فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۴، شماره ۶۵، خرداد و تیرماه ۱۴۰۴ صفحه: ۲۶۵-۲۸۵
https://doi.org/10.22034/14.66.265

مقاله پژوهشی

بهبود محتوای اسانس و ترکیبات فعال در رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) از طریق محلول‌پاشی ال- فنیل آلانین و القای تنش خشکی

مرضیه سلطانی آلکویی[۱]، علی عباسی سورکی[۱*]، سینا فلاح[۱]، مهدی قاسمی نافچی[۲]

[۱] گروه علوم زراعت، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

[۲] گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸)

چکیده

به منظور بررسی اثر ال-فنیل آلانین بر متابولیت‌های ثانویه گیاه رزماری در شرایط تنش خشکی، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد در سال ۱۴۰۰ انجام گرفت. آبیاری کامل و ۵۰ درصد آبیاری کامل به عنوان فاکتور اول و غلظت‌های مختلف ال-فنیل آلانین (۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر) به عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شدند. تنش خشکی سبب کاهش کلروفیل ***a*** (۳۶ درصد)، کلروفیل ***b*** (۴۶ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (۱۴/۴ درصد)، عملکرد اسانس در بوته (۱۲ درصد) و افزایش کاروتنوئیدها (۱۱۴ درصد)، فعالیت آنزیم **PAL** (۴۰/۶ درصد)، فنول کل (۵/۷ درصد)، فلاونوئید کل (۳۵/۶ درصد) و قدرت آنتی‌اکسیدانی عصاره (۵/۶ درصد) در مقایسه با آبیاری کامل شد. کاربرد غلظت‌های ۸۰ تا ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر ال-فنیل آلانین سبب افزایش کلروفیل ***a*** (۳۱ تا ۴۱/۴ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (۱۷/۷ تا ۱۴/۷ درصد)، فعالیت آنزیم **PAL** (۲۷ تا ۳۸/۷ درصد)، فنول کل (۱۲/۴ تا ۱۳/۴ درصد)، فلاونوئید کل (۶۰ تا ۶۹ درصد)، قدرت آنتی‌اکسیدانی عصاره (۱۰/۷ تا ۱۱/۵ درصد)، محتوی اسانس (۵/۸ تا ۷/۶ درصد) و عملکرد اسانس (۲۲/۷ تا ۲۷ درصد) در مقایسه با شاهد شد. به دلیل عدم اختلاف معنی‌دار بین غلظت‌های مختلف ال-فنیل آلانین، ۸۰ میلی‌گرم در لیتر به عنوان غلظت بهینه قابل توجه است. ترکیبات اصلی اسانس آلفا-پینن (۱۱/۹ درصد)، ۸،۱-سینئول (۷/۶ درصد)، کامفور (۱۲/۸ درصد)، بورنئول (۱۰/۴ درصد) و بورنیل استات (۱۲/۸ درصد) بودند. تنش خشکی سبب کاهش میزان آلفا-پینن، ۸،۱-سینئول و کامفور و افزایش بورنئول و بورنیل استات شد. در محلول‌پاشی رزماری با ال- فنیل آلانین، بالاترین میزان آلفا-پینن، ۸،۱-سینئول و کامفور در غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر و بالاترین میزان بورنئول و بورنیل استات در غلظت ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر بدست آمد. بنابراین می‌توان با اعمال تنش خشکی کنترل‌شده و همچنین محلول‌پاشی ال- فنیل آلانین، سبب افزایش میزان متابولیت‌های ثانویه عصاره و ترکیبات اسانس شده و با بهبود قدرت آنتی‌اکسیدانی عصاره رزماری، از فراورده‌های آن در صنایع مختلف استفاده کرد.

کلمات کلیدی: آنتی‌اکسیدان، رزماری، آبیاری، فنول، فنیل آلانین آمونیالیاز

مقدمه

در بدن انسان در شرایط نرمال بین تولید رادیکال‌های آزاد (ROS) و دفاع آنتی‌اکسیدانی تعادل برقرار است. با این حال، منابع خارجی رادیکال‌های آزاد مانند دود سیگار و تنباکو،

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: aliabbasis.1359@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌هایی مانند NO و NO_2، عامل افزایش سطح ROS و برهم خوردن تعادل ردوکس در بدن هستند (Valko *et al.*, 2007). این وضعیت می‌تواند به ساختار سلولی آسیب رسانده و هموستاز سلولی را مختل کند (Chaudhary *et al.*, 2023). از این‌رو مصرف آنتی‌اکسیدان‌های خارجی چه به شکل مصنوعی یا طبیعی، راهکار مؤثری برای مبارزه با رادیکال‌های آزاد هستند. آنتی‌اکسیدان‌های مصنوعی به دلیل پایداری و عملکرد بالاتر، هزینه‌های پایین و در دسترس بودن، در محصولات غذایی کاربرد گسترده‌تری دارند (Xiu-Qin *et al.*, 2009). اما مصرف طولانی مدت آن‌ها می‌تواند موجب آسیب به سلامت انسان مانند ایجاد آلرژی‌های پوستی، مشکلات دستگاه گوارش و سرطان شود (Bleve *et al.*, 2008). علاوه بر این، دوزهای بالای این آنتی‌اکسیدان‌ها ممکن است به DNA آسیب برسانند و فرآیند پیری زودرس را القا کنند (Kornienko *et al.*, 2019). بنابراین گرایش به جایگزینی این ترکیبات با آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

گیاهان دارویی به دلیل وجود مواد شیمیایی فعال، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی در صنایع غذایی، داروسازی و آرایشی- بهداشتی کاربرد دارند (Jamshidi-Kia *et al.*, 2017). گیاهانِ دارویی پرمصرف با فعالیت آنتی‌اکسیدانی متعلق به گیاهانی از چندین تیره، به ویژه نعناعیان (Lamiaceae) هستند (Aebisher *et al.*, 2021). رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) گیاه دارویی چند ساله و همیشه سبز از تیره نعناعیان و بومی منطقه مدیترانه است (Novak and Bluthner, 2020). ترکیبات عصاره و اسانس رزماری به دلیل خاصیت آنتی‌اکسیدانی به منظور جلوگیری از اکسیداسیون در افزایش ماندگاری محصولات غذایی استفاده می‌شوند (Khan *et al.*, 2023). آنتی‌اکسیدان‌ها ترکیباتی هستند که با رادیکال‌های آزاد واکنش داده و واکنش زنجیره‌ای را با حذف واسطه‌های رادیکال آزاد خاتمه داده و واکنش‌های اکسیداسیون را مهار می‌کنند (Mamta *et al.*, 2014). خاصیت آنتی‌اکسیدانی عمدتاً به دلیل وجود متابولیت‌های ثانویه گیاهی مانند فنول‌ها، فلاونوئیدها، کاروتنوئیدها و ترپنوئیدها است (Nieto *et al.*, 2018).

در گیاهان متابولیت‌های ثانویه در طول مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌های اولیه تولید می‌شوند. این ترکیبات را می‌توان به عنوان محصولات مسیرهای جانبی بیوشیمیایی در سلول‌های گیاهی در نظر گرفت. این متابولیت‌ها نقش مهمی در محافظت از گیاهان در برابر تنش‌های محیطی دارند و شامل آلکالوئیدها، فلاونوئیدها، گلیکوزیدها، تانن‌ها، ساپونین‌ها، فنول‌ها و ترپنوئیدها هستند (Chaturvedi and Gupta, 2021). ترکیبات فنولی از مسیر اسید شیکیمیک و مسیر مالونیک سنتز می‌شوند. در گیاهان مسیر اسید شیکیمیک از اهمیت بالایی برخوردار است و در طول این مسیر ترکیبات ثانویه فنولی و فلاونوئیدی از طریق حذف یک مولکول آمونیاک از فنیل آلانین و تبدیل آن به اسید سینامیک که توسط آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز (PAL) کاتالیز می‌شود، سنتز می‌شوند (Sharma *et al.*, 2019). آنزیم PAL یکی از آنزیم‌های مهم در ساخت متابولیت‌های ثانویه در گیاه است. PAL را می‌توان به عنوان آنزیم کلیدی بین سنتز متابولیت‌های اولیه و ثانویه در نظر گرفت. PAL با تبدیل فنیل آلانین به اسید سینامیک، مسیر فنیل پروپانوئید را راه‌اندازی می‌کند (Feduraev *et al.*, 2020). ظرفیت آنتی‌اکسیدانی فنول‌ها شامل ترکیبی از مکانیسم‌های مختلف از جمله مهار رادیکال‌های آزاد، اهدای اتم‌های هیدروژن، خنثی‌کردن اکسیژن منفرد، کلات یون‌های فلزی و فعالیت‌هایی به عنوان بستر اکسیداسیون است (Chrysargyris *et al.*, 2020).

ترپنوئیدها نیز گروه بزرگی از ترکیبات فرار طبیعی با عملکردهای مهم بیولوژیکی هستند که در اسانس گیاه وجود دارند. دو مسیر بیوشیمیایی جهت سنتز آن‌ها وجود دارد. مسیر اول متیل اریتریتول فسفات (MEP) نام دارد و ترکیبات مونوترپنی، دی‌ترپنی و تتراترپنی (مانند کاروتنوئیدها) را تولید می‌کند. مسیر دوم موالونیک اسید (MVA) نام دارد که در نهایت سزکوئی‌ترپن‌ها و تری‌ترپن‌ها را تولید می‌کند (Sathee *et al.*, 2023). ترکیبات مونوترپنی (مانند آلفا-پینن، کامفن و کامفور) از اجزای اصلی اسانس هستند و در صنایع دارویی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

کاربرد دارند. آلفا-پینن دارای خواص ضدالتهابی، کاهش قند خون و کاهش چربی خون است. خواص ضدالتهابی آن احتمالاً برای درمان دیابت و عوارض آن کاربرد دارد (Soares Santos *et al.*, 2023). همچنین جهت درمان عفونت‌های دستگاه تنفس و در صنایع غذایی به عنوان طعم‌دهنده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Allenspach and Steuer, 2021). خواص بیولوژیکی کامفن از جمله فعالیت‌های ضدباکتریایی، ضدقارچی، ضدسرطانی، آنتی‌اکسیدانی، ضدانگلی، ضددیابتی، ضدالتهابی و کاهش چربی خون به اثبات رسیده است. علاوه بر این، کامفن فعالیت‌های محافظت از کبد، ضدویروسی و ضداستیل کولین استراز را نشان می‌دهد (Hachlafi *et al.*, 2023). ۸،۱-سینئول دارای خواص دارویی از جمله ضدالتهابی و آنتی‌اکسیدانی بوده و برای درمان بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی استفاده می‌شود (Cai *et al.*, 2020). اثرات ضدالتهابی، آنتی‌اکسیدانی، ضددرد، محافظت‌کننده عصبی و ضدصرع بورنئول از طریق تعدادی از مطالعات پیش‌بالینی مشخص شده است (Rajput *et al.*, 2023). بورنیل استات نیز دارای خواص سفیدکنندگی و آنتی‌اکسیدانی بوده و در مواد مراقبت از پوست قابل استفاده است (Kim *et al.*, 2013). با توجه به اهمیت متابولیت‌های ثانویه و نقش آن‌ها در سلامتی انسان، کاربرد فنونی جهت افزایش این ترکیبات در گیاهان و در نهایت استخراج و استفاده از آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که علاوه بر تغییر در رشدونمو مورفولوژیکی و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه، سبب تغییر در خواص بیوشیمیایی آن نیز می‌گردد (Oguz *et al.*, 2022). مطالعات متعددی نشان داده است تنش آبی سبب تغییر مقدار متابولیت‌های ثانویه در طیف گسترده‌ای از گیاهان می‌شود (Yang *et al.*, 2018). کم آبیاری کنترل شده ممکن است منجر به تغییر در میزان قندها، اسیدهای آلی و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شود (Bogale *et al.*, 2016). به عنوان مثال ایجاد تنش خشکی برای مریم‌گلی (*Salvia dolomitica*) سبب افزایش میزان سزکوئی‌ترپن‌های موجود در اسانس شد (Caser *et al.*, 2019). سطح مناسبی از تنش خشکی سبب تحریک بیان ژن و فعالیت آنزیم‌های کلیدی درگیر در بیوسنتز فلاونوئیدها، مانند فنیل آلانین آمونیالیاز (PAL)، سینامات-۴-هیدروکسیلاز (C4H) و چالکون سنتاز (CHS) در گیاه بایکال (*Scutellaria baicalensis*) شد و تجمع متابولیت‌ها را افزایش داد (Cheng *et al.*, 2018). بنابراین، خشکی کنترل‌شده علاوه بر صرفه‌جویی مصرف آب در طول دوره کشت، می‌تواند برای بهبود تولید متابولیت‌های ثانویه اعمال شود.

محلول‌پاشی با مواد مختلف (مانند اسیدهای آمینه) نیز در طول دوره رشد گیاه سبب شده تا گیاه از طریق حسگرها و گیرنده‌های خود این سیگنال‌ها را دریافت و پاسخ خود که تولید متابولیت‌های ثانویه است را فعال کند (Thakur *et al.*, 2018). اسیدهای آمینه مولکول‌های آلی هستند که علاوه بر داشتن نیتروژن، کربن، هیدروژن و اکسیژن در ساختار خود، دارای زنجیره جانبی آلی بوده که به عنوان یک شاخص، بین اسیدهای آمینه مختلف تمایز ایجاد می‌کند (Buchanan *et al.*, 2000). این مولکول‌ها می‌توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر فعالیت فیزیولوژیکی مرتبط با رشدونمو گیاهان تأثیر بگذارند (Wu, 2009). اسیدآمینه فنیل آلانین نه تنها از اجزای ضروری برای سنتز پروتئین بوده بلکه به عنوان پیش‌ماده بیوسنتزی، تولید طیف گسترده‌ای از متابولیت‌های ثانویه در گیاهان را تقویت می‌کند (Tzin and Galili, 2010). فنیل آلانین در تولید ترکیبات معطر، آنتی‌اکسیدان‌ها، ترکیبات فنولی و ترکیبات اصلی دیواره سلولی گیاه نقش دارد. اثر فنیل آلانین بر رشدونمو گیاهان از طریق تأثیر بر هورمون جیبرلین صورت می‌گیرد (Edahiro *et al.*, 2005). اثر محلول‌پاشی ۰/۰۵ میلی‌مولار فنیل آلانین بر ریحان شیرین (*Ocimum basilicum* L.) موجب شد فعالیت آنزیم PAL، ۲۵۰ درصد و محتوی فنول و فلاونوئید کل به ترتیب ۳۹ و ۴۰ درصد افزایش یابند (Koca and Karaman, 2015). محلول‌پاشی گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) با ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر فنیل آلانین میزان کامفور و ۸،۱-سینئول موجود در اسانس را به ترتیب ۴/۵ درصد و ۷ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد (Rahmani-Samani *et al.*, 2019).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

برخی گزارش‌های مربوط به اثرات نامطلوب احتمالی مرتبط با مصرف آنتی‌اکسیدان‌های مصنوعی موجب توجه به استفاده از آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی در محصولات غذایی شده است (Lourenco *et al.*, 2019) که می‌توانند انسان را در برابر رادیکال‌های آزاد محافظت کنند (Akbari *et al.*, 2022). در این ارتباط، کاربرد تکنیک‌های زراعی برای افزایش متابولیت‌های ثانویه گیاهان دارویی ضروری به نظر می‌رسد.

از این‌رو، این تحقیق با هدف بررسی اثرات القای شرایط تنش خشکی و محلول‌پاشی ال-فنیل آلانین بر تقویت سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی گیاه رزماری انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر ال-فنیل آلانین بر صفات مورفو فیزیولوژیک، ترکیبات فیتوشیمیایی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه رزماری تحت تنش خشکی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به صورت گلدانی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد با عرض جغرافیایی °۳۲ و ′۲۱ شمالی و طول جغرافیایی °۵۰ و ′۴۹ شرقی و ارتفاع ۲۰۵۰ متر از سطح دریا در سال ۱۴۰۰ انجام گرفت.

قلمه‌های ریشه‌دار شده رزماری ۱۵ اردیبهشت از شرکت آیسان‌کشت شیراز تهیه و براساس یکنواختی ظاهری برای کشت انتخاب شدند. خاک مورد نیاز از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر مزرعه جمع‌آوری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱).

گلدان‌هایی با قطر ۱۹/۵ و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر انتخاب و به هر گلدان ۶ کیلوگرم خاک اضافه شد. برای تعیین ظرفیت زراعی (FC)، تعداد سه گلدان دارای خاک خشک توزین و سپس در ظرف آب غوطه‌ور شدند. پس از ۲۴ ساعت با خروج آب از زهکش، مجدداً توزین شدند. میانگین اختلاف وزن خاک خشک و خاک زهکشی شده، ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد بود (Khalil *et al.*, 2022). ۵۰ درصد ظرفیت زراعی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه که در تعیین حجم آبیاری از آن استفاده شد (Wang and Gong, 2021).

$$FC\ 50\% = FC\ 100\% \times 1/2 \quad (۱)$$

طبق نتایج آزمایش خاک (جدول ۱) و نیاز کودی رزماری (Mwithiga *et al.*, 2022)، به منظور جبران کمبود عناصر موجود در خاک و اصلاح آن به سطح مطلوب، همچنین تأمین نیازهای تغذیه‌ای رزماری جهت رشد بهینه، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۱ گرم به ترتیب اوره (جهت تأمین نیتروژن) و مونوفسفات پتاسیم (جهت تأمین فسفر و پتاسیم) به ازای هر کیلوگرم خاک اضافه گردید. گلدان‌ها در فضای باز قرار گرفتند و در هر گلدان یک نشاء با ارتفاع ۱۲-۱۵ سانتی‌متر در تاریخ ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۰ کاشته شد.

پس از کامل‌شدن پوشش برگی (Fageria *et al.*, 2009)، تیمار آبیاری (آبیاری کامل و ۵۰٪ آبیاری کامل) و محلول‌پاشی با ال-فنیل آلانین (محصول مرک آلمان) در غلظت‌های ۸۰، ۱۶۰ و۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر همراه با شاهد (محلول‌پاشی با آب‌مقطر) اعمال شدند (Reham *et al.*, 2016; El-Din and El-Wahed, 2005). حجم آبیاری برای بوته‌های تحت تنش ۷۴۰ میلی‌لیتر و برای بوته‌هایی با آبیاری کامل ۱۴۸۰ میلی‌لیتر برای هر گلدان بود. محلول‌پاشی در سه مرحله و دو هفته یکبار هنگام غروب انجام شد (Cheng *et al.*, 2020) و در هر مرحله برای هر بوته به میزان ۳ میلی‌لیتر بود. پس از پایان محلول‌پاشی، گیاه در تاریخ ۲ آبان ۱۴۰۰ برداشت شد و صفات زیر مورد ارزیابی قرار گرفتند.

وزن خشک اندام هوایی: اندام هوایی گیاه پس از برداشت به مدت پنج روز در دمای اتاق خشک شده و نمونه‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۱ میلی‌گرم وزن شدند.

رنگدانه‌های فتوسنتزی: ۰/۲۵ گرم از هر گیاه در مرحله پوشش کامل برگی در ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد هموژن شده و پس از انجام سانتریفیوژ با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه، مایع رویی جدا و حجم آن با استون ۸۰ درصد به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب نور در طول‌موج‌های ۴۷۰، ۶۴۶/۸ و ۶۶۳/۲ نانومتر مشخص و با استفاده از روابط زیر رنگدانه‌های فتوسنتزی محاسبه شدند (Lichtenthaler, 1987).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه

شاخص	واحد	مقدار	شاخص	واحد	مقدار
بور قابل دسترس	(میلی‌گرم در کیلوگرم)	۱/۲۲	نیتروژن کل	(٪)	۰/۰۱
آهن قابل دسترس	(میلی‌گرم در کیلوگرم)	۲/۱۹	کربن آلی	(٪)	۰/۱۸
منگنز قابل دسترس	(میلی‌گرم در کیلوگرم)	۷/۴۰	آهک خاک	(٪)	۲۳
روی قابل دسترس	(میلی‌گرم در کیلوگرم)	۰/۵۰	پی اچ		۸/۲۱
فسفر قابل دسترس	(میلی‌گرم در کیلوگرم)	۷/۶۰	هدایت الکتریکی	(دسی‌زیمنس بر متر)	۰/۵۸
پتاسیم قابل دسترس	(میلی‌گرم در کیلوگرم)	۲۹۳	بافت خاک		لومی رسی

$$Chl\ a = 12.21\ (A663.2) - 2.81\ (A646.8) \quad (۲)$$

$$Chl\ b = 20.13\ (A646.8) - 5.03\ (A663.2) \quad (۳)$$

$$C\ x+c = [(1000\ (A470) - 3.27\ (Chl\ a) - 104\ (Chl\ b)]/229 \quad (۴)$$

A: طول‌موج جذب اسپکتروفتومتر، Chl *a*: کلروفیل *a*، Chl *b*: کلروفیل *b*، C *x+c*: کاروتنوئیدها

درصد و عملکرد اسانس: اندام هوایی گیاه با آسیاب خرد و ۲۲ گرم از آن در بالن ریخته شد. ۲۰۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر به آن اضافه و به مدت سه ساعت با دستگاه کلونجر به روش تقطیر با آب اقدام به استخراج اسانس گردید. اسانس با سولفات سدیم بدون آب آبگیری شد و جهت نگهداری در تاریکی و دمای ۴ درجه سلسیوس قرار داده شد. با اندازه‌گیری میزان اسانس در ۱۰۰ گرم ماده خشک، درصد اسانس محاسبه شد. سپس عملکرد اسانس از حاصل ضرب درصد اسانس در بیوماس گیاه در گلدان بدست آمد (Khalil *et al.*, 2022).

تهیه عصاره متانولی: ۱۰ گرم پودر گیاه با ۱۰۰ میلی‌لیتر متانول ۷۰ درصد به مدت ۴۸ ساعت در تاریکی خیسانده شد. تفاله هر نمونه با صاف‌کردن جدا و حلال حاوی عصاره در دمای اتاق قرار داده شد تا حلال تبخیر شود. عصاره خشک خراشیده و در ظروف دربسته در دمای ۴ درجه سلسیوس جهت اندازه‌گیری پارامترها نگهداری شد (Gasmi *et al.*, 2019).

آزمون DPPH جهت بررسی قدرت آنتی‌اکسیدانی عصاره: ۵۰۰ میکرولیتر عصاره متانولی با ۵۰۰ میکرولیتر محلول DPPH (۰/۱ میلی‌مولار) مخلوط شده و بعد از ۳۰ دقیقه در تاریکی، نمونه‌ها در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شدند. جهت تهیه کنترل، از ۵۰۰ میکرولیتر آب‌مقطر و ۵۰۰ میکرولیتر محلول DPPH استفاده شد. برای نمونه بلانک از ۵۰۰ میکرولیتر متانول مطلق و ۵۰۰ میکرولیتر محلول DPPH استفاده شد. درصد مهار رادیکال DPPH از رابطه شماره ۵ محاسبه شد (Yamasaky *et al.*, 1994).

$$DPPH = (Ac - As) / Ac \times 100 \quad (۵)$$

Ac: عدد جذب کنترل، *As*: عدد جذب نمونه

غلظت‌های ۲۰ تا ۱۰۰ میکرومولار ترولوکس تهیه شد و با رسم نمودار استاندارد، معادله خط $y=0.84x + 2.6$ بدست آمد. درصد مهار جایگزین *y* شد و میزان *x* معادل میکرومولار ترولوکس بدست آمد که بیانگر توانایی عصاره در مهار رادیکال DPPH بر حسب میکرومولار ترولوکس بود.

محتوی فنول کل عصاره: ۱۰ میکرولیتر عصاره با ۲/۵ میلی‌لیتر فولین سیوکالتیو ۱۰ درصد مخلوط و پس از ۳ الی ۸ دقیقه به آن ۲/۵ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد اضافه شد. ترکیب حاصله ۳۰ دقیقه در تاریکی نگهداری و سپس جذب در طول‌موج ۷۵۰ نانومتر خوانده شد. برای رسم منحنی کالیبراسیون از غلظت‌های متفاوت اسید گالیک (۲۰ تا ۱۶۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر) استفاده شد و معادله خط $y=0.0025x + 0.1709$ بدست آمد (شکل ۳-۲). عدد خوانده‌شده در *y* جایگذاری و *x* که معادل غلظت اسید گالیک (C) بود بدست آمد. محتوی فنول کل بر حسب mg GAE/g از رابطه ۶ محاسبه شد (Marinova *et al.*, 2005).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

$$T = C \times V/M \quad (۶)$$

C: غلظت اسید گالیک بر حسب µg/ml (C معادل x در معادله خط).

V: حجم عصاره (ml)، M: وزن عصاره (g)، T: فنول کل (mg GAE/g)

محتوی فلاونوئید کل عصاره: ۱ میلی‌لیتر عصاره با ۴ میلی‌لیتر آب‌مقطر مخلوط شد. ۳۰۰ میکرولیتر نیتریت سدیم ۵ درصد به آن اضافه گردید. بعد از پنج دقیقه ۳۰۰ میکرولیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد به مخلوط افزوده شد. شش دقیقه بعد ۲ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۱ مولار اضافه و با آب‌مقطر به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس در طول‌موج ۵۱۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. جهت رسم منحنی استاندارد از غلظت‌های مختلف کوئرستین (۰/۱ تا ۰/۰۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) استفاده شد و معادله خط $y=1.4372x + 0.0107$ بدست آمد. عدد خوانده شده در y جایگذاری شد و x که معادل غلظت فلاونوئید معادل کوئرستین بود بدست آمد. محتوی فلاونوئید کل با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد (Marinova *et al.*, 2005).

$$C = X \times V/N \quad (۷)$$

X: غلظت استاندارد به دست آمده از معادله خط، V: حجم عصاره (ml)، C: فلاونوئید کل (mg QE/g).

فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز (PAL): ۰/۱ گرم از بافت تازه گیاه با استفاده از ۱ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با pH= ۷ کوبیده و به مدت ۱۵ دقیقه در ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. پس از اتمام سانتریفیوژ، از عصاره رویی جهت سنجش آنزیم استفاده شد. مخلوط واکنش حاوی ۲۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، ۲۵۰ میکرولیتر بافر بورات سدیم ۱۰ میلی‌مولار (pH=۸/۸)، ۲۵۰ میکرولیتر آب‌مقطر و ۲۵۰ میکرولیتر سوبسترای فنیل آلانین (۵۰ میلی‌مولار) بود. تولید سینامات با جذب در ۲۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد، فعالیت PAL را تعیین کرد. جهت رسم نمودار استاندارد از غلظت‌های ۰/۱ تا ۱/۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر اسید سینامیک استفاده شد. جذب در ۲۷۰ نانومتر انجام گرفت و معادله خط $y=8.9372x + 0.0357$ بدست آمد (Saunders and Mcclure, 1974).

ترکیبات اسانس: اسانس‌ها با استفاده از کروماتوگرافی گازی Agilent مدل A7890 مجهز به ستون سیلیس ذوب شده DB-5 (۳۰m × ۰/۲۵mm i.d و ضخامت فیلم ۰/۲۵ میکرومتر) آنالیز شدند. ابتدا ۰/۱ میکرولیتر نمونه به ورودی دستگاه تزریق شد. دمای ورودی دستگاه به مدت سه دقیقه روی ۵۰ درجه سلسیوس تنظیم شد و سپس با سرعت ۸ درجه سلسیوس بر دقیقه به ۲۰۰ درجه سلسیوس رسید و سپس با سرعت ۴۰ درجه سلسیوس بر دقیقه به ۲۹۰ درجه سلسیوس افزایش یافت و به مدت سه دقیقه در این دما نگهداری شد. گاز حامل هلیوم با سرعت ۱/۲ میلی‌لیتر در دقیقه استفاده شد. ترکیبات اسانس با استفاده از کروماتوگرافی گازی – طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) تعیین شدند. تجزیه و تحلیل GC-MS روی یک سیستم GC-MS 7890 A/5975C مجهز به یک ستون سیلیس ذوب شده DB-5 (۳۰m × ۰/۲۵mm i.d و ضخامت فیلم ۰/۲۵ میکرومتر) انجام شد. ۰/۱ میکرولیتر نمونه به ورودی دستگاه تزریق شد. ابتدا دمای ورودی دستگاه به مدت سه دقیقه روی ۵۰ درجه سلسیوس تنظیم شد و سپس با سرعت ۸ درجه سلسیوس بر دقیقه به ۲۰۰ درجه سلسیوس رسید و سپس با سرعت ۴۰ درجه سلسیوس بر دقیقه به ۲۹۰ درجه سلسیوس افزایش یافت. دمای ورودی دستگاه طیف‌سنج جرمی ۲۸۰ درجه سلسیوس بوده و برای یونیزاسیون از منبع الکتریکی با توان ۷۰ الکترون ولت استفاده شد. ولتاژ آشکارساز دستگاه ۱/۶۶۵ کیلو ولت بود و دستگاه توانایی تشخیص اجسام ۳۰ تا ۴۵۰ واحد جرم اتمی را داشت. سرعت اسکن دستگاه ۲/۸۶ اسکن در ثانیه بود. ترکیبات از طریق مقایسه طیف‌های جرمی و شاخص‌های بازداری آن‌ها با استانداردهای مرجع و داده‌های منتشر شده شناسایی شدند. درصد ترکیب به طور مستقیم از مساحت پیک‌های کروماتوگرام و بدون اعمال ضریب‌های تصحیح محاسبه شد.

جهت آنالیز داده‌ها از تجزیه و تحلیل واریانس دو طرفه بر اساس GLM در برنامه آماری SAS (v.9.2) استفاده شد. برای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

مقایسه میانگین تیمارها از آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ استفاده شد.

نتایج و بحث

رنگدانه‌های فتوسنتزی: کلروفیل‌های *a* و *b* و کاروتنوئیدها در برگ رزماری تحت تأثیر خشکی در سطح احتمال ۱ درصد و کلروفیل *a* و کاروتنوئیدها تحت تأثیر محلول‌پاشی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شدند، اما اثر متقابل خشکی × محلول‌پاشی معنی‌دار نشد (جدول ۲). خشکی سبب شد کلروفیل‌های *a* و *b* به ترتیب ۵/۱۸ میکروگرم بر میلی‌لیتر (۳۶/۱ درصد) و ۴/۴۸ میکروگرم بر میلی‌لیتر (۴۶/۲ درصد) نسبت به شرایط آبیاری کامل کاهش یابند (شکل ۱a و ۱e). اما کاروتنوئیدها ۲/۷ میکروگرم بر میلی‌لیتر (۱۱۵/۴ درصد) تحت تنش خشکی افزایش یافتند (شکل ۱c). به نظر می‌رسد تحت شرایط تنش القاشده میزان ROS و آنزیم کلروفیلاز افزایش یافته و سبب آسیب به کلروفیل‌ها شده (Sobhkhizi *et al.*, 2014) و برای مقابله با ROSها در جهت جذب انرژی اضافی و تنظیم اسمزی برای پایداری غشاء سلولی میزان ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند کاروتنوئیدها افزایش یافتند (Correia *et al.*, 2014; Molla *et al.*, 2023). محلول‌پاشی با ال-فنیل آلانین در غلظت‌های ۸۰ تا ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر سبب شد کلروفیل *a* ۲/۹ تا ۳/۹ میکروگرم بر میلی‌لیتر (۳۱ تا ۴۱/۴ درصد) بیشتر از شاهد افزایش یابد (شکل ۱b). اما کاروتنوئیدها تحت تأثیر محلول‌پاشی کاهش یافتند. این کاهش برای غلظت‌های ۸۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر بین ۰/۸ تا ۱ میکروگرم بر میلی‌لیتر (۲۰/۳ تا ۲۳/۶ درصد) و در مقایسه با شاهد معنی‌دار بود (شکل ۱d). کاهش کاروتنوئیدها در تیمار گیاه با ال-فنیل آلانین می‌تواند به دلیل اختصاص بیشتر کربن به تولید سایر ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند فنول کل (شکل ۲d) و فلاونوئیدها (شکل ۲f) و بهبود کلروفیل (شکل ۱b) باشد.

گیاهان تحت تنش، عمل تعرق را با بستن روزنه‌ها جهت حفظ آب برگ کاهش می‌دهند. این عمل می‌تواند به حمل و نقل غیرفعال در آوندهای ساقه آسیب برساند. علاوه بر این کمبود آب منجر به اختلال در واکنش‌های نوری فتوسنتز و تولید ROS می‌شود (Abrishamchi *et al.*, 2012) بدین صورت که با کاهش تثبیت CO_2 به دلیل بسته شدن روزنه‌ها، سطح انرژی نوری افزایش می‌یابد و با کاهش میزان $NADP^+$ (به عنوان پذیرنده الکترون)، انتقال الکترون‌ها از PSI به اکسیژن مولکولی ($O_2^{\bullet-}$) تسریع شده و H_2O_2 تولید می‌شود. لذا سطح ROS افزایش یافته و سبب تخریب ساختمان کلروفیل‌ها می‌شود (Mittler *et al.*, 2022). کاروتنوئیدها نقش مهمی در مقاومت به خشکی در گیاهان دارند و به عنوان یک آنتی‌اکسیدان، در محافظت از فرآیندهای فتوشیمیایی تحت شرایط تنش عمل می‌کنند (Maslova *et al.*, 2021). نقش محافظتی اصلی بتاکاروتن در بافت فتوسنتزی ممکن است از طریق خاموش‌کردن مستقیم کلروفیل سه گانه باشد که از تولید اکسیژن منفرد جلوگیری و از آسیب اکسیداتیو محافظت می‌کند (Farooq *et al.*, 2009). کاروتنوئیدها انرژی نور را دریافت و از طریق انتقال تحریک تک-تک به کلروفیل‌ها منتقل می‌کنند. این انتقال یک وضعیت انرژی پایین‌تری است که در طول فتوسنتز استفاده می‌شود. آن‌ها در وضعیت انرژی بالاتر، انرژی بیش از حد از کلروفیل‌ها را از طریق انتقال سه تایی-سه تایی جذب و به صورت ارتعاش پلی‌ین آزاد می‌کنند (Maoka, 2020). کاروتنوئیدها به عنوان محافظ نور، آنتی‌اکسیدان، جذب‌کننده رنگ (Lohr, 2009) و پیش‌ساز هورمون‌های گیاهی عمل می‌کنند (Nisar *et al.*, 2014). تأثیر ال-فنیل آلانین بر کلروفیل *a* را می‌توان با نقش آن در افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه که شامل فنول‌ها، فلاونوئیدها، تانن‌ها و آنتوسیانین‌ها هستند، توضیح داد که همه آن‌ها و ترکیبات مختلف آن‌ها دارای اثر آنتی‌اکسیدانی بوده و از سیستم رنگدانه گیاه به ویژه رنگدانه‌های کلروفیل در برابر اکسیداسیون یا تجزیه محافظت می‌کنند (Naikoo *et al.*, 2019). علاوه بر این، فنیل آلانین با فراهمی نیتروژن و کربن برای گیاه در بهبود فتوسنتز و تولید کلروفیل نقش دارد (Wen *et al.*, 2022). در نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.)، تنش خشکی متوسط (تخلیه ۳۰ درصد آب موجود در خاک) غلظت کلروفیل کل را

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) محلول‌پاشی ال-فنیل آلانین بر برخی رنگدانه‌های برگ رزماری تحت القای تنش خشکی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		کلروفیل *a*	کلروفیل *b*	کاروتنوئیدها
خشکی	۱	۱۶۱/۱**	۱۲۰**	۴۳/۶**
ال-فنیل آلانین	۳	۱۷/۴*	۲/۹ns	۱/۲*
ال-فنیل آلانین × خشکی	۳	۰/۰۵ ns	۱/۶ns	۰/۳۹ns
خطا	۱۶	۳/۳	۱	۰/۳۲
ضریب تغییرات (٪)		۱۵/۵	۱۳/۷	۱۵/۳

*و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns عدم معنی‌داری.

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) محلول‌پاشی ال-فنیل آلانین بر وزن خشک اندام هوایی، فعالیت آنزیم PAL، محتوی فنول و فلاونوئید کل در رزماری تحت القای تنش خشکی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		وزن خشک اندام هوایی	فعالیت آنزیم PAL	فنول کل	فلاونوئید کل
خشکی	۱	۱۷۹/۶**	۱۰/۳**	۵۷**	۲۶۰/۶**
ال-فنیل آلانین	۳	۳۹/۹**	۱/۷**	۶۳/۴**	۱۳۶/۱**
ال-فنیل آلانین × خشکی	۳	۰/۱ns	۰/۰۱ ns	۰/۲۵ns	۶/۷ns
خطا	۱۶	۲/۶	۰/۰۴	۴/۵	۶/۰۶
ضریب تغییرات (٪)		۴/۶	۵/۳	۳/۹	۱۱/۳

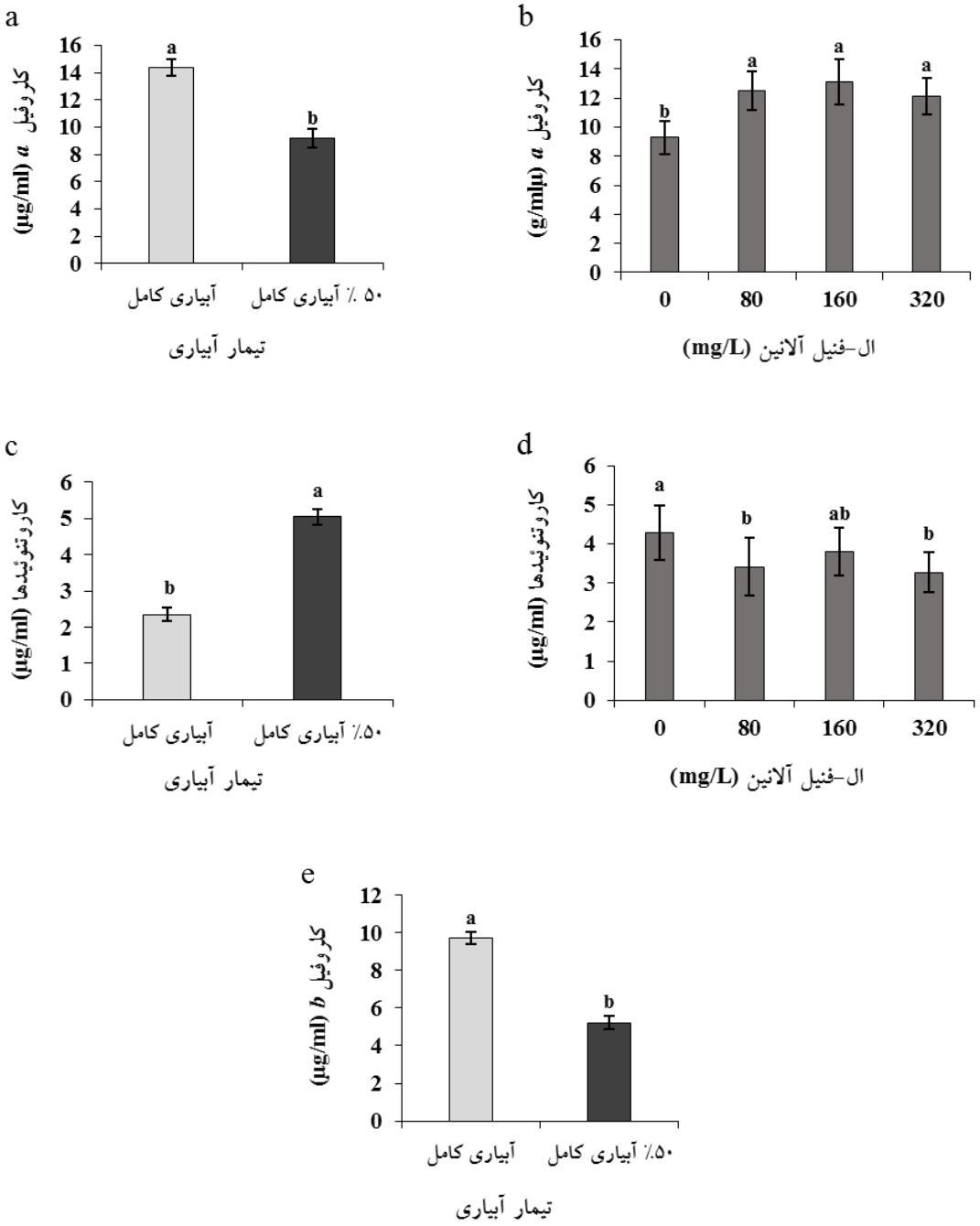
** معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد، ns عدم معنی‌داری

۹/۹ درصد و تنش خشکی شدید (تخلیه ۴۵ درصد آب موجود در خاک) ۳۱/۴ درصد کاهش داد (Jahani *et al.*, 2021). در ریحان بنفش (*Ocimum basilicum* L.)، تحت تنش خشکی ۳۰ و ۶۰ درصد آبیاری کامل، کلروفیل *a* به ترتیب ۱۶ و ۲۳ درصد و کلروفیل *b* به ترتیب ۳/۵ و ۱۵/۵ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش پیدا کردند (Kordi *et al.*, 2013). کلروفیل *b* در آویشن (*Thymus vulgaris* L.) تحت تنش خشکی در مرحله گلدهی ۱۰۴ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت (Mohammadi *et al.*, 2019). در ارقام ریحان محتوی کلروفیل *b* تحت آبیاری کامل از ۱/۱۸ میلی‌گرم بر گرم در Cinnamon تا ۱/۲۷ میلی‌گرم بر گرم در Palla Compato بود. تحت تنش خشکی کلروفیل *b* کاهش یافت و این کاهش برای Cinnamon ۴۵ درصد و برای Palla Compato ۳۸ درصد بود (Burbulis *et al.*, 2023).

وزن خشک اندام هوایی: وزن خشک اندام هوایی رزماری تحت تنش خشکی و محلول‌پاشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد، اما اثر متقابل این دو فاکتور معنی‌دار نشد (جدول ۳). وزن خشک اندام هوایی در شرایط آبیاری کامل ۳۷/۹ گرم در بوته بود که با اعمال تنش خشکی ۵/۵ گرم (۱۴/۴ درصد) کاهش یافت (شکل ۲a). با محلول‌پاشی با ال-فنیل آلانین در هر سه غلظت ۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر، به طور میانگین ۵ گرم (۱۶ درصد) به وزن خشک اندام هوایی اضافه گردید (شکل ۲b). کاربرد این ماده سبب افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی (شکل ۱b و ۱d) شد که در افزایش سرعت فتوسنتز،

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

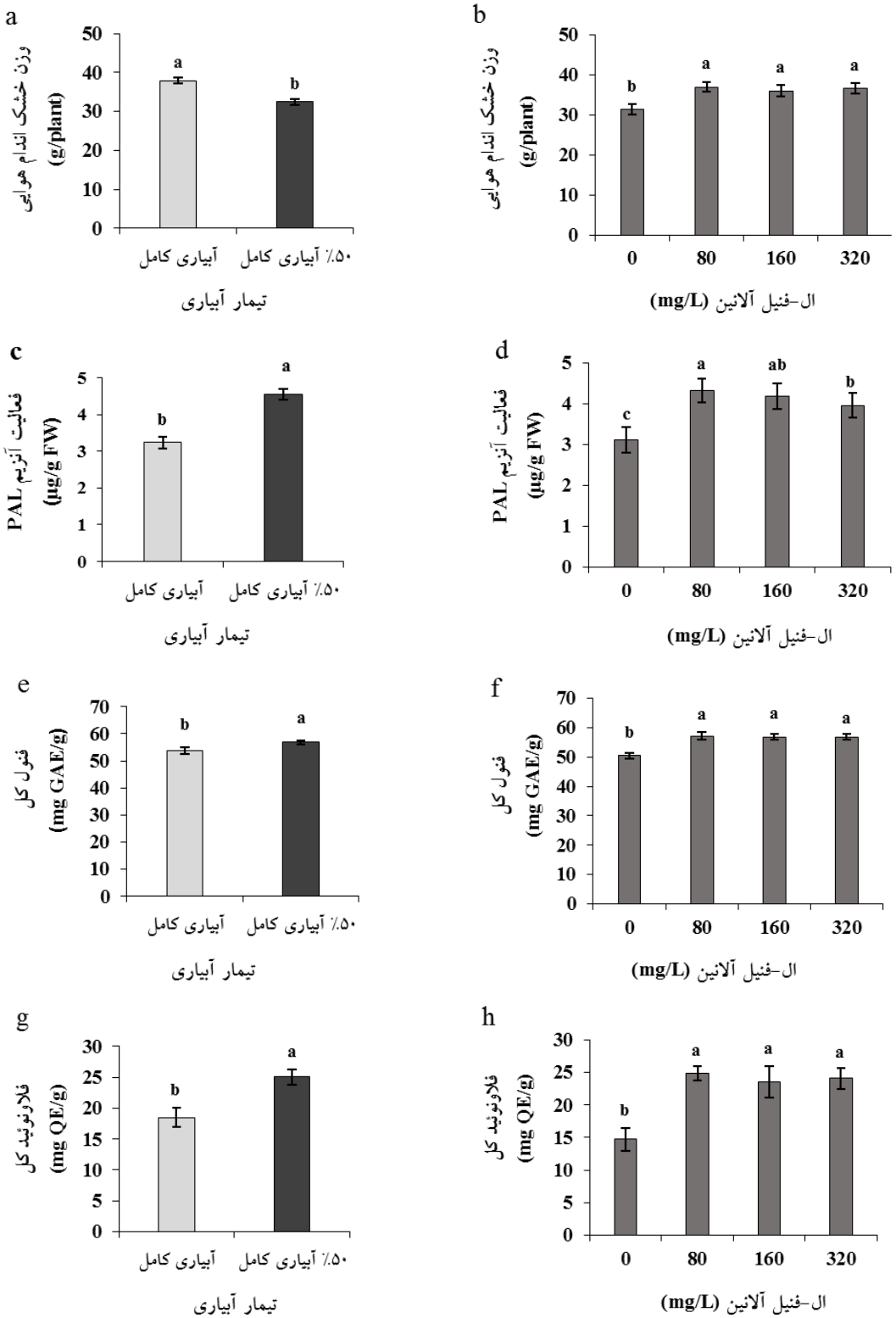


شکل ۱- تأثیر تیمار آبیاری (آبیاری کامل و ۵۰٪ آبیاری کامل) و محلول‌پاشی غلظت‌های ال-فنیل آلانین (صفر، ۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بر کلروفیل *a* (a و b)، کاروتنوئیدها (c و d) و کلروفیل *b* (e). مقادیر با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD و خطوط روی هر ستون معرف استاندارد ارور هستند.

تثبیت بیشتر CO_2 و در نهایت افزایش وزن خشک نقش دارند.

کاهش ارتفاع گیاه به کاهش انبساط و طویل‌شدن سلول نسبت داده می‌شود (Manivannan *et al.*, 2007). تنش خشکی سبب کاهش رشد و تقسیم سلولی می‌شود که در طولانی مدت با کاهش اندازه سلول‌های بالغ، بر اندازه برگ تأثیر می‌گذارد. سرعت فتوسنتز خالص نیز به دلیل کاهش رشد و سطح برگ تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد (Alves and Setter, 2004). در این شرایط استراتژی گیاه اختصاص بیشتر مواد به رشد ریشه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]



شکل ۲- تأثیر تیمار آبیاری (آبیاری کامل و ۵۰٪ آبیاری کامل) و محلول‌پاشی غلظت‌های ال-فنیل آلانین (صفر، ۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بر وزن خشک اندام هوایی (a و b) فعالیت آنزیم PAL (c و d)، فنول کل (e و f) و فلاونوئید کل (g و h) در رزماری. مقادیر با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD و خطوط روی هر ستون معرف استاندارد ارور هستند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

جهت کمک به جذب آب است (Leport *et al.*, 2006). در نهایت با کاهش ارتفاع گیاه، اندازه برگ، سطح برگ و انتقال بیشتر کربن جهت تقویت ریشه، وزن اندام هوایی گیاه کاهش می‌یابد. اسیدهای آمینه به عنوان پیش‌سازهای طیف گسترده‌ای از محصولات طبیعی گیاهی نقش مهمی در رشد، نمو و تولید کلروفیل به دلیل فراهمی نیتروژن و کربن برای گیاه دارند (Maeda and Dudareva, 2012). بیشترین ماده خشک مریم‌گلی (۲/۷ تن در هکتار) در شرایط آبیاری بعد از تخلیه ۴۰ درصد آب در دسترس و کم‌ترین میزان ماده خشک (۰/۹ تن در هکتار) در شرایط آبیاری بعد از تخلیه ۸۰ درصد آب در دسترس گیاه بدست آمد (Govahi *et al.*, 2015). این کاهش می‌تواند نتیجه تخصیص ترجیحی تولید زیست‌توده به ریشه‌ها (Albouchi *et al.*, 2003) یا کاهش محتوی کلروفیل و در نتیجه، کارایی فتوسنتز باشد (Sobhkhizi *et al.*, 2014). محلول‌پاشی زوفا (*Hyssopus officinalis*) با فنیل آلانین در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب سبب شد وزن خشک گیاه در سال اول از ۰/۵۵ به ۰/۷۱ کیلوگرم بر متر مربع و در سال دوم از ۰/۸۹ به ۱/۰۵ کیلوگرم بر متر مربع برسد (Aghaei *et al.*, 2019). محلول‌پاشی فنیل آلانین بر بوته‌های ریحان در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در چین اول به ترتیب سبب افزایش ۲۴/۳ و ۲۵/۷ درصد و در چین دوم سبب افزایش ۲۷/۴ و ۳۰ درصد وزن خشک شد (Reham *et al.*, 2016).

فعالیت آنزیم PAL: نتایج تجزیه واریانس نشان داد فعالیت آنزیم PAL تحت اثر اصلی خشکی و محلول‌پاشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد اما اثر متقابل خشکی × محلول‌پاشی معنی‌دار نشد (جدول ۳). فعالیت این آنزیم تحت تنش خشکی ۴۰/۶ درصد افزایش یافت (شکل ۲c) همچنین فعالیت PAL تحت تأثیر محلول‌پاشی رزماری با ال–فنیل آلانین قرار گرفت. بیشترین فعالیت با محلول‌پاشی ۸۰ و ۱۶۰ میلی‌گرم در لیتر ال–فنیل آلانین بدست آمد که به ترتیب ۳۸ و ۳۳/۹ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت. با افزایش غلظت تأثیر این ماده بر فعالیت آنزیم کمتر شد (شکل ۲d).

گیاهان چندین مکانیسم مقاومت به خشکی را در خود تکامل داده‌اند که یکی از آن‌ها افزایش فعالیت آنزیم PAL است. این آنزیم تشکیل ترانس اسید سینامیک از فنیل آلانین را با از دست دادن همزمان آمونیاک کاتالیز می‌کند (Paul *et al.*, 2023) و منجر به تولید طیف گسترده‌ای از متابولیت‌های ثانویه بر اساس اسکلت فنیل پروپانوئیدی می‌شود (Feduraev *et al.*, 2020). PAL آنزیم اصلی درگیر در اتصال مسیر اسیدهای آمینه آروماتیک و متابولیت‌های ثانویه است (Paul *et al.*, 2023). آنزیم PAL با تغییر مسیرهای متابولیکی اولیه به ثانویه، سبب تولید و تجمع فنول و فلاونوئید در بافت‌ها می‌شود. این تجمع ارزش غذایی محصولات گیاهی را افزایش می‌دهد. بنابراین، PAL نقش مهمی در بهبود کیفیت محصولات ایفا می‌کند (Gohari *et al.*, 2021). همچنین با فراهمی فنیل آلانین برای گیاه، این ماده به عنوان سوبسترای PAL، سبب تحریک فعالیت این آنزیم می‌شود (شکل ۲d). در مرحله گلدهی فلفل، تحت تنش خشکی تدریجی، فعالیت آنزیم PAL افزایش یافت (Phimchan *et al.*, 2014). فعالیت PAL در انگورهای واریته حسینی تیمارشده با فنیل آلانین در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار پیش از رنگ‌گیری حبه‌ها در مقایسه با خوشه‌های تیمارنشده به طور قابل ملاحضه‌ای افزایش یافت (Gohari *et al.*, 2021).

فنول کل: فنول کل عصاره رزماری تحت تأثیر خشکی و محلول‌پاشی قرار گرفت اما اثر متقابل این دو فاکتور معنی‌دار نشد (جدول ۳). تحت تنش خشکی فنول کل از ۰/۱۰۷ به ۰/۱۱۳ میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم افزایش یافت (افزایش ۵/۷ درصدی نسبت به شاهد) (شکل ۲e). محلول‌پاشی با ال–فنیل آلانین در غلظت‌های ۸۰ تا ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر سبب شد ترکیبات فنولی عصاره ۰/۰۱۲ میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم در مقایسه با شاهد افزایش یابند (افزایش ۱۲/۴ تا ۱۳/۴ درصدی نسبت به شاهد) (شکل ۲f). با افزایش فعالیت آنزیم PAL تحت تنش خشکی (شکل ۲c)، میزان متابولیت‌ها به عنوان فرآورده نهایی بیشتر از شرایط آبیاری کامل گردید. احتمالاً با قرارگرفتن ال–فنیل آلانین از طریق محلول‌پاشی در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

اختیار گیاه، فراوانی پیش‌ماده برای آنزیم PAL سبب افزایش تولید فنول کل از طریق تبدیل فنیل آلانین به اسید سینامیک شد (شکل ۲f).

تحت تنش آبی در انتقال کربن به مخازن گیاه محدودیت ایجاد می‌شود و کربن انباشته شده به تولید متابولیت‌های ثانویه اختصاص می‌یابد که بدون رقابت با رشدونمو هستند (Ning *et al.*, 2022). افزایش مقادیر فنولی را می‌توان به پاسخ متداول گیاه به شرایط تنش خشکی و افزایش ROSها و راهی برای ذخیره اسکلت کربنی تولیدشده توسط فتوسنتز در دوره‌هایی که رشد گیاه محدود می‌شود در نظر گرفت (Kapoor *et al.*, 2020). محلول‌پاشی نعناع با ال-تریپتوفان، ال-تیروزین، ال-فنیل آلانین در دو غلظت ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محتوی فنول کل را ۱/۲۲ تا ۳/۵۱ برابر افزایش داد (Taraseviciene *et al.*, 2021).

فلاونوئید کل: اثرات اصلی خشکی و محلول‌پاشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شدند، اما اثر متقابل معنی‌دار نشد (جدول ۳). تنش خشکی اعمال‌شده در رزماری سبب شد فلاونوئید کل عصاره ۰/۰۲۱ میلی‌گرم کوئرستین بر گرم (۳۵/۶ درصد) نسبت به شرایط آبیاری کامل افزایش یابد (شکل ۲g). محلول‌پاشی با ال-فنیل آلانین تأثیر مثبتی بر میزان این ترکیبات در عصاره داشت و سبب افزایش ۶۰ تا ۶۹ درصدی در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲h). ممکن است فراهمی ال-فنیل آلانین برای گیاه سبب افزایش فعالیت آنزیم PAL (شکل ۲d) و القای تولید متابولیت‌های ثانویه با قدرت آنتی‌اکسیدانی بالا شامل فنول (شکل ۲f) و فلاونوئید (شکل ۲h) گردد.

فلاونوئیدها یک سیستم آنتی‌اکسیدانی ثانویه تشکیل می‌دهند و عملکرد سایر سیستم‌های مهارکننده ROS را هنگام کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تکمیل می‌کنند. مهار تولید ROS به وسیله فلاونوئیدها از طریق بازداری آنزیم‌های تولیدکننده ROS و همین طور بازچرخ دیگر آنتی‌اکسیدان‌ها و کلاته‌شدن یون‌های فلزی انتقالی میسر می‌گردد. لذا این ترکیبات برای گیاهان در شرایط نامطلوب محیطی اهمیت دارند (Baskar *et al.*, 2018). اولین مرحله در مسیر فنیل پروپانوئید برای سنتز فلاونوئید، دآمینه‌کردن فنیل آلانین به سینامات توسط فنیل آلانین آمونیالیاز است. مرحله بعد شامل تبدیل سینامات به ۴-کوماریل-کوآنزیم آ توسط ترانس سینامات ۴-هیدروکسیلاز (C4H) است (Barros and Dixon, 2020). محتوی فلاونوئید در بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) تحت تنش خشکی با ۶۰ و ۳۰ درصد آبیاری کامل، به ترتیب ۵۵ و ۶۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (Omidi *et al.*, 2018).

قدرت آنتی‌اکسیدانی عصاره: اثرات اصلی خشکی و محلول‌پاشی به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار شدند اما اثر متقابل خشکی × محلول‌پاشی معنی‌دار نشد (جدول ۴). تحت تنش خشکی القاشده، قدرت آنتی‌اکسیدانی عصاره رزماری ۵/۶ درصد افزایش یافت (شکل ۳a). محلول‌پاشی رزماری با غلظت‌های ۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر ال-فنیل آلانین، سبب افزایش ۱۰/۷ تا ۱۱/۵ درصد قدرت آنتی‌اکسیدانی عصاره شد (شکل ۳b). افزایش فعالیت آنزیم PAL تحت تنش خشکی (شکل ۲c) و محلول‌پاشی ال-فنیل آلانین (شکل ۲d) سبب افزایش محتوی فنول کل (شکل ۲e و ۲f) و فلاونوئید کل (شکل ۲g و ۲h) موجود در عصاره رزماری شد. همچنین کاروتنوئیدها تحت تأثیر تنش خشکی (شکل ۱c) و محلول‌پاشی (شکل ۱d) افزایش یافتند. افزایش این متابولیت‌های ثانویه به عنوان ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، با دادن هیدروژن به رادیکال DPPH سبب مهار آن شدند (شکل ۳a و ۳b).

سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه نقش حفاظتی مهمی از طریق افزایش متابولیت‌های ثانویه جهت خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد تشکیل‌شده تحت تنش خشکی ایفا می‌کند. تنش خشکی در ریشه از طریق شبکه‌های سیگنال‌دهی سلول به سلول درک می‌شود. این سیگنال‌های استرس متعاقباً از طریق ریشه به سمت برگ‌ها می‌روند تا از طریق آوند چوبی بیوسنتز هورمون‌های گیاهی و متابولیت‌های ثانویه را القا کنند (Yadav *et al.*, 2021). اسانس گیاه رزماری تحت تنش خشکی ۷۵ و ۵۵ درصد آبیاری کامل به ترتیب سبب مهار ۹۰ و ۸۸ درصد رادیکال‌های DPPH شدند (Farhoudi, 2013). در نعناع فلفلی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) محلول‌پاشی ال-فنیل آلانین بر قدرت آنتی‌اکسیدانی، محتوی اسانس و عملکرد اسانس رزماری تحت القای تنش خشکی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		قدرت آنتی‌اکسیدانی	محتوی اسانس	عملکرد اسانس در بوته
خشکی	۱	۶۴/۶۵*	۵/۱×۱۰$^{-۳}$ ns	۱/۲×۱۰$^{-۲}$**
ال-فنیل آلانین	۳	۵۵/۹۴**	۶/۶×۱۰$^{-۳}$*	۸/۳×۱۰$^{-۳}$**
ال-فنیل آلانین × خشکی	۳	۵/۱۵ns	۲/۰×۱۰$^{-۳}$ ns	۳/۳×۱۰$^{-۴}$ ns
خطا	۱۶	۱۰/۴۷	۱/۷×۱۰$^{-۳}$	۵/۷×۱۰$^{-۴}$
ضریب تغییرات (٪)		۵/۴	۴	۶/۷

*و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns عدم معنی‌داری

با اعمال تنش خشکی ۳۰ درصد آبیاری کامل، رادیکال‌های DPPH ۲۶ درصد مهار شدند (Jahani *et al.*, 2021).

محتوی اسانس: تحت تأثیر محلول‌پاشی رزماری با ال-فنیل آلانین، تغییرات محتوی اسانس در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد اما اثر خشکی و اثر متقابل خشکی × محلول‌پاشی معنی‌دار نشد (جدول ۴). کلیه غلظت‌های ال-فنیل آلانین سبب افزایش ۶ تا ۷/۵ درصدی محتوی اسانس شدند (شکل ۳e).

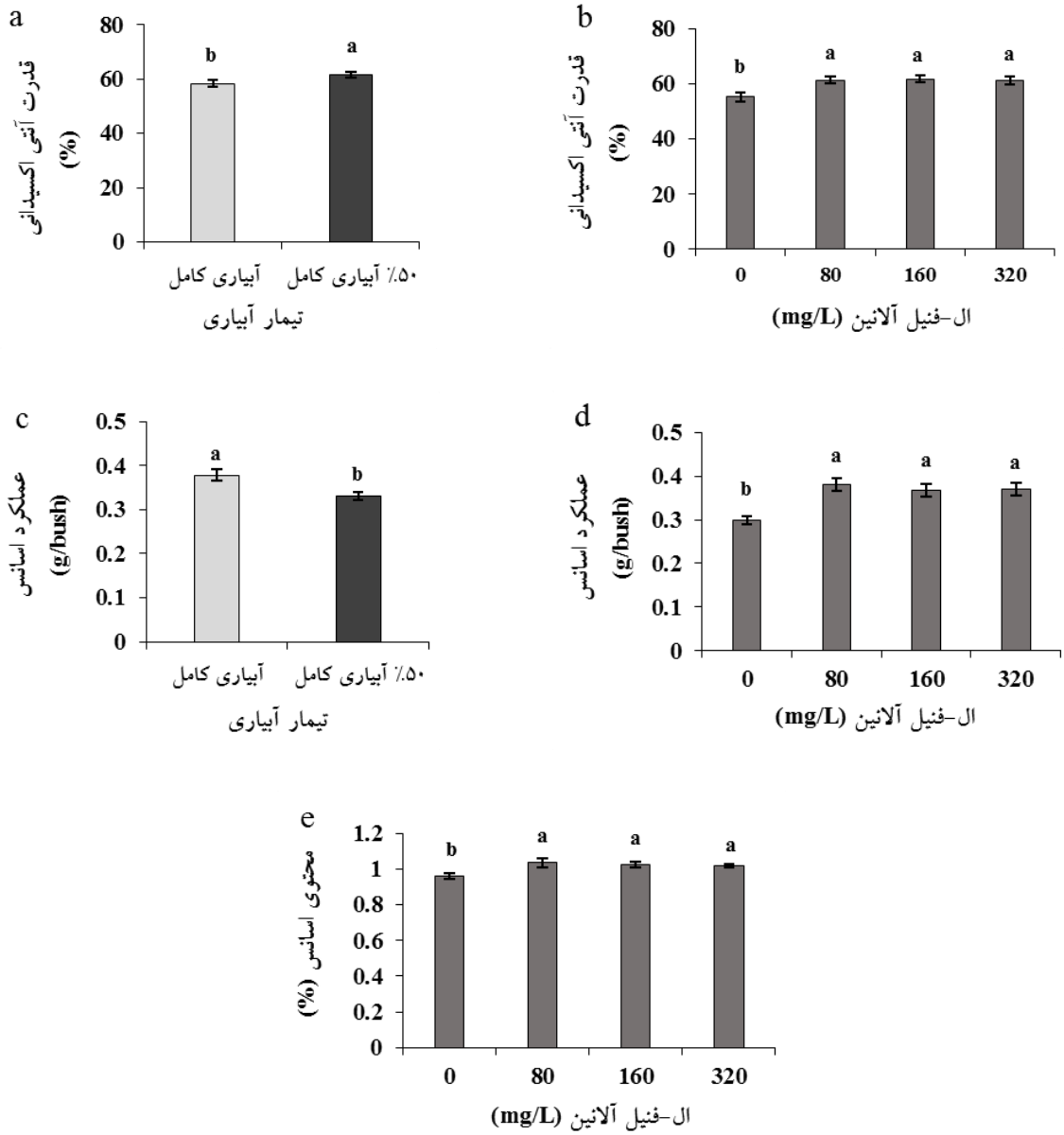
فنیل آلانین به عنوان منبع نیتروژن یک کمک‌کننده برای رشد و نمو گیاه است که بر بسیاری از آنزیم‌های کنترل‌کننده فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه و تشکیل و تولید اسانس تأثیر می‌گذارد. این ماده در تمام سلول‌های گیاهی، پروتئین‌های گیاهی، هورمون‌ها و کلروفیل‌ها یافت می‌شود (Poorghadir *et al.*, 2020). نیتروژن بر تولید اسانس از طریق متابولیسم کربن و تشکیل استیل کوآنزیم آ از طریق مسیر موالونات تأثیر می‌گذارد (Fazli *et al.*, 2005). محلول‌پاشی بادرنجبویه در مرحله رویشی و شروع گلدهی با غلظت‌های ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال-فنیل آلانین سبب افزایش عملکرد کمی اسانس شد و بیشترین بازده اسانس از محلول‌پاشی ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد (Baharlou *et al.*, 2019). در نعناع فلفلی (*M. piperita* Granada) محلول‌پاشی با فنیل آلانین ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، میزان اسانس را ۱/۳۸ برابر افزایش داد (Velicka *et al.*, 2022).

عملکرد اسانس در بوته: عملکرد اسانس بوته رزماری تحت اثرات اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). تحت تأثیر تنش خشکی عملکرد اسانس رزماری ۱۲ درصد کاهش یافت (شکل ۳c) که علت می‌تواند کاهش وزن خشک اندام هوایی (شکل ۲a) باشد. عملکرد اسانس رزماری تحت محلول‌پاشی با کلیه غلظت‌های ال-فنیل آلانین افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد داشت که احتمالاً به علت افزایش وزن خشک رزماری تحت تأثیر محلول‌پاشی با مواد فوق بود (شکل ۲b). به طور کلی کاربرد ال-فنیل آلانین سبب شد عملکرد اسانس در بوته ۲۲/۷ تا ۲۷ درصد نسبت به شاهد افزایش یابد (شکل ۳d).در آزمایشی محلول‌پاشی فنیل آلانین ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر بر آویشن بیشترین تأثیر مثبت را بر عملکرد اسانس داشت (Ghazal, 2015).

ترکیبات اسانس: بر اساس نتایج GC-MS، ترکیبات اصلی اسانس رزماری آلفا-پینن (α-Pinene) (۱۱/۹ درصد)، ۸،۱-سینئول (1,8-cineole) (۷/۶ درصد)، کامفور (Camphor) (۱۲/۸ درصد)، بورنئول (Borneol) (۱۰/۴ درصد) و بورنیل استات (Bornyl acetate) (۱۲/۸ درصد) بودند. تنش خشکی میزان آلفا-پینن، ۸،۱-سینئول و کامفور (مونوترپن‌ها) را کاهش داد اما بورنئول و بورنیل استات (مونوترپن‌ها) افزایش یافتند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]



شکل ۳- تأثیر تیمار آبیاری (آبیاری کامل و ۵۰٪ آبیاری کامل) و محلول‌پاشی غلظت‌های ال-فنیل آلانین (صفر، ۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر) قدرت آنتی‌اکسیدانی (a و b)، عملکرد اسانس در بوته (c و d) و محتوی اسانس (e). مقادیر با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD و خطوط روی هر ستون معرف استاندارد ارور هستند.

کاهش برخی مونوترپن‌ها تحت تنش خشکی به دلیل تغییر در بیان ژن‌های مرتبط، تغییر در مسیرهای متابولیکی، و تخصیص منابع به ترکیبات محافظتی است (Ramezani *et al.*, 2020; Kumlay *et al.*, 2022). از سوی دیگر، افزایش برخی مونوترپن‌ها مانند بورنئول به نقش‌های محافظتی، تنظیم اسمزی، پاسخ به آسیب مکانیکی و تغییر در فعالیت آنزیمی مرتبط است (Yang *et al.*, 2021; Zarepour *et al.*, 2024).

تحت تأثیر محلول‌پاشی رزماری با ال-فنیل آلانین، بالاترین میزان آلفا-پینن، ۸،۱- سینئول و کامفور در غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر بدست آمد که به ترتیب ۱۵/۸، ۷/۹ و ۱۰/۴ درصد ترکیبات اسانس را تشکیل دادند. بیشترین میزان بورنئول و بورنیل استات در غلظت ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد که میزان آن‌ها به ترتیب ۱۴/۳ و ۱۹/۱ درصد بود (جدول ۵). با توجه به تأثیر خشکی القاشده و محلول‌پاشی ال-فنیل آلانین بر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

جدول ۵- تأثیر تیمار آبیاری (آبیاری کامل و ۵۰٪ آبیاری کامل) و محلول‌پاشی غلظت‌های ال-فنیل آلانین (صفر، ۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بر ترکیبات اسانس رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.).

ردیف	ترکیبات اسانس	شاخص بازداری	سطوح آبیاری (٪)		غلظت‌های ال-فنیل آلانین (mg/L)			
			۱۰۰	۵۰	۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
۳	α-Pinene	۹۴۲	۱۱/۸۶	۸/۱۵	۱۰/۰۱	۱۵/۷۶	۱۰/۲۸	۵/۶۹
۴	Camphene	۹۵۹	۳/۷۶	۳/۴۱	۳/۵۹	۵/۳۴	۳/۸۱	۳/۲۴
۵	Verbenene	۹۶۱	–	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۴۱
۶	β-Pinene	۹۸۵	۰/۶۴	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۸۱	۰/۵۶	۰/۳۵
۷	3-Octanone	۹۸۷	۱/۶۵	۰/۶۵	۱/۱۵	۱/۴۸	۰/۵۶	۰/۲۷
۸	β-Myrcene	۹۹۰	۱/۸۴	۱/۲۳	۱/۵۴	۲/۰۵	۱/۴۰	۱/۳۷
۹	*p*-cymene	۱۰۳۲	۱/۳۸	۰/۷۸	۱/۰۸	۱/۳۰	۰/۹۸	۰/۴۹
۱۰	Limonene	۱۰۳۷	۳/۰۹	۱/۸۹	۲/۴۹	۳/۳۴	۲/۲۲	۱/۵۴
۱۱	1,8-cineole	۱۰۴۲	۷/۶۲	۶/۵۲	۷/۰۷	۷/۹۴	۶/۲۷	۵/۹۷
۱۲	Linalool	۱۱۰۳	۳/۴۵	۳/۴۹	۳/۴۷	۲/۵۸	۳/۳۰	۴/۳۵
۱۳	*trans*-Sabinene hydrate	۱۱۰۶	۰/۶۵	۰/۵۳	۰/۵۹	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۵۸
۱۴	Chrysanthenone	۱۱۲۵	۰/۸۹	۱/۳۴	۱/۱۲	۱/۷۷	۱/۰۵	۰/۹۱
۱۵	*cis*-Verbenol	۱۱۴۴	–	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۷۹
۱۶	Camphor	۱۱۴۹	۱۲/۸۸	۶/۰۶	۹/۴۷	۱۰/۴۱	۶/۸۸	۴/۱۲
۱۷	*trans*-Pinocamphone	۱۱۵۸	۰/۸۵	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۷۳	۰/۶۵
۱۸	Borneol	۱۱۶۸	۱۰/۳۹	۱۳/۶۰	۱۲/۰۰	۹/۸۹	۱۲/۲۹	۱۴/۲۷
۱۹	*cis*-Pinocamphene	۱۱۷۱	۱/۴۹	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۳۰	۱/۳۱	۱/۳۸
۲۰	Terpinene-4-ol	۱۱۷۲	۱/۲۵	۱/۱۹	۱/۲۲	۱/۰۰	۱/۱۱	۱/۳۵
۲۱	α-Terpineol	۱۲۰۳	۲/۴	۲/۵۸	۲/۴۹	۲/۱۶	۲/۴۵	۲/۹۱
۲۲	Myrtenol	۱۲۰۵	۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۴۰	۰/۴۷
۲۳	Myrtenal	۱۲۰۹	۱/۷۷	۲/۵۹	۲/۱۸	۱/۶۹	۲/۳۱	۳/۰۸
۲۴	Verbenone	۱۲۲۰	۴/۸۶	۲/۱۳	۳/۵۰	۳/۴۰	۲/۳۹	۱/۴۶
۲۵	Isobornyl formate	۱۲۵۳	۱/۷۱	۲/۸۲	۲/۲۷	۱/۸۰	۲/۲۷	۳/۵۹
۲۶	Bornyl formate	۱۲۶۰	–	۲/۷۹	۲/۷۹	۲/۱۲	۲/۵۳	۲/۸۴
۲۷	Bornyl acetate	۱۲۹۲	۱۲/۸۳	۱۶/۳۸	۱۴/۶۱	۱۲/۰۴	۱۶/۵۵	۱۹/۱۲
۲۸	Piperitenone oxide	۱۳۵۶	۰/۴	۰/۶۷	۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۶۳	۰/۷۸
۲۹	α-Copaene	۱۳۶۱	۰/۷۵	۱/۵۷	۱/۱۶	۰/۸۴	۱/۱۵	۲/۴۶
۳۰	*trans*-Caryophyllene	۱۴۲۹	۲/۴۶	۴/۳۴	۳/۴۰	۲/۲۲	۴/۰۲	۵/۶۷
۳۱	α-humulene	۱۴۶۴	۰/۴	۰/۸۵	۰/۶۲	۰/۴۰	۰/۶۵	۰/۷۸
۳۲	Caryophyllene oxide	۱۵۷۷	۰/۸۹	۱/۹۴	۱/۴۲	۰/۸۳	۱/۴۰	۲/۷۴
۳۳	*epi*-α-Muurolol	۱۶۴۸	۰/۷	۱/۳۰	۱/۰۰	۰/۶۷	۱/۰۸	۱/۵۶
۳۴	*allo*-Aromandrene	۱۶۶۷	۲/۳۴	۴/۱۵	۳/۲۵	۲/۰۵	۳/۹۵	۴/۷۸
۳۵	Apiol	۱۶۸۰	۰/۵	۰/۹۰	۰/۷۰	۰/۴۵	۱/۱۸	۱/۰۸
	Monoterpene Hydrocarbons (%)		۲۲/۵۷	۱۶/۳۲	۱۹/۶۴	۲۹/۰۱	۱۹/۶۷	۱۳/۰۹
	Oxygenated Monoterpenes (%)		۵۶/۹۲	۵۴/۲۵	۵۵/۵۹	۵۱/۴۶	۵۳/۰۵	۵۵/۶۸
	Sesquiterpene (%)		۷/۵۴	۱۴/۱۶	۱۰/۸۵	۷/۰۲	۱۲/۲۵	۱۷/۹۱

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

ترکیبات اسانس، بسته به هدف می‌توان میزان ترکیبات مورد نظر را افزایش یا کاهش داد.

نتیجه‌گیری

تحت تأثیر تنش خشکی ظاهراً کربن انباشته‌شده در سلول برای افزایش متابولیت‌های ثانویه اختصاص یافته و به موازات آن رشد رویشی کاهش یافته است. غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر فنیل آلانین رشد رویشی گیاه، تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم PAL، تولید فنول و فلاونوئیدها را بهبود بخشید. بنابراین، با القای تنش خشکی کنترل‌شده و محلول‌پاشی فنیل آلانین می‌توان بر مقدار ترکیبات فعال و محتوی اسانس رزماری اثر گذاشت و فراورده ارزشمند این گیاه دارویی را در صنایع مختلف مورد استفاده قرار داد.

منابع

Abrishamchi, P., Ganjeali, A., & Sakeni, H. (2012). Evaluation of morphological traits, proline content and antioxidant enzymes activity in chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Iranian Journal Pulses Research*, *3*(2), 17-30. DOI: 10.22067/IJPR.V1391I2.24695

Aebisher, D., Cichonski, J., Szpyrka, E., Masjonis, S., & Chrzanowski, G. (2021). Essential oils of seven lamiaceae plants and their antioxidant capacity. *Molecules*, *26*(13), 3793.

Aghaei, K., Ghasemi Pirbalouti, A., Mousavi, A., Naghdi Badi, H., & Mehnatkesh, A. (2019). Effects of foliar spraying of L-phenylalanine and application of bio-fertilizers on growth, yield, and essential oil of hyssop [*Hyssopus officinalis* L. subsp. *Angustifolius* (Bieb.)]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101318

Akbari, B., Baghaei-Yazdi, N., Bahmaie, M., & Mahdavi Abhari, F. (2022). The role of plant-derived natural antioxidants in reduction of oxidative stress. *Bio Factors*, 1-23. DOI: 10.1002/biof.1831

Albouchi, A., Bejaoui, Z., & El-Aouni, M. H. (2003). Influence of moderate or severe water stress on the growth of *Casuarina glauca* Sieb. seedlings. *Science et changements planetaires, 14*(3), 137-142. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20033180592.

Allenspach, M, & Steuer, C. (2021). α-pinene: A never-ending story. *Phytochemistry*. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112857

Alves, A. A. C, & Setter, T. L. (2004). Response of cassava leaf area expansion to water deficit: cell proliferation, cell expansion and delayed development. *Annals of Botany*, *94*(4), 605-613. https://doi.org/10.1093/aob/mch179

Baharlou, M. J., Ghasemi Pirbalouti, A., & Malekpoor, F. (2019). Effect of different concentrations of L-phenylalanine on chemical compositions and yield of essential oil of lemon balm (*Melissa officinalis*). *Journal of Medicinal Herbs*, *10*(4), 175-183.

Barros, J, & Dixon, R. A. (2020). Plant phenylalanine/tyrosine ammonia-lyases. *Trends in Plant Science*, *25*(1), 66-79.

Baskar, V., Rajendran, V., & Ramalingam, S. (2018). Flavonoids (antioxidants systems) in higher plants and their response to stresses. In: Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants (eds. Gupta, D. K., Palma, J. M. and Corpas, F. J.). Pp. 253-268. DOI: 10.1007/978-3-319-75088-0_12

Bleve, M., Ciurlia, L., Erroi, E., Lionetto, G., Longo, L., Rescio, L., Schettino, T., Vasapollo, G., & Lionetto, M. G. (2008). An innovative method for the purification of anthocyanins from grape skin extracts by using liquid and sub-critical carbon dioxide. *Separation and Purification Technology*, *64*, 192-197.

Bogale, A., Nagle, M., Latif, S., Aguila, M., & Muller, J. (2016). Regulated deficit irrigation and partial root-zone drying irrigation impact bioactive compounds and antioxidant activity in two select tomato cultivars. *Scientia Horticulturae*, *213*, 115-124. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.029

Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (2000). Biochemistry and Molecular Biology of Plants. 2nd Ed. American Society of Plant Physiologists Rockville, MD.

Burbulis, N., Deveikyte, J., Baltusnikiene, A., & Blinstrubiene, A. (2023). Effect of phenylalanine and tryptophane on chlorophyll and phenolic content, and the antioxidant activity of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under drought conditions. *Zemdirbyste-Agriculture*, *110*(4), 339-346. DOI:10.13080/z-a.2023.110.038

Cai, Z. M., Peng, J. Q., Chen, Y., Tao, L., Zhang, Y. Y., Fu, L. Y., Long, Q. D., & Shen, X. C. (2020). 1,8-Cineole: A review of source, biological activities, and application. *Journal of Asian Natural Products Research*. https://doi.org/10.1080/10286020.2020.1839432

Caser, M., Chitarra, W., D'Angiolillo, F., Perrone, E., Demasi, S., Lovisolo, C., Pistelli, L., Pistelli, L., & Scariot, V. (2019). Drought stress adaptation modulates plant secondary metabolite production in *Salvia dolomitica* Codd. *Industrial Crops and Products*, *129*, 85-96. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.11.068

Chaturvedi, S, & Gupta, P. (2021). Plant secondary metabolites for preferential targeting among various stressors of metabolic syndrome. *Studies in Natural Products Chemistry*, *71*, 221-261. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

91095-8.00012-X
Chaudhary, M. R., Chaudhary, S., Sharma, Y., Singh, T. A., Mishra, A. K., Sharma, S., & Mehdi, M. M. (2023). Aging, oxidative stress and degenerative diseases: Mechanisms, complications and emerging therapeutic strategies. *Biogerontology, 24*(5), 609-662.
Cheng, L., Han, M., Yang, L., Yang, L., Sun, Z., & Zhang, Z. (2018). Changes in the physiological characteristics and baicalin biosynthesis metabolism of *Scutellaria baicalensis* Georgi under drought stress. *Industrial Crops and Products*, *122*, 473-482. DOI:10.1016/j.indcrop.2018.06.030
Cheng, X., Wang, X., Zhang, A., Wang, P., Chen, Q., Ma, T., & Fang, Y. (2020). Foliar phenylalanine application promoted antioxidant activities in cabernet sauvignon by regulating phenolic biosynthesis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 68*(52), 15390-15402.
Chrysargyris, A., Mikallou, M., Petropoulos, S., & Tzortzakis, N. (2020). Profiling of essential oils components and polyphenols for their antioxidant activity of medicinal and aromatic plants grown in different environmental conditions. *Agronomy*, *10*(727), 1-28. https://doi.org/10.3390/agronomy10050727
Correia, B., Pinto-Marijuan, M., Neves, L., Brossa, R., Dias, M. C., Costa, A., & Pinto, G. (2014). Water stress and recovery in the performance of two Eucalyptus globulus clones: physiological and biochemical profiles. *Physiologia Plantarum*, *150*(4), 580-592. https://doi: 10.1111/ppl.12110
Edahiro, J. I., Nakamura, M., Seki, M., & Furusaki, S. (2005). Enhanced accumulation of anthocyanin in cultured strawberry cells by repetitive feeding of L-phenylalanine into the medium. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *99*, 43-47.
El-Din, K. M. G, & El-Wahed, M. S. A. A. (2005). Effect of some amino acids on growth and essential oil content of chamomile plant. *International Journal of Agriculture and Biology*, *7*, 376-380.
Fageria, N. K., Filho, M. B., Moreira, A., & Guimaraes, C. M. (2009). Foliar fertilization of crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, *32*(6), 1044-1064.
Farhoudi, R. (2013). Effect of drought stress on chemical constituents, photosynthesis and antioxidant properties of *Rosmarinus officinalis* essential oil. *Journal of Medicinal plants and By-Products*, *1*, 17-22. DOI: 10.22092/JMPB.2013.108486
Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy*, *29*, 185-212. DOI: 10.1051/agro: 2008021
Fazli, S., Abdin, M. Z., Jamal, A., & Ahmad, S. (2005). Interactive effect of sulphur and nitrogen on lipid accumulation, acetyl-CoA concentration and acetyl-CoA carboxylase activity in developing seeds of oilseed crops (*Brassica campestris* L. and *Eruca sativa* Mill.). *Plant Science*, *168*(1), 29-36. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.008
Feduraev, P., Skrypnik, L., Riabova, A., Pungin, A., Tokupova, E., Maslennikov, P., & Chupakhina, G. (2020). Phenylalanine and tyrosine as exogenous precursors of wheat (*Triticum aestivum* L.) secondary metabolism through PAL-associated pathways. *Plants*, *9*(4), 476. DOI: 10.3390/plants9040476
Gasmi, A., Benabderrahim, M. A., Guasmi, F., Elfalleh, E., Triki, T., Zammouri, T., & Ferchichi, A. (2019). Phenolic profiling, sugar composition and antioxidant capacity of arta (*Calligonum comosum* L.), a wild Tunisian desert plant. *Industrial Crops and Products*, *130*, 436-442. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.003
Ghazal, G. M. (2015). Growth and oil yield of thymus vulgaris plant as influenced by some amino acids and ascorbic acid. *World Journal of Pharmaceutical Sciences*, *3*(10), 1949-2166.
Gohari, G. R., Freydoni, S., Panahirad, S., Sepehri, N., & Dadpour, M. R. (2021). Foliar application of phenylalanine on nutritional value in *Vitis vinifera* var. Hosseini. *Food Research Journal*, *30*(4), 109-121. 10.22034/FR.2021.37105.1708
Govahi, M., Ghalavand, A., Nadjafi, F., & Sorooshzadeh, A. (2015). Comparing different soil fertility systems in Sage (*Salvia officinalis*) under water deficiency. *Industrial Crops and Products*, *74*, 20-27. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.053
Hachlafi, N., Aanniz, T., Menyiy, N., Baaboua, A., Omari, N., & Balahbib, A. (2023). In vitro and in vivo biological Investigations of camphene and its mechanism insights. *Food Reviews International*, *39*(4), 1799-1826. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1936007
Jahani, F., Tohidi-Moghadam, H. R., Larijani, H. R., Ghooshchi, F., & 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. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(691). DOI: 10.1007/s12517-021-07024-3
Jamshidi-Kia, F., Lorigooini, Z., & Amini-Khoei, H. (2017). Medicinal plants: Past history and future perspective. *Journal of Herbmed Pharmacology*, *7*(1), 1-7.
Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Ramakrishnan, M., Sharma, A., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, *10*(16), 5692. https://doi.org/10.3390/app10165692

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

Khalil, N., Elhady, S. S., Diri, R. M., Fekry, M. I., Bishr, M., Salama, O., & El-Zalabani, S. M. (2022). Salicylic acid spraying affects secondary metabolites and radical scavenging capacity of drought-stressed *Eriocephalus africanus* L. *Agronomy*, *12*(10), 2278. https://doi.org/10.3390/agronomy12102278

Khan, S., Abdo, A. A. A., Shu, Y., Zhang, Z., & Liang, T. (2023). The extraction and impact of essential oils on bioactive films and food preservation, with emphasis on antioxidant and antibacterial activities-a review. *Foods*, 12(4169). https://doi.org/10.3390/foods12224169

Kim, S. H., Lee, S. Y., Hong, C. Y., Gwak, K. S., Park, M. J., Smith, D., & Choi, I. G. (2013). Whitening and antioxidant activities of bornyl acetate and nezukol fractionated from *Cryptomeria japonica* essential oil. *International Journal of Cosmetic Science*, *35*, 484-490. https://doi.org/10.1111/ics.12069

Koca, N, & Karaman, S. (2015). The effects of plant growth regulators and L-phenylalanine on phenolic compounds of sweet basil. *Food Chemistry*, *166*, 515-521. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.065

Kordi, S., Saidi, M., & Ghanbari, F. (2013). Induction of drought tolerance in sweet basil (*Ocimum basilicum* L) by salicylic acid. *Journal of Agriculture and Food Research*, *2*(2), 18-26. DOI:10.24102/ijafr.v2i2.149

Kornienko, J. S., Smirnova, I. S., Pugovkina, N. A., Ivanova, J. S., Shilina, M. A., Grinchuk, T. M., Shatrova, A. N., Aksenov, N. D., Zenin, V. V., & Nikolsky, N. N. (2019). High doses of synthetic antioxidants induce premature senescence in cultivated mesenchymal stem cells. *Scientific Reports*, *9*, 1296.

Kumlay, A. M., Kocak, M. Z., Gohari, G., Nouraein, M., Celikcan, F., Kaysim, M. G., & Kulak, M. (2022). Agronomic traits, secondary metabolites and element concentrations of *Lavandula angustifolia* leaves as a response to single or reiterated drought stress: How effective is the previously experienced stress? *Folia Horticulturae*, *34*(1), 1-16. https:// DOI: 10.2478/fhort-2022-0005

Leport, L., Turner, N. C., French, R. J., Barr, M. D., Duda, R., & Davies, S. L. (2006). Physiological responses of chickpea genotypes to terminal drought in a Mediterranean-type environment. *European Journal of Agronomy*, *11* (3), 279-291. DOI: 10.1016/S1161-0301(99)00039-8

Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, *148*, 350-382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

Lohr, M. (2009). Carotenoids in chlamydomonas. In: The Chlamydomonas Sourcebook (eds. Grossman, A. R. and Wollman, F. A.). Pp. 733-761. DOI:10.1016/B978-0-12-370873-1.00029-0

Lourenco, S. C., Moldao-Martins, M., & Alves, V. D. (2019). Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications. *Molecules*, *24*(22), 4132. DOI: 10.3390/molecules24224132

Maeda, H, & Dudareva, N. (2012). The shikimate pathway and aromatic amino acid biosynthesis in plants. *Annual Review of Plant Biology*, *63*, 73-105. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105439

Mamta, K. M., Gurpreet, S. D., Satinder, K. B., & Mausam, V. (2014). Antioxidants. In: Biotransformation of Waste Biomass into High Value Biochemicals (eds. Satinder, K. B., Gurpreet, S. D. and Carlos, R. S.) Pp. 117-138. Springer, New York, NY.

Manivannan, P., Jaleel, C. A., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., Lakshmanan, G. A., & Panneerselvam R. (2007). Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. *Colloids and Surface B: Biointerfaces*, *59* (2), 141-149. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.05.002

Maoka, T. (2020). Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of Natural Medicines*, *74*(1), 1-16. DOI: 10.1007/s11418-019-01364-x

Marinova, D., Ribarova, F., & Atanassova, M. (2005). Total phenolics and flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, *40*(3), 255-260.

Maslova, T. G., Markovskaya, E. F., & Slemnev, N. N. (2021). Functions of carotenoids in leaves of higher plants. *Biology Bulletin Reviews*, *11*, 476-487.

Mittler, R., Zandalinas, S. I., Fichman, Y., & Van Breusegem, F. (2022). Reactive oxygen species (ROS) signalling in plant stress responses. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, *23*, 663-679.

Mohammadi, H., Amirikia, F., Ghorbanpour, M., Fatehi, F., & Hashempour, H. (2019). Salicylic acid induced changes in physiological traits and essential oil constituents in different ecotypes of *Thymus kotschyanus* and *Thymus vulgaris* under well-watered and water stress conditions. *Industrial Crops and Products*, *129*, 561-574. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.046

Molla, A. E., Andualem, A. M., Ayana, M. T., & Zeru, M. A. (2023). Effects of drought stress on growth, physiological and biochemical parameters of two Ethiopian red pepper (*Capsicum annum* L.) cultivars. *Journal of Applied Horticulture*, *25*(1), 32-38. https://doi.org/10.37855/jah.2023.v25i01.05

Mwithiga, G., Maina, S., Gitari, J., & Muturi, P. (2022). Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) growth rate, oil yield and oil quality under differing soil amendments, *Heliyon*, *8*(4).

Naikoo, M. I., Dar, M. I., Raghib, F., Jaleel, H., Ahmad, B., Raina, A., Khan, F. A., & Naushin, F. (2019). Role and regulation of plants phenolics in abiotic stress tolerance. *Plant Signaling Molecules*, *9*, 157-168. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816451-8.00009-5

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

Nieto, G., Ros, G., & Castillo, J. (2018). Antioxidant and antimicrobial properties of rosemary (*Rosmarinus officinalis*, L.). *Medicines, 5*(98), 1-13. https://doi.org/10.3390/medicines5030098

Ning, W., Zhu, S. Q., Nian, H., Yin, J. H., & An, B. Y. (2022). Effects of exogenous $CaCl_2$ on the photosynthetic function and active oxygen metabolism of *Salix viminalis* leaves under Pb stress. *Applied Ecology and Environmental Research, 20*(4), 3143-3154. https://doi: 10.15666/aeer/2004_31433154

Nisar, N., Li, L., Chi Khin, N., & Pogson, B. J. (2014). Carotenoid metabolism in plants. *Molecular Plant, 8*(1), 68-82. DOI:https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.12.007

Novak, J, & Bluthner, W. D. (2020). *Rosmarinus officinalis* L.: Rosemary. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 501-521. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38792-1_15

Oguz, M. C., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., & Yildiz, M. (2022). Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia, 2*(4), 180-197.

Omidi, J., Shoja, M., & 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*(2), 121-134.

Paul, A., Acharya, K., & Chakraborty, N. (2023). Involvement of phenylpropanoid pathway and shikimic acid pathway in environmental stress response. In: Biology and Biotechnology of Environmental Stress Tolerance in Plants (ed. Roychoudhury, A.) Pp. 40. New York.

Phimchan, P., Chathai, S., Bosland, P. W., & Techawongstien, S. (2014). Enzymatic changes in phenylalanine ammonia-lyase, cinnamic-4-hydroxylase, capsaicin synthase, and peroxidase activities in capsicum under drought stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 62*, 7057-7062. dx.doi.org/10.1021/jf4051717

Poorghadir, M., Mohammadi Torkashvand, A., Mirjalili, S. A., & Moradi, P. (2020). Interactions of amino acids (proline and phenylalanine) and biostimulants (salicylic acid and chitosan) on the growth and essential oil components of savory (*Satureja hortensis* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *30*, 1-21. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101815

Rahmani Samani, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Moattar, F., & Golparvar, A. R. (2019). L-Phenylalanine and bio-fertilizers interaction effects on growth, yield and chemical compositions and content of essential oil from the sage (*Salvia officinalis* L.) leaves. *Industrial Crops and Products, 137*, 1-8. DOI:10.1016/j.indcrop.2019.05.019

Rajput, A., Kasar, A., Thorat, S., & Kulkarni, M. (2023). Borneol: A plant-sourced terpene with a variety of promising pharmacological effects. *Natural Products Journal, 13*(1), 13-28. https://doi.org/10.2174/2210315512666211221115143

Ramezani, S., Abbasi, A., Sobhanverdi, S., Shojaeiyan, A., & Ahmadi, N. (2020). The effects of water deficit on the expression of monoterpene synthases and essential oils composition in Salvia ecotypes. *Physiology and Molecular Biology of Plants, 26*, 2199-2207. https:// doi: 10.1007/s12298-020-00892-1

Reham, M. S., Khattab, M. E., Ahmed, S. S., & Kandil, M. A. M. (2016). Growth, yield quality and chemical composition of genoveser basil plant. *African Journal of Agricultural Research*, *11*(16), 1398-1410. https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10699

Sathee, L., Malini, M. K., Kumar, P., & Kumar, S. (2023). Terpenoid production through mevalonate and methylerythritol phosphate pathway and regulation of environmental stress tolerance. In: Biology and Biotechnology of Environmental Stress Tolerance in Plants (ed. Roychoudhury, A.) Pp. 34.

Saunders, J. A, & Mcclure, J. W. (1974). The suitability of a quantitive spectrophotometric assay for phenylalanine ammonia-lyase activity inbarely, buckwheat and pea seedlings. *Journal of Plant Physiology*, *54*, 412-413. https://doi.org/10.1104/pp.54.3.412

Sharma, A., Shahzad, B., Rehman, A., Bhardwaj, R., Landi, M., & Zheng, B. (2019). Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. *Molecules*, *24*(13), 1-22. DOI: 10.3390/molecules24132452

Soares Santos, E., Tavares de Sousa Machado, S., Beethoven Rodrigues, F., Almeida da Silva, Y., Carlos Xavier Matias, L., Janice Pereira Lopes, M., Damiana Soares Gomes, A., Feitosa Ribeiro, T., Adilfa de Oliveira Garcia, F., Douglas Melo Coutinho, H., Francisco Bezerra Felipe, C., de Araujo Neves, S., & Regina Kerntopf, M. (2023). Potential anti-inflammatory, hypoglycemic, and hypolipidemic activities of alpha-pinene in diabetic rats. *Process Biochemistry, 126*, 80-86. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.12.023

Sobhkhizi, A., fadai Rayni, M., Badie Barzin, H., & Noori, M. (2014). Influence of drought stress on photosynthetic enzymes,chlorophyll, protein and relative water content in crop plants. *International Journal of Biosciences*, *5*(7), 89-100. http://dx.doi.org/10.12692/ijb/5.7.89-100

Taraseviciene, Z., Velicka, A., & Paulauskiene, A. (2021). Impact of foliar application of amino acids on total phenols, phenolic acids content of different mints varieties under the field condition. *Plants*, *10*(3), 1-16. https://doi.org/10.3390/plants10030599

Thakur, M., Bhattacharya, S., Khosla, P. K., & Puri, S. (2018). Improving production of plant secondary metabolites through biotic and abiotic elicitation. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, *12*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.11.004

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

Tzin, V, & Galili, G. (2010). The biosynthetic pathways for shikimate and aromatic amino acids in *Arabidopsis thaliana*. *American Society of Plant Biologists*, 1-18. DOI:10.1199/tab.0132

Valko, M., Leibfritz, D., Moncol, J., Cronin, M., Mazur, M., & Telser, J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The International Journal of Biochemistry and Cell Biology, 39*, 44-84.

Velicka, A., Taraseviciene, Z., Hallmann, E., & Kieltyka Dadasiewicz, A. (2022). Impact of foliar application of amino acids on essential oil content, odor profile, and flavonoid content of different mint varieties in field conditions. *Plants*, *11*(21), 2938. https://doi.org/10.3390/plants11212938

Wang, W, & Gong, Y. (2021). Effects of water and salt coordinated regulation at the different growth stages on water consumption and yield of tomato. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *14*(4), 96-105. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211404.6238

Wen, S., Liu, B., Long, S., Gao, S., Liu, Q., Liu, T., & Xu, Y. (2022). Low nitrogen level improves low-light tolerance in tall fescue by regulating carbon and nitrogen metabolism. *Environmental and Experimental Botany*. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104749

Wu, G. (2009). Amino acids: Metabolism, functions, and nutrition. *Amino Acids*, *37*, 1-17. DOI: 10.1007/s00726-009-0269-0

Xiu-Qin, L., Chao, J., Yan-Yan, S., Min-Li, Y., & Xiao-Gang, C. (2009). Analysis of synthetic antioxidants and preservatives in edible vegetable oil by HPLC/TOF-MS. *Food Chemistry*, *113*, 692-700.

Yadav, B., Jogawat, A., Rahman, M. S., & Narayan, O. P. (2021). Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants. *Gene Reports*, *23*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.genrep.2021.101040

Yamasaky, K., Hashimoto, A., Kokusenya, Y., Miyamoto, T., & Sato, T. (1994). Electrochemical method for estimating the antioxidative effects of methanol extracts of crude drugs. *Biological and Pharmaceutical Bulletin, 42*(8), 1663-1665.

Yang, L., Wen, K., Ruan, X., Zhao, Y. X., Wei, F., & Wang, Q. (2018). Response of plant secondary metabolites to environmental factors. *Molecules*, 1-26. https://doi.org/10.3390/molecules23040762

Yang, Z., Xie, C., Huang, Y., An, W., Liu, S., Huang, S., & Zheng, X. (2021). Metabolism and transcriptome profiling provides insight into the genes and transcription factors involved in monoterpene biosynthesis of borneol chemotype of *Cinnamomum camphora* induced by mechanical damage. *Peerj Journals*, *9*, e11465. https://doi: 10.7717/peerj.11465

Zarepour, M., Rahimi, M. M., Kelidari, A. S., & Abdipour, M. (2024). Growth-promoting bacteria and salicylic acid improve essential oil, flower yield, and compatible osmolyte content of common yarrow (*Achillea millefolium* L.) under drought stress. *The Philippine Agricultural Scientist, 107*(3), 215-224. https:// DOI:10.62550/dq040023

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]

Improving the content of essential oil and active compounds in rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) through spraying L-phenylalanine and induction of drought stress

Marzie Soltani Alikooyi [1], Ali Abbasi Surki [1*], Sina Fallah[1], Mehdi Ghasemi Nafchi[2]

[1] Department of Agriculture, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
[2] Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

(Received: 2024/11/12, Accepted: 2025/01/27)

Abstract

To investigate the effect of L-phenylalanine on the secondary metabolites of rosemary under drought stress conditions, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications at Shahrekord University, 2021. The first factor involved drought stress at 50% of field capacity compared to normal irrigation, while the second factor examined various concentrations of L-phenylalanine (80 mg/L, 160 mg/L, and 320 mg/L). The findings indicated that drought stress led to a reduction in chlorophyll *a* (36%), chlorophyll *b* (46%), shoot dry weight (14.4%), and essential oil yield (12%), while simultaneously increasing carotenoid levels (114%), PAL enzyme activity (40.6%), phenolic compounds (5.6%), flavonoid compounds (35.5%), and the antioxidant capacity of the extract (5.6%) when normalized against the irrigated control. The application of concentrations ranging from 80 mg/L to 320 mg/L of L-phenylalanine increased chlorophyll *a* content (31 to 41.4%), shoot dry weight (17.7 to 14.7%), PAL enzyme activity (27 to 38.7%), phenolic compounds (12.4 to 13.4%), flavonoid compounds (60 to 69%), antioxidant capacity of the extract (10.5 to 11.5%), essential oil content (6 to 7.5%), and essential oil yield (27%) compared to the control. Due to the lack of significant difference between different concentrations of L-phenylalanine, 80 mg/L is significant as the optimal concentration. The primary constituents of the essential oil were identified as alpha-pinene (11.9%), 1,8-cineole (7.6%), camphor (12.8%), borneol (10.4%), and borneol acetate (12.8%). Drought stress decreased the levels of alpha-pinene, 1,8-cineole, and camphor while increasing those of borneol and borneol acetate. Application of L-phenylalanine resulted in the highest concentrations of alpha-pinene, 1,8-cineole, and camphor at 80 mg/L, whereas the maximum levels of borneol and borneol acetate were observed at 320 mg/L. Consequently, the application of controlled drought stress combined with L-phenylalanine spraying can effectively enhance the secondary metabolites in rosemary extracts and essential oil compounds, thereby improving the antioxidant properties of rosemary extract for potential applications across various industries.

Keywords: Antioxidant, Rosemary, Irrigation, Phenol, Phenylalanine ammonia lyase

Corresponding author, Email: aliabbasis.1359@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.265]