفیت RNA استخراجی با استفاده از

جدول ۱- مشخصات آغازگرهای اختصاصی برای واکنش‌های RT-PCR

ژن	توالی آغازگرها	شماره دسترسی (GenBank)	دمای اتصال (°C)	طول قطعه تکثیر شده (bp)
MoPAL	رفت: 5' GCCGAAGTCATGAACGGAAAGC 3'	FN665700	۵۸	۱۳۲
	برگشت: 5' CGCAGCCTTAACATAACCGCTC 3'			
MoRAS	رفت: 5' ACGCCCCGACCTCAACCTTATC 3'	FR670523	۵۸	۱۳۲
	برگشت: 5' AAGTGGTGCTCGTTTGCCACG 3'			
MoEF1 α	رفت: 5' TTGCTGCTGCAACAAGATGGAC 3'	HQ694771	۵۸	۱۳۲
	برگشت: 5' GGGACGAATGCGATTTTGTCCG 3'			

دستگاه نانودراپ و الکتروفورز در ژل آگارز تأیید شد. ساخت رشته اول cDNA از ۰/۵ میکروگرم RNA کل با استفاده از کیت RevertAid First Strand cDNA Synthesis kit شرکت Thermo Scientific انجام شد. به منظور بررسی بیان ژن‌ها از آغازگرهای اختصاصی جهت تکثیر cDNA استفاده شد (Doring et al., 2014). ژن EF1 α به عنوان شاهد داخلی جهت بررسی کمی بیان ژن‌ها در نظر گرفته شد. مشخصات آغازگرها در جدول ۱ نشان داده شده است. ساخت آغازگرها توسط شرکت ماکروژن کره جنوبی به سفارش شرکت دنا زیست آسیا صورت گرفت. مراحل واکنش شامل سه مرحله به ترتیب مرحله اول، ۹۵°C به مدت ۱۵ دقیقه، مرحله دوم، ۴۰°C چرخه ۹۵°C به مدت ۱۵ ثانیه، ۶۰°C به مدت ۳۰ ثانیه و ۷۲°C به مدت ۲۵ ثانیه و مرحله سوم، منحنی ذوب از ۵۵ تا ۹۵°C با فاصله‌های افزایشی ۰/۵°C در مدت ۱۵ ثانیه بود. دستگاه Real-time مدل 9600 plus شرکت Bioer، برای بررسی بیان ژن‌ها به روش Relative Quantitative PCR مورد استفاده قرار گرفت. بیان نسبی ژن‌های مورد نظر با استفاده از EF1 α به عنوان شاهد داخلی و روش $2^{-\Delta\Delta CT}$ محاسبه شد (Livak and Schmittgen, 2001).

کلیه بررسی‌های در سه تکرار مستقل، هر یک با سه تکرار تکنیکی انجام شد. از نرم افزار SPSS نسخه ۹ برای تجزیه آماری داده‌ها استفاده شد. با مشاهده تفاوت معنی‌دار در تجزیه واریانس (ANOVA)، مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد با آزمون دانکن صورت گرفت. برای محاسبه میانگین و

انحراف معیار و رسم نمودارها از بسته نرم افزاری Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر تنش خشکی و شوری بر میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی: میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید تحت تأثیر اثر تیمار در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲).

چنانچه در جدول ۳ نشان داده شده است گیاهان تحت تنش خشکی و شوری کاهش معنی‌دار کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید را نسبت به گیاهان بدون تیمار نشان دادند ($P \leq 0/05$). کاهش در میزان کلروفیل کل در تنش خشکی و شوری نسبت به شاهد حدود ۴۵ درصد بود، اگرچه میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاهان تحت تنش خشکی و شوری از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نشان نداد (جدول ۳).

تنش‌های غیرزیستی کارآیی فتوسنتز را از طریق تأثیر منفی بر بیوسنتز کلروفیل، عمل فتوسنتز، مکانیسم زنجیره انتقال الکترون و پارامترهای تبادلات گازی کاهش می‌دهند. خشکی و شوری با ایجاد تنش اسمزی منجر به تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند O_2^- و H_2O_2 می‌شوند که این مولکول‌های مخرب با پراکسیداسیون لیپیدها، تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی به ویژه کلروفیل را به دنبال خواهند داشت. به عبارتی دیگر تنش‌های خشکی و شوری با ناپایداری غشا تیلاکوئیدها از طریق کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی،

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات تنش شوری و خشکی بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید

منابع تغییر	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید
تیمار	۲	۱/۳۰۴**	۰/۱۶۹**	۲/۳۹۹**	۰/۰۸۸**
اشتباه	۶	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (%)		۷/۲۳	۴/۳۷	۴/۷۰	۳/۹۶

** اختلاف معنی دار در سطح آماری ۱ درصد

جدول ۳- تأثیرات تنش خشکی و شوری بر میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی

تیمار	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید
	(میلی گرم بر گرم وزن تر)			
بدون تیمار	۲/۳۵±۰/۱۲ ^a	۰/۹۹±۰/۰۳ ^a	۳/۳۴±۰/۱۳ ^a	۰/۷۷±۰/۰۱ ^a
تنش خشکی	۱/۱۷±۰/۱۱ ^b	۰/۶۰±۰/۰۰ ^b	۱/۷۷±۰/۱۱ ^b	۰/۴۶±۰/۰۲ ^b
تنش شوری	۱/۲۵±۰/۱۲ ^b	۰/۵۷±۰/۰۴ ^b	۱/۸۲±۰/۰۸ ^b	۰/۵۰±۰/۰۲ ^b

داده‌ها میانگین سه تکرار مستقل ± انحراف استاندارد و حروف متفاوت معرف اختلاف معنی دار ($P \leq 0.05$) براساس آزمون دانکن است.

به شدت فتوسنتز را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Sharma et al., 2019). به نظر می‌رسد تنش اسمزی حاصل از خشکی و شوری با افزایش سطح اسید آسبزیک، یک سری وقایع سیگنالینگ مرتبط با بیان ژن‌های مرتبط با تنش و مسیرهای انتقال پیام را فعال می‌کند که با فعال‌سازی کلروفیل‌از و تجزیه کلروفیل از طریق کاهش میزان کلروفیل، کارایی فتوسنتز را در گیاهان کاهش می‌دهد (Zou et al., 2010). بررسی‌ها نشان داده است که تنش‌های محیطی میزان کاروتنوئید را از نظر کمی و کیفی تحت تأثیر قرار می‌دهند. در گیاهان تحت تنش عدم تعادل بین جذب نوری فتوسنتز و تثبیت کربن در چرخه کالوین منجر به تحریک و برانگیختگی بیش از حد الکترون‌ها شده و با اکسید کردن کاروتنوئید و آسیب غشایی، کاهش میزان کاروتنوئید را در پی داشته است (Muller et al., 2001). کاهش میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در تنش خشکی و شوری در گیاه سیاهدانه (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۹) و شیرین بیان (حسینی و همکاران، ۱۳۹۸) گزارش شده است. همچنین تنش خشکی و شوری باعث کاهش میزان کلروفیل کل و کاروتنوئید در گیاه آویشن (Razavizadeh et al., 2017)

و ریحان (Menezes et al., 2017) شد که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت.

اثر تنش خشکی و شوری بر پارامترهای بیوشیمیایی:

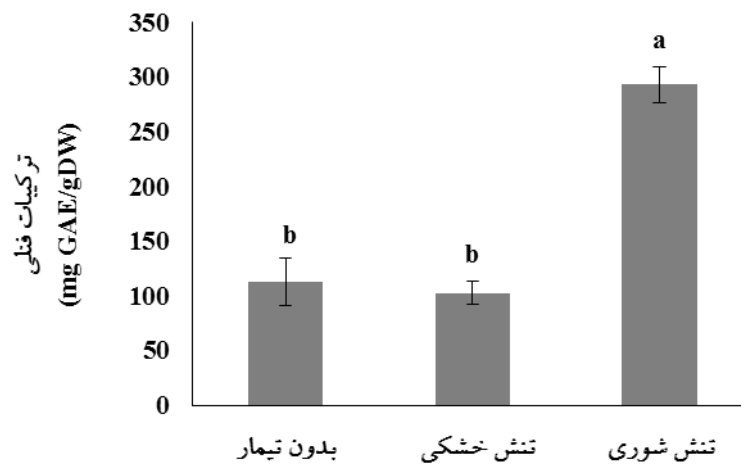
میزان ترکیبات فنلی، پرولین آزاد، مالون دی‌آلدئید و نشت یونی تحت تأثیر اثر تیمار در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۴).

میزان ترکیبات فنلی در گیاهان تحت تنش شوری به‌طور معنی‌داری نسبت به گیاهان بدون تیمار افزایش یافت؛ درحالی‌که در گیاهان تحت تنش خشکی میزان ترکیبات فنلی نسبت به گیاهان بدون تیمار، تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری ($P \leq 0.05$) نشان نداد (شکل ۲). ترکیبات فنلی گروه بزرگی از ملکول‌های آلی هستند که به‌عنوان آنتی‌اکسیدان در پاسخ به تنش‌های محیطی، قادر به حذف رادیکال‌های آزاد هستند. سنتز ترکیبات فنلی به‌رغم کاهش رشد گیاه در شرایط تنش، به‌مانند سدی دفاعی، گیاه را درمقابل تنش‌های محیطی حمایت می‌کند (Samec et al., 2021). بررسی‌های انجام‌شده، افزایش بیوسنتز و تجمع ترکیبات فنلی و متابولیت‌های ثانویه را در گیاه بادرنجبویه تحت تنش شوری نشان داده است

جدول ۴- تجزیه واریانس اثرات تنش شوری و خشکی بر میزان ترکیبات فنلی، پرولین آزاد، مالون دی آلدئید و نشت یونی

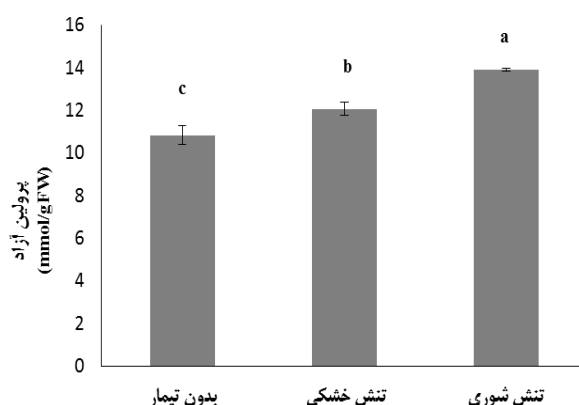
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		ترکیبات فنلی	پرولین آزاد	مالون دی آلدئید
تیمار	۲	۳۴۵۰۷/۲۵۶**	۷/۱۳۷**	۰/۳۴۸**
اشتباه	۶	۲۸۲/۰۵۶	۰/۵۳۰	۰/۰۰۸
ضریب تغییرات (%)		۹/۹۰	۵/۹۴	۸/۰۸
			۶/۸۱	۲۷۰/۴۴۶**

** اختلاف معنی دار در سطح آماری ۱ درصد

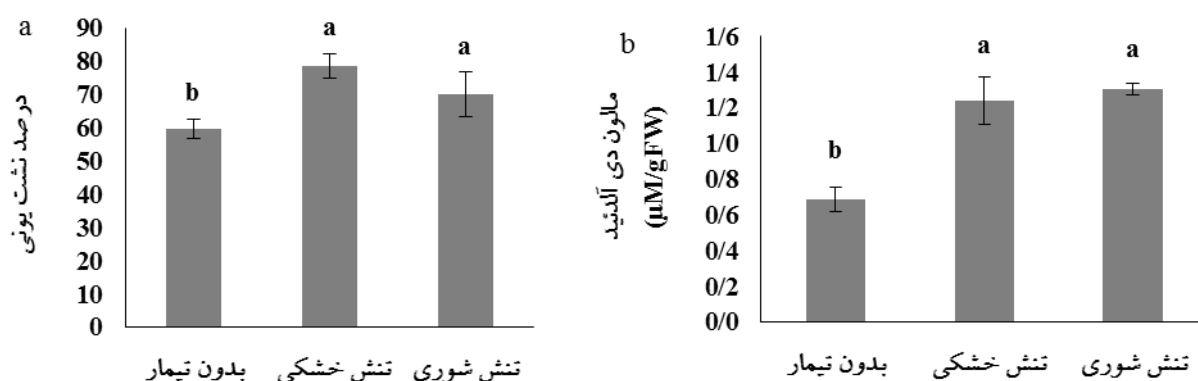
شکل ۲- تغییرات میزان ترکیبات فنلی تحت تنش خشکی و شوری. داده ها میانگین سه تکرار مستقل $\pm$ انحراف استاندارد و حروف متفاوت معرف اختلاف معنی دار ($P \leq 0/05$) براساس آزمون دانکن است.

پرولین تجمع یافته در طی تنش، علاوه بر تحمل در طول تنش به عنوان ذخیره نیتروژن آلی در بهبود تنش نیز نقش دارد. پرولین با حذف گونه های فعال اکسیژن، از طریق بهبود فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان، بهبود فعالیت فتوسیستم II در فتوستنز و رشد گیاه، حفظ وضعیت آبی مناسب و پایدار نمودن ساختار درشت مولکول ها در غشا، تحمل به تنش را در گیاهان افزایش می دهد (Ben Ahmed *et al.*, 2010). در این پژوهش افزایش بیشتر پرولین در تنش شوری می تواند تحمل گیاه بادرنجبویه به تنش شوری نسبت به تنش خشکی را نشان دهد. این نتیجه با نتایج قدیری و همکاران (۱۳۹۹) در افزایش سطح پرولین برگ ها در زمان تنش و افزایش تحمل به تنش خشکی مطابقت داشت.

(Hawrylak-Nowak *et al.*, 2021). با توجه به نتایج این پژوهش، افزایش میزان ترکیبات فنلی در تنش شوری نسبت به تنش خشکی می تواند مقاومت بیشتر گیاه بادرنجبویه به تنش شوری و یا حساسیت بیشتر آن را به تنش خشکی نشان دهد. براساس نتایج نشان داده شده در شکل ۳، تنش طولانی مدت خشکی و شوری در گیاه بادرنجبویه، میزان پرولین آزاد را نسبت به گیاهان بدون تیمار افزایش داد. در گیاهان تحت تنش خشکی و شوری به ترتیب افزایش ۱۱ و ۲۵ درصد پرولین در پاسخ به این تنش ها نسبت به گیاهان بدون تیمار مشاهده شد (شکل ۳). تجمع اسموپروتکتانت هایی مانند پرولین در گیاهان تحت تنش یکی از پاسخ های دفاعی جهت حفظ فشار اسمزی سلول است. ظرفیت تجمع پرولین در شرایط تنش با تحمل تنش در گیاهان ارتباط دارد. به عبارتی



شکل ۳- تغییرات میزان پرولین آزاد تحت تنش خشکی و شوری. داده‌ها میانگین سه تکرار مستقل $\pm$ انحراف استاندارد و حروف متفاوت معرف اختلاف معنی‌دار ($P \leq 0.05$) براساس آزمون دانکن است.



شکل ۴- تأثیر تنش خشکی و شوری بر درصد نشت یونی (a) و میزان مالون دی آلدئید (b). داده‌ها میانگین سه تکرار مستقل $\pm$ انحراف استاندارد و حروف متفاوت معرف اختلاف معنی‌دار ($P \leq 0.05$) براساس آزمون دانکن است.

مالون دی آلدئید را در گیاه بادرنبویه به دنبال داشت (Jamal Omid et al., 2018). افزایش میزان آسیب به غشای سلولی در شرایط تنش، کاهش نفوذپذیری انتخابی غشا و افزایش نشت یونی را موجب می‌شود (Morales and Munne-Bosch, 2019). نتایج مطالعه رحمانی و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی اثر تنش خشکی و شوری با پتانسیل اسمزی برابر بر گیاه سیاهدانه نشان داده است که افزایش بیشتر میزان مالون دی آلدئید در تنش خشکی نسبت به تنش شوری حساس بودن گیاه را به تنش خشکی نسبت به شوری تأیید کرده است.

اثر تنش خشکی و شوری بر فعالیت، بیان ژن فنیل آلانین آمونیا لایاز، بیان ژن رزمارینیک اسید سیتاز و میزان اسید رزمارینیک: فعالیت آنزیم و بیان نسبی ژن فنیل آلانین

میزان مالون دی آلدئید و درصد نشت یونی در گیاهان تحت تنش خشکی و شوری نسبت به گیاهان بدون تیمار افزایش معنی‌داری نشان داد (شکل ۴ a, b)؛ به گونه‌ای که میزان مالون دی آلدئید در گیاهان تحت تنش حدود دو برابر گیاهان بدون تیمار بود. همچنین درصد نشت یونی در شرایط تنش به طور متوسط نسبت به گیاهان بدون تنش ۱/۲ برابر افزایش یافت (شکل ۴). در این پژوهش، در میزان مالون دی آلدئید و درصد نشت یونی در گیاهان تحت تنش خشکی و شوری از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۴). تنش‌های غیرزیستی با ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن با پراکسیده کردن لیپیدهای غشایی، افزایش میزان مالون دی آلدئید را موجب می‌شوند (Sachdev et al., 2021). تنش خشکی افزایش میزان

جدول ۵- تجزیه واریانس اثرات تنش خشکی و شوری بر فعالیت فنیل آلانین آمونیلیاز (PAL)، بیان نسبی ژن‌های فنیل آلانین آمونیلیاز و رزمارینیک اسید سینتاز (RAS) و میزان اسید رزمارینیک (RA)

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		فعالیت آنزیم PAL	بیان نسبی ژن PAL	بیان نسبی ژن RAS
تیمار	۲	۱۱۷۰۲۲/۱۶۹ **	۵/۶۰۹ **	۱/۵۶۵ **
اشتباه	۶	۱۱۶۵/۸۷۷	۰/۱۶۳	۰/۰۷۵
ضریب تغییرات (%)		۵/۵۱	۲۵/۵۴	۱۵/۶۵
میزان RA				۱۱۰۸/۱۷۹ **
میزان RAS				۱۰/۵۲۵
میزان PAL				۳/۹۰

** اختلاف معنی‌دار در سطح آماری ۱ درصد

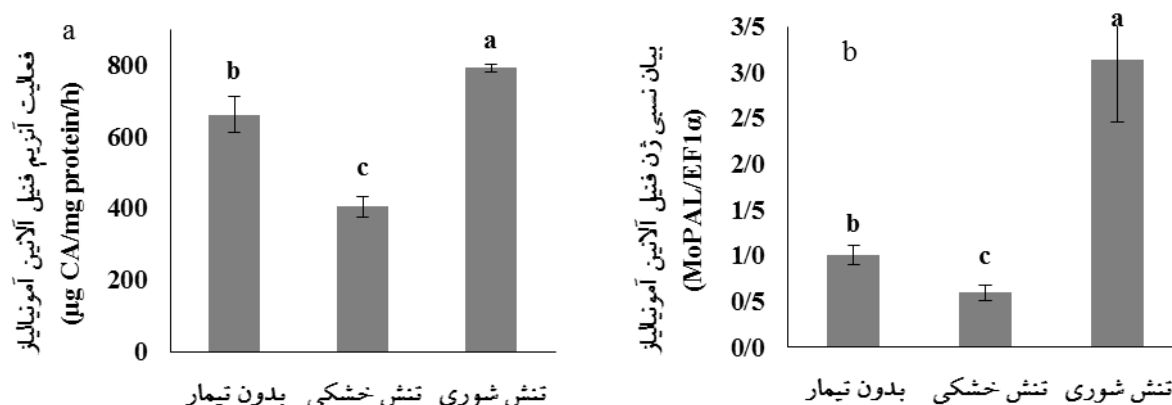
آمونیلایز، بیان نسبی ژن رزمارینیک اسید سینتاز و میزان اسید رزمارینیک تحت تأثیر تیمار در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۵).

براساس نتایج نشان داده شده در شکل ۵ بیان نسبی ژن و فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیلیاز با یکدیگر مطابقت داشت. بیان نسبی ژن و فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیلیاز در گیاهان تحت تنش خشکی نسبت به گیاهان شاهد به میزان ۴۱ و ۳۹ درصد کاهش یافت. درحالی‌که در گیاهان تحت تنش شوری بیان نسبی ژن فنیل آلانین آمونیلیاز نسبت به گیاهان شاهد حدود سه برابر افزایش نشان داد. همچنین افزایش ۲۰ درصد فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیلیاز در گیاهان تحت تنش شوری در مقایسه با گیاهان شاهد مشاهده شد (شکل ۵).

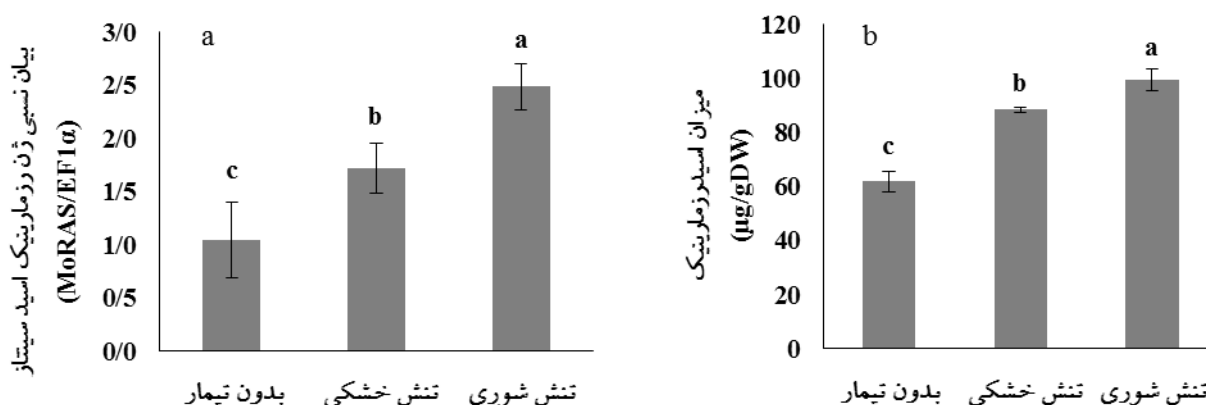
آنزیم فنیل آلانین آمونیلیاز به وسیله خانواده چندژنی کوچکی در گیاهان بیان می‌شود. از آنجایی‌که آنزیم فنیل آلانین آمونیلیاز در پاسخ‌های دفاعی سلول‌های گیاهی نقش دارد، فعالیت و بیان ژن آن در برابر تنش‌های مختلف، از قبیل زخم، خشکی، شوری، فلزات سنگین و حملات ویروسی، باکتریایی یا قارچی تغییر نشان داده است (Olsen et al., 2008). بررسی فعالیت و بیان ژن فنیل آلانین آمونیلیاز در درک بهتر مکانیسم‌های دفاعی در مقابل تنش‌های مختلف در گیاهان دارویی به‌طور قابل توجهی مفید خواهد بود. نتایج مطالعات نشان داده است ژن‌های کدکننده آنزیم‌های مسیر بیوسنتزی فنیل پروپانوییدی اغلب در هماهنگی با بیان ژن فنیل آلانین آمونیلیاز تنظیم و سنتز ترکیبات فنلی را موجب می‌شوند (Sharma et al., 2019). گیاهان بادرنجبویه تحت تنش اوزون،

افزایش دو برابری بیان ژن فنیل آلانین آمونیلیاز را نسبت به شاهد نشان دادند (Doring et al., 2014). همچنین گزارش‌هایی در تأیید ارتباط بین افزایش بیان ژن فنیل آلانین آمونیلیاز با تحمل بیشتر به شرایط تنش در گیاهان مشاهده شده است (Vafadar et al., 2020; Nag and Kumaria, 2018; Soleimani et al., 2017). فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیلیاز، آنزیمی کلیدی در شروع مسیر فنیل پروپانوییدی، در اغلب موارد، به‌صورت یک محافظ علیه تنش‌های گیاهی عمل می‌کند (Sahu et al., 2013). براساس نتایج این پژوهش بیان نسبی ژن فنیل آلانین آمونیلیاز نشان داد افزایش بیان این ژن در تنش شوری که با فعالیت آن مطابقت داشت مقابله بهتر گیاه بادرنجبویه را در برابر تنش شوری نسبت به تنش خشکی با پتانسیل اسمزی برابر تأیید می‌کند.

بیان نسبی ژن رزمارینیک اسید سینتاز در تنش خشکی و شوری نسبت به گیاهان بدون تیمار به ترتیب ۱/۶ و ۲/۱ برابر افزایش نشان داد (شکل ۶). افزایش بیان ژن رزمارینیک اسید سینتاز در تنش خشکی و شوری نسبت به گیاهان شاهد در راستای نتایج مطالعات دیگر در گیاه بادرنجبویه بود (Vafadar et al., 2020; Ahmadi et al., 2019). براساس نتایج بررسی DNA ژنومی و ساترن بلات، ژن اسید رزمارینیک سینتاز در بادرنجبویه فاقد ایترون و تنها یک نسخه از این ژن در گیاه بادرنجبویه وجود دارد (Weitzel and Petersen, 2011). افزایش بیان ژن رزمارینیک اسید سینتاز در گیاه بادرنجبویه در استفاده از اسید آبسزیک به‌عنوان یک فیتوهورمون تنش و تابش اوزون نسبت به گیاهان شاهد گزارش شده است



شکل ۵- فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالیز (a) و بیان نسبی ژن (b) تحت تنش خشکی و شوری. داده‌ها میانگین سه تکرار مستقل $\pm$ انحراف استاندارد و حروف متفاوت معرف اختلاف معنی‌دار ($P \leq 0.05$) براساس آزمون دانکن است.



شکل ۶- بیان نسبی ژن رزمارینیک اسید سینتاز (a) و میزان اسید رزمارینیک (b) تحت تنش خشکی و شوری. داده‌ها میانگین سه تکرار مستقل $\pm$ انحراف استاندارد و حروف متفاوت معرف اختلاف معنی‌دار ($P \leq 0.05$) براساس آزمون دانکن است.

بیان ژن رزمارینیک اسید سینتاز در تنش خشکی و شوری هماهنگ بود. افزایش میزان اسید رزمارینیک با افزایش بیان ژن رزمارینیک اسید سینتاز در گیاه بادرنجبویه تحت تنش گرمایی و شوری و همچنین در گیاه آویشن در تنش خشکی، در نتایج سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Vafadar *et al.*, 2020; Trocsanyi *et al.*, 2015; Pistelli *et al.*, 2019). اثر تنش‌های غیرزیستی بر تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان مختلف نشان داده شده است (Kumar and Sharma, 2018). متابولیت‌های ثانویه، به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی با حذف گونه‌های فعال اکسیژن نقش مهمی در مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی دارند (Isah, 2019). بنابراین گیاه

(Mousavi and Shabani, 2019; Doring *et al.*, 2014). همچنین در گیاه آویشن تحت تنش خشکی، افزایش بیان ژن رزمارینیک اسید سینتاز مشاهده شده است ارتباط تغییرات میزان اسید رزمارینیک با فعالیت و بیان ژن‌های دخیل در مسیر بیوسنتزی آن در گیاه بادرنجبویه نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۱ نشان داده شده است تشکیل اسید رزمارینیک در این مسیر بیوسنتزی توسط آنزیم رزمارینیک اسید سینتاز کاتالیز می‌شود (Weitzel and Petersen, 2011). براساس نتایج نشان داده شده در شکل ۶ میزان اسید رزمارینیک در تنش خشکی و شوری در مقایسه با گیاهان بدون تیمار به‌میزان ۴۲ و ۶۰ درصد افزایش یافت. افزایش میزان اسید رزمارینیک با افزایش

بادرنجبویه در تنش شوری با افزایش سنتز و تجمع میزان اسید رزمارینیک نسبت به تنش خشکی مقاومت بیشتری نشان داده است.

نتیجه‌گیری

تنش‌های غیرزیستی از قبیل خشکی و شوری اصلی‌ترین عوامل محیطی هستند که تولید محصول را در دنیا تحت‌تأثیر قرار داده‌اند. تنش اسمزی حاصل از این تنش‌ها فرایندهای فیزیولوژیکی و مولکولی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش پاسخ‌های فیزیولوژیکی و مولکولی گیاه بادرنجبویه به تنش اسمزی حاصل از خشکی و شوری با پتانسیل اسمزی

برابر در کشت هیدروپونیک متفاوت بود. در تنش شوری نسبت به تنش خشکی محتوای پرولین، ترکیبات فنلی و اسید رزمارینیک افزایش بیشتری نسبت به شاهد نشان داد. به عبارتی گیاه بادرنجبویه در تنش شوری با افزایش میزان پرولین و ترکیبات فنلی و همچنین سنتز بیشتر متابولیت ثانویه اسید رزمارینیک از طریق افزایش بیان ژن و فعالیت آنزیم‌های کلیدی دخیل در بیوسنتز آن، توان دفاع آنتی‌اکسیدانی خود را افزایش داده و پاسخ‌های دفاعی مناسب‌تری در تنش شوری نسبت به تنش خشکی نشان داده است.

منابع

حسینی، م.، صمصام‌پور، د.، ابراهیمی، م. و خان احمدی، م. (۱۳۹۸) ارزیابی خصوصیات مورفولوژیکی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی آنتی‌اکسیدان‌ها تحت شرایط تنش خشکی در دو ژنوتیپ شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra* L.). فرآیند و کارکرد گیاهی ۸: ۳۱۰-۲۹۹.

رحمانی، و.، موحدی دهنوی، م.، یدوی، ع. ر.، بلوچی، ح. م. و حمیدیان، م. (۱۳۹۹) پاسخ‌های فیزیولوژیک سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) به سیلیکات کلسیم تحت تنش‌های شوری و خشکی با پتانسیل اسمزی برابر. فرآیند و کارکرد گیاهی ۹: ۹۰-۷۷.

قدیری، ا.، جهانبخش گده‌کهریز، س. و رئیسی ساداتی، س. ی. (۱۳۹۹) مطالعه میزان پروتئین کل، قند محلول، محتوای پرولین و بیان ژن *P5CS* در برگ‌های سه رقم گندم تحت تنش خشکی. مجله بیوتکنولوژی کشاورزی ۱۲: ۱۲۴-۱۲۵.

Ahmadi, T., Shabani, L. and Sabzalian, M. (2019) Improvement in drought tolerance of lemon balm, *Melissa officinalis* L. under the pre-treatment of LED lighting. *Plant Physiology and Biochemistry* 139: 548-557.

Amini, S., Ghobadi, C. and Yamchi, A. (2015) Proline accumulation and osmotic stress: An overview of *P5CS* gene in plants. *Journal of Plant Molecular Breeding* 3: 44-55.

Arnon, D. I. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* 24: 1-15.

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

Ben Ahmed, C., Ben Rouina, B., Sensoy, S., Boukhriess, M. and Ben Abdullah, F. (2010) Exogenous proline effects on photosynthetic performance and antioxidant defense system of young olive tree. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58: 4216-4222.

Cramer, G. R., Urano, K., Delrot, S. Pezzotti, M. and Shinozaki, K. (2011) Effects of abiotic stress on plants: A systems biology perspective. *BMC Plant Biology* 11: 1-14.

De Vos, C., Schat, H., De Waal, M., Vooijs, R. and Ernst, W. (1991) Increased resistance to copper induced damage of the root cell plasmalemma in copper tolerant *Silene cucubalus*. *Physiologia Plantarum* 82: 523-528.

Doring, A. S., Pellegrini, E., Della Batola, M., Nali, C., Lorenzini, G. and Petersen, M. (2014) How do background ozone concentrations affect the biosynthesis of rosmarinic acid in *Melissa officinalis*? *Journal of Plant Physiology* 171: 35-41.

Hawrylak-Nowak, B., Dresler, S., Stasinska-Jakubas, M., Wojciak, M., Sowa, I. and Matraszek-Gawron, R. (2021) NaCl-induced elicitation alters physiology and increases accumulation of phenolic compounds in *Melissa officinalis* L. *International Journal of Molecular Sciences* 22: 6844.

Isah, T. (2019) Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. *Biological Research* 52: 1-25.

Isayenkov, S. (2012) Physiological and molecular aspects of salt stress in plants. *Cytology and Genetics* 46: 302-318.

- Jamal Omid, F., Mohajjel Shoja, H. and Sariri, R. (2018) Effect of water-deficit stress on secondary metabolites of *Melissa officinalis* L.: Role of exogenous salicylic acid. *Caspian Journal of Environmental Sciences*: 16: 121-134.
- Kittler, J., Kruger, H., Ulrich, D., Zeiger, B., Schutze, W., Bottcher, C., Krahmer, A., Gudi, G., Kastner, U., Heuberger, H. and Marthe, F. (2018) Content and composition of essential oil and content of rosmarinic acid in lemon balm and balm genotypes (*Melissa officinalis*). *Genetic Resources and Crop Evolution* 65: 1517-1527.
- Kumar, I. and Sharma, R. K. (2018) Production of secondary metabolites in plants under abiotic stress: An overview. *Significances of Bioengineering and Biosciences* 2: 196-200.
- Livak, K. and Schmittgen, T. (2001) Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method. *Methods* 25: 402-408.
- Lutts, S., Kinet, J. and Bouharmont, J. (1996) NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany* 78: 389-398.
- Menezes, R. V., Azevedo Neto, A. D., Gheyi, H. R., Cova, A. M. and Silva, H. H. (2017) Tolerance of basil genotypes to salinity. *Journal of Agricultural Science* 9: 283-295.
- Moradkhani, H., Sargsyan, E., Bibak, H., Naseri, B., Sadat-Hosseini, M., Fayazi-Barjin, A. and Meftahizade, H. (2010) *Melissa officinalis* L., a valuable medicine plant: A review. *Journal of Medicinal Plants Research* 4: 2753-2759.
- Morales, M. and Munne-Bosch, S. (2019) Malondialdehyde: facts and artifacts. *Plant Physiology* 180: 1246-1250.
- Mousavi, S. and Shabani, L. (2019) Rosmarinic acid accumulation in *Melissa officinalis* shoot cultures is mediated by ABA. *Biologia Plantarum* 63: 418-424.
- Muller, P., Li, X. P. and Niyogi, K. K. (2001) Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. *Plant Physiology* 125: 1558-1566.
- Nag, S. and Kumaria, S. (2018) In silico characterization and transcriptional modulation of phenylalanine ammonia lyase (PAL) by abiotic stresses in the medicinal orchid *Vanda coerulea* Griff. ex Lindl. *Phytochemistry* 156: 176-183.
- Olsen, K. M., Lea, U. S., Slimestad, R., Verheul, M. and Lillo, C. (2008) Differential expression of four Arabidopsis PAL genes; PAL1 and PAL2 have functional specialization in abiotic environmental-triggered flavonoid synthesis. *Journal of Plant Physiology* 165: 1491-1499.
- Ozturk, M., Duru, M. E., Ince, B., Harmandar, M. and Topcu, G. (2010) A new rapid spectrophotometric method to determine the rosmarinic acid level in plant extracts. *Food Chemistry* 123: 1352-1356.
- Pistelli, L., Tonelli, M., Pellegrini, E., Cotrozzi, L., Pucciariello, C., Trivellini, A., Lorenzini, G. and Nali, C. (2019) Accumulation of rosmarinic acid and behaviour of ROS processing systems in *Melissa officinalis* L. under heat stress. *Industrial Crops and Products* 138: 111469.
- Razavizadeh, R., Adabavazeh, F., Rostami, F. and Teimouri, A. (2017) Comparative study of osmotic stress effects on the defense mechanisms and secondary metabolites in *Carum copticum* seedling and callus. *Journal of Plant Process and Function* 5: 24-33.
- Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M. and Hasanuzzaman, M. (2021) Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants* 10: 277.
- Sahu, R., Gangopadhyay, M. and Dewanjee, S. (2013) Elicitor-induced rosmarinic acid accumulation and secondary metabolism enzyme activities in *Solenostemon scutellarioides*. *Acta Physiologiae Plantarum* 35: 1473-1481.
- Samec, D., Karalija, E., Sola, I., Vujcic Bok, V. and Salopek-Sondi, B. (2021) The role of polyphenols in abiotic stress response: The influence of molecular structure. *Plants* 10: 118.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P. and Khanna, K. (2019) Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: A review. *Journal of Plant Growth Regulation* 1-23.
- Singleton, V. L. and Rossi, J. A. (1965) Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16: 144-158.
- Soleimani, Z., Afshar, A. and Nematpour, F. (2017) Responses of antioxidant gene and enzymes to salinity stress in the *Cuminum cyminum* L. *Russian Journal of Plant Physiology* 64: 361-367.
- Trocsanyi, E., Gyorgy, Z., Inotai, K., Szabo, K., Pluhar, Z., Radacsi, P., Malekzadeh, M. and Nemeth-Zamborine, E. (2015) Enhanced rosmarinic acid accumulation and rosmarinic acid synthase gene expression under drought stress in thyme (*Thymus vulgaris*). *Planta Medica* 81: 246.
- Vafadar, F., Amooaghaie, R., Ehsanzadeh, P., Ghanadian, M., Talebi, M. and Ghanati, F. (2020) Melatonin and calcium modulate the production of rosmarinic acid, luteolin, and apigenin in *Dracocephalum kotschyi* under salinity stress. *Phytochemistry* 177: 112422.

- Wang, J., Zheng, L., Wu, J. and Tan, R. (2006) Involvement of nitric oxide in oxidative burst, phenylalanine ammonia-lyase activation and Taxol production induced by low-energy ultrasound in *Taxus yunnanensis* cell suspension cultures. *Nitric Oxide* 15: 351-358.
- Weitzel, C. and Petersen, M. (2011) Cloning and characterisation of rosmarinic acid synthase from *Melissa officinalis* L. *Phytochemistry* 72: 572-578.
- Zou, J. J., Wei, F. J., Wang, C., Wu, J. J., Ratnasekera, D., Liu, W. X. and Wu, W. H. (2010) Arabidopsis calcium-dependent protein kinase CPK10 functions in abscisic acid-and Ca^{2+} -mediated stomatal regulation in response to drought stress. *Plant Physiology* 154: 1232-1243.

Comparison of physiological and molecular responses of *Melissa officinalis* L. to osmotic stress imposed by drought and salinity with iso-osmotic potential in hydroponic culture

Mohammadreza Dehghani and Maryam Dahajipour Heidarabadi*

Department of Genetics and Plant Production, Agriculture College, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

(Received: 27/08/2021, Accepted: 08/02/2022)

Abstract

This study was performed to compare some physiological and molecular responses of lemon balm to osmotic stress imposed by drought and salinity stresses with equal osmotic potential in hydroponic culture. Growing lemon balm plants in hydroponic culture were treated with drought and salinity stress using polyethylene glycol 6000 and sodium chloride for 14 days. Then, seedlings were sampled to evaluate the amount of photosynthetic pigments, proline, phenolic compounds, malondialdehyde, ion leakage percentage, phenylalanine ammoniolyase activity and the amount of rosmarinic acid. Also, the expression of phenylalanine ammoniolyase and rosmarinic acid synthase genes was examined by real-time PCR. This experiment was performed as a completely randomized design with three replications. The results showed that photosynthetic pigments, phenolic compounds, free proline, malondialdehyde, ion leakage, enzyme activity and relative expression of phenylalanine ammoniolyase gene, relative expression of rosmarinic acid synthase and rosmarinic acid content affected by drought and salinity stresses at one percent level of probability. Also, a significant reduction in photosynthetic pigments was observed in drought and salinity stresses. The phenolic compounds content in plants under salinity stress increased compared to the plants under drought stress and untreated. The increase in free proline in plants under drought and salinity stresses was 11% and 25%, respectively. The amount of malondialdehyde and the percentage of ion leakage in plants under drought and salinity stress increased compared to the control plants. Relative gene expression and phenylalanine ammoniolyase activity increased in salinity stress. Increasing the relative gene expression of rosmarinic acid synthase in drought and salinity stresses increased rosmarinic acid content by 42 and 60% compared to untreated plants. According to the results, lemon balm responded differently to drought and salinity with iso-osmotic potential. In another words, the plant had a better response to osmotic stress induced by salinity than drought with more increase in proline, phenolic compounds, rosmarinic acid contents, relative gene expression and phenylalanine ammoniolyase enzyme activity.

Keywords: Drought, Lemon balm, Phenylalanine ammoniolyase, Rosmarinic acid, Salinity

Corresponding author, Email: m.dahaji@vru.ac.ir