مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

اثر سالیسیلیک اسید بر فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالاز (PAL) ، تیروزین آمونیالاز (TAL) و پراکسیداز (POD) بر گیاه سیب‌زمینی در شرایط کشت درون شیشه‌ای

محمد صادق مالکی، علی اکبر احسانپور*

اصفهان، دانشگاه اصفهان، گروه زیست شناسی گیاهی و جانوری، دانشکده علوم و فناوری های زیستی، اصفهان

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰

چکیده:

سیب‌زمینی یکی از گیاهان زراعی بوده که می‌تواند به‌عنوان یک گیاه مدل در مطالعات زیست‌شناسی مورداستفاده قرار گیرد. سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک القاکننده با تولید گونه‌های فعال اکسیژن موجب پیام‌رسانی و القای رشد می‌گردد. این هورمون می‌تواند موجب افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و تجمع متابولیت های ثانویه همچون فنل، فلاونوئید و آنتوسیانین و آنزیم‌های دخیل در مسیر بیوسنتزی این ترکیبات شود. در این مطالعه گیاهچه‌های سیب‌زمینی در محیط کشت موراشیگ و اسکوگ (MS) تحت غلظت‌های ۰، ۰/۱ ، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید کشت گردید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد سالیسیلیک اسید در غلظت‌های پائین (۰/۱، ۱ و ۱۰ میکومولار) سبب افزایش وزن‌تر و خشک گیاه نسبت به نمونه شاهد شد. همچنین محتوای ترکیبات فنلی، فلاونوئید و آنتوسیانین نیز با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید افزایش یافت. علاوه بر این، سالیسیلیک اسید فعالیت آنزیم‌های فنیل آلانین آمونیالیاز، تیروزین آمونیالیاز، پراکسیداز و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی را بهبود بخشید که بالاترین نتایج در غلظت ۱۰۰ میکرو مولار مشاهده شد. بر اساس نتایج، کاربرد این هورمون می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مطلوب بمنظور رشد و افزایش ترکیبات بیوشیمیایی همچون ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی معرفی گردد.

واژه های کلیدی: ترکیبات فنلی، سالیسیلیک اسید، سیب‌زمینی، کشت در شیشه، گونه‌های فعال اکسیژن

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: ehsanpou@sci.ui.ac.ir

مقدمه:

متابولیت های ثانویه ترکیبات فعال زیستی می‌باشند که نقش حیاتی را در برهم‌کنش با عوامل محیطی بمنظور سازگاری و مقابله گیاه با تنش‌های زیستی و غیر زیستی ایفا می‌نمایند (۱). بیوسنتز متابولیت های ثانویه در گیاهان به‌عنوان ترکیبات مؤثر دارویی به شرایط رشدی و نموی گیاه وابسته می‌باشد (۲). مشاهدات نشان داده‌اند که ترکیبات القاکننده می‌توانند به‌عنوان یک مولکول سیگنال‌دهنده عمل کرده و این سیگنال‌ها توسط گیرنده‌های متصل به غشای سلولی گیاه شناسایی و درنهایت منجر به افزایش سنتز و تجمع ترکیبات گیاهی گردند (۳). القاکننده‌ها مواد زیستی یا غیر زیستی متنوعی

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

می‌باشند که به کلاس‌های شیمیایی مختلف تعلق دارند و می‌توانند بیوسنتز متابولیت های ثانویه‌ی هدف را تحریک یا تقویت نمایند. همچنین این القاکننده‌ها نقش اساسی را در رشد و نمو گیاه و پیام‌رسانی بر عهده دارند (۴). سالیسیلیک اسید متعلق به گروه ترکیبات فنلی می‌باشد که با تنظیم فرایندهای مختلف همچون رشد، فتوسنتز، تنفس، گلدهی و همچنین نقش محوری در پیام‌رسانی و آنتی‌اکسیدانی در گیاه ایفا می‌کند. ازاین‌رو این ترکیب به‌عنوان یکی از تنظیم‌کننده‌های رشدی گیاهی شناخته شده است (۵). این ترکیب برای نخستین بار توسط دانشمند آلمانی یوهان بوخنر در سال ۱۹۲۸ از پوست درخت بید استخراج شد و در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی گزارش شد که این ترکیب با استفاده از گونه‌های فعال اکسیژن منجر به پیام‌رسانی می‌گردد (۶). سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک مولکول مؤثر در پیام‌رسانی با استفاده از گونه‌های فعال اکسیژن همچون سوپر اکسید، هیدروژن پراکسید و هیدروکسیل ها به‌عنوان پیام‌رسان‌های ثانویه موجب القای رشد، تولید متابولیت های ثانویه و نقش آنتی‌اکسیدانتی می‌شود (۷). به‌هرحال سطوح غلظت سالیسیلیک اسید و گونه‌های فعال اکسیژن با یکدیگر همبستگی مثبتی را نشان می‌دهند (۸). از طرف دیگر گونه‌های فعال اکسیژن در کنار نقش پیام‌رسانی می‌توانمی‌توانند در غلظت‌های بالا موجب تجمع بیش‌ازحد گونه‌های فعال اکسیژن شده و درنهایت منجر به تنش اکسیداتیو گردند (۶) و درنتیجه گیاهان مکانیسم‌های آنزیمی و غیر آنزیمی متنوعی را فعال می‌کنند. یکی از مکانسیم های مقابله با تنش اکسیداتیو تولید متابولیت های ثانویه نظیر ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی و بالا بردن ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه می‌باشد. مطالعات متعددی نشان دادند که سالیسیلیک اسید ترکیبات فنلی کل را در ذرت (۹)، اسفناج (۱۰)، انگور (۱۱) افزایش داده است. علاوه بر این، محتوای فلاونوئید در خیار (۱۲)، ریحان (۱۳)، برگ گیاه چای (۱۴) و همچنین محتوای آنتوسیانین را در پسته (۱۵)، انگور (۱۶) و آرابیدوپسیس (۱۷) تحت تیمار سالیسیلیک اسید افزایش یافته است. فنل ها با استفاده آنزیم‌هایی همچون فنیل آلانین آمونیالیاز (PAL)، تیروزین آمونیالیاز (TAL) سنتز و تنظیم می‌گردند. آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز به‌عنوان اولین آنزیم دخیل در سنتز فنل ها منجر به تبدیل فنیل آلانین به ترانس سینامیک اسید می‌شود و آنزیم تیروزین هم ترکیب تیروزین را به کوماریک اسید تبدیل می‌کند (۱۸). مطالعات مختلف نشان دادند که هورمون سالیسیلیک اسید توانسته است میزان فعالیت این دو آنزیم را در گیاه نوروزک و *Manihot esculenta* را تنظیم نماید (۱۹, ۲۰). گیاه سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی می‌باشد که به خانواده‌ی بادمجانیان تعلق دارد و در معرض بیماری‌ها و تنش‌های غیر زیستی و زیستی مختلفی می‌باشد. از همین رو، به‌کارگیری رویکردها و روش‌هاروش‌هایی بمنظور بهبود رشد و تولید ترکیبات ثانویه گیاهی در جهت بهبود کیفیت و تجاری‌سازی آن نقش مهمی را در اقتصاد کشاورزی کشورهای تولیدکننده دارا می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر، مطالعه اثر سالیسیلیک اسید بر میزان تولید برخی از متابولیت های ثانویه همچون ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی و آنزیم‌های PAL، TAL به‌عنوان آنزیم‌های کلیدی مسیر بیوسنتزی فنل ها و

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

پراکسیداز (POD) در شرایط کشت در شیشه گیاه سیب‌زمینی می‌باشد.

مواد و روش‌ها:

شرایط رشد گیاه:

برای این پژوهش از گیاهچه های سیب‌زمینی رقم وایت دزیره تکثیر شده در شرایط کشت بافت گیاهی آزمایشگاه دانشگاه اصفهان استفاده شد. بمنظور تیمار گیاهچه های سیب‌زمینی در محیط دارای سالیسیلیک اسید، در ابتدا از شیشه‌های حاوی گیاهچه های پایه سیب‌زمینی، گیاهان تقریباً یکسان ازلحاظ سن، قطر ساقه، اندازه برگ و محل برش برای کاهش خطا در آزمایش استفاده شد. گیاهچه های سیب‌زمینی پس از هفت روز در مرحله دوبرگی بر روی محیط کشت موراشیک و اسکوک (MS) حاوی غلظت‌های ۰/۱، ۱۰ و ۱۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید واکشت گردید. بمنظور ساخت محیط کشت با غلظت‌های ذکرشده از استوک ۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید استفاده شد. بدین منظور ۰/۱۳۷ گرم پودر سالیسیلیک اسید به‌آرامی و به‌تدریج به یک بشر حاوی ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل گردید و درنهایت حجم به ۲۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. درنهایت حجم مشخصی از محلول استوک به درون شیشه‌های حاوی محیط کشت اضافه گردید. درون هر شیشه ۳ گیاهچه تقریباً یکسان کشت داده شد و شیشه‌ها در اتاق رشد تحت شرایط نوری ۱۶ ساعت روشنایی (با شدت ۵۰ میکرو مول فوتون بر مترمربع در ثانیه) و ۸ ساعت تاریکی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد قرار داده شد. گیاهچه های رشد یافته پس از ۵ هفته از شیشه خارج و شاخص وزن‌تر، وزن خشک، طول اندام هوایی و ریشه، متابولیت های ثانویه و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاهچه های سیب‌زمینی اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری وزن‌تر و خشک گیاه:

گیاهچه‌های رشد یافته در محیط‌های شاهد و تیمار داده‌شده از محیط خارج و بر روی کاغذ صافی قرار گرفته تا آب اضافی گرفته و آگارهای متصل به ریشه جدا شد و وزن‌تر ریشه و ساقه به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شد.گیاهچه‌ها پس از اندازه‌گیری وزن‌تر درون پاکت‌های کاغذی به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت سپس وزن خشک ساقه و ریشه به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های PAL و TAL:

فعالیت آنزیم‌هاآنزیم‌های PAL و TAL با استفاده با روش Beaudoin-Eagan و همکاران (۲۱) انجام شد. در ابتدا ۰/۱ گرم از بافت تازه برگ گیاه در ۲ میلی‌لیتر بافر Tric-HCl (۰/۰۵ مولار، pH 8.4) حاوی ۲-مرکاپتواتانول ۱۵ میلی مولار ساییده و همگن شد. سپس به مدت ۱۵ دقیقه در rpm ۱۰۰۰۰ در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ و محلول رویی به‌عنوان عصاره آنزیمی مورداستفاده قرار گرفت. محلول واکنش حاوی فنیل آلانین ۶ میکرو مولار برای اندازه‌گیری آنزیم PAL و تیروزین ۵/۵ میکرو مولار برای اندازه‌گیری آنزیم TAL و ۵۰۰ میکرو لیتر Tric-HCl و ۱۰۰ میکرو لیتر عصاره آنزیمی و حجم نهایی به ۱ میلی‌لیتر استفاده شد پس از گذشت ۷۰ دقیقه در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد واکنش تبدیل تیروزین به کوماریک اسید و فنیل آلانین به سینامیک اسید با اضافه کردن ۵۰ میکرو لیتر کلریدریک اسید ۵ نرمال انجام شد. فعالیت آنزیم در طول‌موج ۲۹۰

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

نانومتر با تولید ترانس سینامیک اسید برای آنزیم PAL و در طول‌موج ۳۳۳ نانومتر با تولید کوماریک اسید برای آنزیم TAL استفاده شد. فعالیت آنزیم برحسب میکرو مول بر میلی‌گرم پروتئین در واحد زمان ($\mu mol.mg^{-1}\ protein.min^{-1}$) بیان شد.

اندازه‌گیری میزان فنل کل:

سنجش محتوی فنل کل با روش Singleton و همکاران (۲۲) اندازه‌گیری شد. ۰/۰۵ گرم از بافت تازه گیاه برگ در ۲ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد ساییده و همگن شد و در بن ماری در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفت و سپس در rpm ۵۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. به ۱ میلی‌لیتر از محلول متانولی رویی ۱/۸ میلی‌لیتر آب مقطر و ۰/۲ میلی‌لیتر معرف فولین اضافه شد. این محلول به مدت ۵ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. سپس ۱ میلی‌لیتر $NaCO_3$ ۱۲ درصد به محلول فوق اضافه و به مدت ۲ ساعت در دمای آزمایشگاه قرار داده شد. جذب محلول حاصل در طول‌موج ۷۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. غلظت فنل بر اساس میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن‌تر ($mg\ GAE.g^{-1}$ FW) بیان شد و از گالیک اسید جهت رسم منحنی استاندارد استفاده گردید.

اندازه‌گیری میزان فلاونوئید:

از روش Pekal و همکاران (۲۳) برای اندازه‌گیری میزان فلاونوئید کل استفاده شد. در این روش میزان فلاونوئید با روش رنگ سنجی با استفاده از کلرید آلومینیوم صورت گرفت. میزان ۰/۰۵ گرم از برگ تازه گیاه با ۵ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد در هاون به‌خوبی ساییده شد. سپس عصاره حاصل در rpm ۸۰۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه سانترفیوژ شد و ۱ میلی‌لیتر از محلول رویی با ۴/۴ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق شد. سپس ۳۰۰ میکرولیتر $NaNO_2$ ۱۰ درصد، ۳۰۰ میکرولیتر $AlCl_3$ ۵ درصد و ۴ میلی‌لیتر NaOH ۱ نرمال به آن اضافه شد و شدت جذب محلول حاصل در طول‌موج ۵۱۰ نانومتر خوانده شد. برای محاسبه غلظت فلاونوئید از کوئرسیتین جهت رسم منحنی استاندارد استفاده شد. محتوای فلاونوئید کل برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر ($mg.g^{-1}$ FW) بیان شد.

اندازه‌گیری میزان آنتوسیانین:

برای اندازه‌گیری محتوای آنتوسیانین، ۰/۰۵ گرم از بافت تازه برگ گیاه در ۱۰ میلی‌لیتر متانول اسیدی (متانول: هیدروکلریک اسید) (۱: ۹۹)(v/v) درون هاون چینی ساییده شد. مخلوط حاصل به درون فالکن ریخته و برای ۲۴ ساعت در دمای اتاق در محیط تاریک قرار داده شد. سپس عصاره حاصل در rpm ۱۰۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد و جذب محلول رویی در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر قرائت شد. میزان آنتوسیانین با استفاده از ضریب خاموشی ε ($EC=33000\ m^{-1}\ cm^{-1}$) با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد (۲۴). در این رابطه A بیانگر میزان جذب، b عرض کووت و c غلظت محلول موردنظر می‌باشد.

$$A=\varepsilon bc$$

بررسی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی:

در ابتدا ۱/۵ میلی‌لیتر از محلول DPPH (۰/۲ میلی مولار) را به ۱/۵ میلی‌لیتر از عصاره گیاهی داخل فالکون اضافه نموده و سپس به کمک ورتکس کاملاً مخلوط شد. در ادامه نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

دمای اتاق و محیط تاریک انکوبه شدند و سپس جذب مخلوط حاصل در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر در یک بازه زمانی ۳۰ دقیقه‌ای قرائت گردید. درصد مهار رادیکال DPPH با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید و بر اساس IC50 بیان شد (۲۵).

$$(A0-A1/A0)\times100$$

در این معادله A0 جذب نمونه حاوی عصاره گیاهی و A1 جذب نمونه شاهد می‌باشد.

اندازه‌گیری میزان فعالیت پراکسیداز:

برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز ابتدا ۰/۱ گرم از بافت تازه گیاه در ۱ میلی‌لیتر از بافر فسفات ۲۰۰ میلی مولار حاوی EDTA یک میلی مولار، PVP ۲ درصد، DTT ۲ میلی مولار و گلیسرول ۱۰ در صد ساییده شد و سپس در ۱۳۰۰۰ rpm در مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول رویی به‌عنوان عصاره آنزیمی استفاده شد. محلول واکنش شامل ۹۰۰ میکرو لیتر فسفات بافر ۲۵ میلی مولار، گایاکول ۰/۰۵ درصد، هیدروژن پراکسید ۰/۱ میلی مولار، EDTA ۰.۱ میلی مولار و ۱۰۰ میکرو لیتر عصاره آنزیمی بود. افزایش در جذب با اکسیداسیون گایاکول در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر خوانده شد و با استفاده از ضریب خاموشی $EC=26.6mM^{-1}.cm^{-1}$ برحسب واحد بر میلی‌گرم پروتئین ($U.mg^{-1}$ protein) محاسبه گردید.

آنالیز آماری:

کلیه آزمایش‌ها برای هر تیمار در سه تکرار در نظر گرفته شد. در هریک از تکرارها ۳ گیاه درون شیشه کشت و به‌صورت طرح کاملاً تصادفی مورد آزمایش قرار گرفت. میانگین داده‌های به‌دست‌آمده حاصل از سنجش شاخص‌ها با تجزیه واریانس با استفاده از آزمون Duncan ($P\leq0.05$) در نرم‌افزار SPSS مورد مقایسه و تحلیل آماری قرار گرفت و نمودارها به‌وسیله‌ی نرم‌افزار Excel رسم شد.

نتایج:

تأثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر وزن‌تر و خشک اندام هوایی و ریشه:

همان‌گونه که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود داده‌های حاصل از وزن‌تر و خشک اندام هوایی و ریشه تحت تیمار هورمون سالیسیلیک اسید الگوی یکسانی را نشان دادند. به‌گونه‌ای که در غلظت‌های ۰/۱ ، ۱ و ۱۰ میکرومولار وزن‌تر و خشک گیاه افزایش معنی‌داری را نشان داد و در ادامه با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید میزان این پارامترها روندی کاهشی در مقایسه با نمونه شاهد نشان دادند. بر اساس نتایج بالاترین میزان وزن‌تر و خشک اندام هوایی در غلظت ۱۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید به دست آمد. به‌گونه‌ای که در این غلظت از سالیسیلیک اسید وزن خشک اندام هوایی و ریشه به ترتیب از ۰/۰۱۵، ۰/۰۱ گرم به ۰/۰۳۴ و ۰/۰۲۳ گرم رسید. بااین‌حال غلظت ۱۰۰ میکرومولار تفاوت معنی‌داری را نسبت به نمونه شاهد نشان نداد.

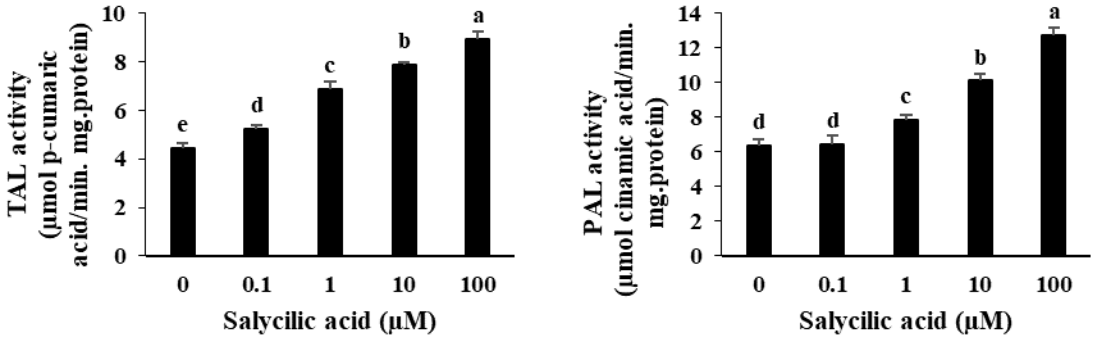
جدول ۱: اثر سالیسیلیک اسید بر وزن‌تر (FW) و خشک اندام (DW) هوایی و ریشه گیاه سیب‌زمینی. داده‌ها میانگین سه تکرار ± انحراف معیار می‌باشد. حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشد.

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

Treatment	Levels (µM)	Shoot FW (g)	Shoot DW (g)	Root FW (g)	Root DW (g)
Salicylic acid	0	0.178±0.02^{d}	0.015±0.003^{d}	0.13±0.02^{c}	0.01±0.002^{c}
	0.1	0.226±0.005^{c}	0.02±0.005^{c}	0.193±0.006^{b}	0.016±0.002^{b}
	1	0.278±0.014^{b}	0.023±0.005^{b}	0.233±0.008^{a}	0.019±0.001^{b}
	10	0.344±0.01^{a}	0.034±0.002^{a}	0.26±0.01^{a}	0.023±0.002^{a}
	100	0.171±0.007^{d}	0.014±0.003^{d}	0.11±0.02^{c}	0.01±0.001^{c}

تأثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر فعالیت آنزیم PAL و TAL:

طبق نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۱ میزان فعالیت آنزیم‌هاآنزیم‌های PAL و TAL تحت تیمار سالیسیلیک اسید تفاوت معنی‌داری را نسبت به نمونه شاهد نشان دادند. در این مطالعه با افزایش غلظت هورمون سالیسیلیک اسید میزان فعالیت آنزیم‌ها نیز با یک روند تدریجی افزایش نشان داد به‌طوری‌که بالاترین میزان فعالیت آنزیم‌ها در غلظت ۱۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید به دست آمد. بااین‌حال میزان فعالیت آنزیم‌ها در غلظت ۰/۱ تفاوت معنی‌داری را با نمونه شاهد نشان ندادند.



شکل ۱: اثر سالیسیلیک اسید بر میزان فعالیت آنزیم‌های PAL و TAL در گیاهچه های سیب‌زمینی: حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشد.

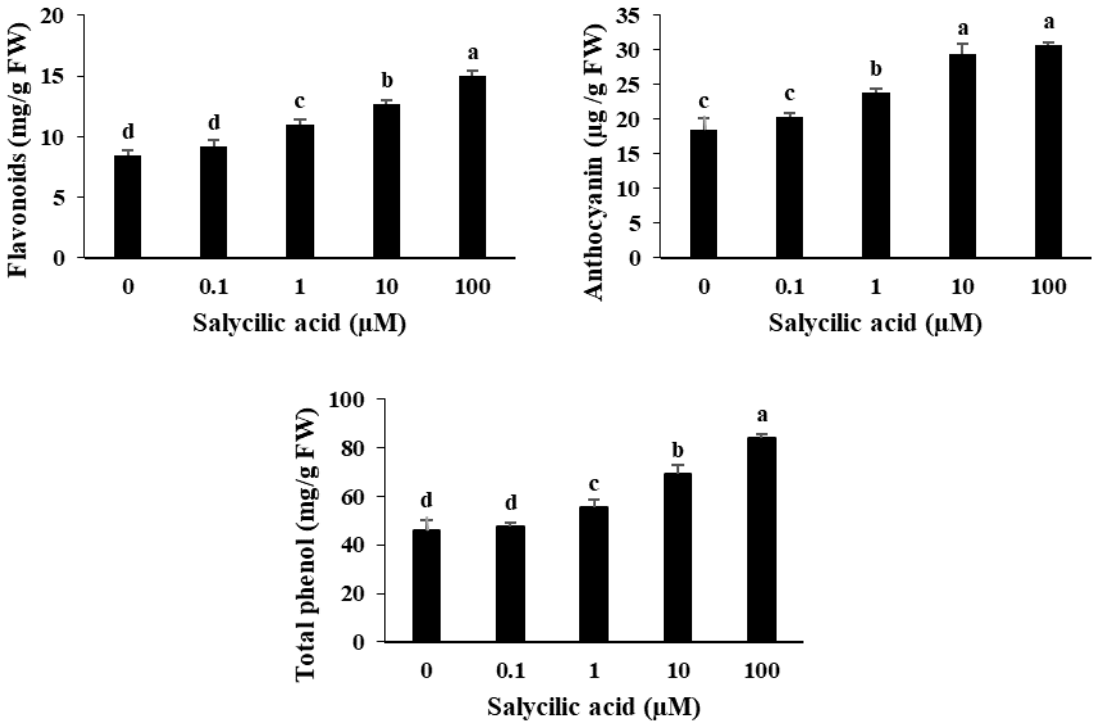
تأثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر محتوای فنل کل، فلاونوئید و آنتوسیانین:

بر اساس نتایج، مشاهده شد که تیمار سالیسیلیک اسید توانست میزان محتوای ترکیبات فنل کل، فلاونوئید و آنتوسیانین را در مقایسه با نمونه شاهد بهبود دهد (شکل ۲). بر این اساس با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید میزان این متابولیت های ثانویه با یک الگوی مشابه به هم افزایش معنی‌داری را نسبت

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

به نمونه شاهد نشان دادند. به‌گونه‌ای بالاترین میزان فنل کل، فلاونوئید و آنتوسیانین در غلظت ۱۰۰ میکرومولار به ترتیب با ۸۳، ۷۷ و ۶۵ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد. هرچند در غلظت ۰/۱ میکرومولار سالیسیلیک اسید میزان این ترکیبات در مقایسه با نمونه شاهد تغییری مشاهده نشد

.

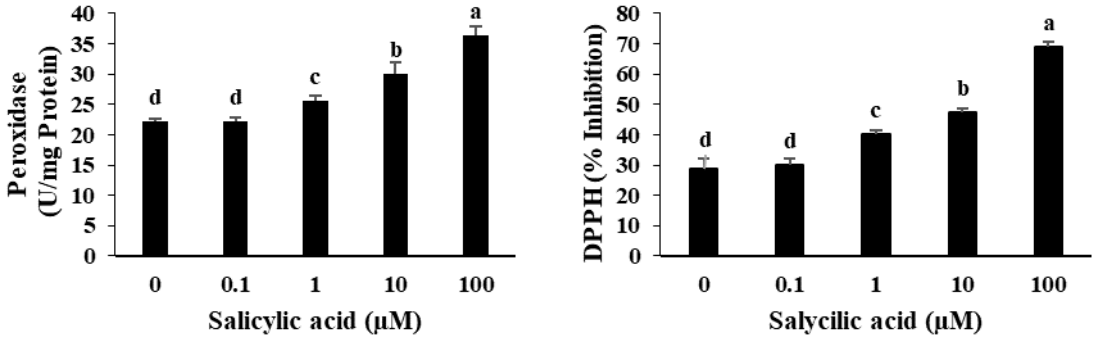


شکل ۲: اثر سالیسیلیک اسید بر میزان فنل کل، فلاونوئید و آنتوسیانین گیاه سیب‌زمینی. حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشد.

تأثیر تیمار سالیسیلیک اسید بر فعالیت آنزیم پراکسیداز و DPPH:

داده‌های حاصل از این مطالعه در شکل ۳، نشان داد میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز و درصد مهار رادیکال DPPH با افزایش میزان سالیسیلک اسید گسترش یافت. به‌گونه‌ای که بالاترین میزان فعالیت آنزیم در غلظت ۱۰۰ میکرومولار با ۶۳ درصد افزایش و بیشترین میزان مهار رادیکال DPPH با ۱۳۴ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد. غلظت ۰/۱ میکرومولار سالیسیلیک اسید نیز نتوانست فعالیت آنزیم پراکسیداز و درصد مهار رادیکال DPPH را در مقایسه با نمونه شاهد تغییر دهد.

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355



شکل ۳: اثر سالیسیلیک اسید بر فعالیت آنزیم پراکسیداز و درصد مهار رادیکال DPPH گیاه سیب‌زمینی. حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشد.

بحث:

رشد گیاه یکی از پارامترهایی می‌باشد که می‌تواند در جهت تحلیل چگونگی پاسخ و عکس‌العمل گیاه در مقابل تیمار و یا شرایط محیطی مورداستفاده قرار گیرد. در این مطالعه اندازه‌گیری وزن‌تر و خشک گیاه منظور به مطالعه رشد عمومی گیاه موردسنجش قرار گرفت. در این مطالعه مشاهده شد که وزن‌تر و خشک گیاه سیب‌زمینی در غلظت‌های پائین سالیسیلیک اسید افزایش معنی‌داری را نسبت به نمونه شاهد نشان دادند و بالاترین مقدار وزن‌تر و خشک گیاه در تیمار ۱۰ میکرومولار مشاهده گردید. این تغییرات در میزان وزن‌تر و خشک اندام هوایی و ریشه می‌تواند به دلیل نقش مثبت القایی سالیسیلیک اسید در غلظت‌های پایین و بهینه به‌عنوان یک هورمون رشدی باشد (۲۶). علاوه بر این، بهبود رشد گیاه در غلظت‌های بهینه می‌تواند به دلیل تجمع متابولیت های اولیه همچون پروتئین و کربوهیدرات به‌عنوان ترکیبات اصلی تشکیل‌دهنده‌ی اسکلت سلولی گیاه و همچنین نقش این هورمون در افزایش تقسیم سلولی و طویل شدن سلول‌ها باشد که درنهایت می‌تواند منجر به افزایش رشد گیاه گردد (۲۷, ۲۸). تحقیقات قبلی نیز نقش سالیسیلیک اسید را به‌عنوان هورمون رشدی در غلظت‌های پائین در بهبود میزان وزن‌تر و خشک گیاه گندم (۲۹)، اسفناج (۳۰) و گوجه‌فرنگی (۳۱) نشان داده است. بااین‌حال، وزن‌تر و خشک گیاه در غلظت‌های ۱۰۰ میکرومولار کاهش معنی‌داری را نسبت به نمونه شاهد نشان داد. با توجه به وابستگی هورمون سالیسیلیک اسید به غلظت مورداستفاده و اثرات مهاری این هورمون در غلظت‌های بالا، می‌توان پیشنهاد نمود که کاهش در وزن گیاه در غلظت‌های بالای سالیسیلیک اسید می‌تواند به دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن در مقادیر بالا و القا تنش اکسیداتیو در گیاه و درنهایت اثرات منفی بر رشد گیاه باشد (۲۶).

با توجه به نقش متابولیت های ثانویه به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدانت قوی، این ترکیبات می‌توانند در حذف گونه‌های فعال اکسیژن در پاسخ به تنش‌های زیستی و غیر زیستی در گیاه تجمع یابند (۳۲). همچنین گزارش شده است که این ترکیبات می‌توانند با القای ظرفیت سیستم آنتی‌اکسیدانی در پاسخ به گونه‌های فعال اکسیژن و تنش‌های اکسیداتیو ناشی از آن مقابله نمایند (۳۳). در این مطالعه متابولیت های ثانویه همچون فنل کل،

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

فلاونوئید و آنتوسیانین با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید گسترش یافت. سالیسیلیک اسید می‌تواند با تولید گونه‌های فعال اکسیژن به‌عنوان یک مولکول مؤثر در پیام‌رسانی، رشد گیاه و القای متابولیت های اولیه و ثانویه را در گیاه کنترل نماید (۷). مطالعات متعددی نشان داده است که کاربرد خارجی هورمون سالیسیلیک اسید می‌تواند میزان ترکیبات فنلی (۳۳, ۳۴)، فلاونوئید ها (۳۵, ۳۶) و آنتوسیانین (۱۵, ۱۶) را در گیاهان مختلف بهبود دهد. بنابراین از سویی افزایش متابولیت های ثانویه همچون فنل ها و فلاونوئید ها در گیاهان تیمار شده با سالیسیلیک اسید می‌تواند به علت نقش آنتی‌اکسیدانی این ترکیبات بمنظور حذف گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده به‌واسطه‌ی سالیسیلیک اسید باشد (۳۲). از سوی دیگر این افزایش در میزان متابولیت های ثانویه می‌تواند به دلیل اثرات مستقیم هورمون سالیسیلیک اسید بر متابولیسم و آنزیم‌های دخیل در بیوسنتز و متابولیسم متابولیت های ثانویه باشد. اولین گام ضروری برای سنتز متابولیت های ثانویه دآمیناسیون فنیل آلانین و تبدیل به سینامیک اسید به کمک آنزیم فنیل آلانین آمونولیاز و همچنین تبدیل تیروزین به کوماریک اسید به‌وسیله آنزیم تیروزین آمونیالیاز می‌باشد (۱۸). بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه میزان فعالیت این دو آنزیم تحت تیمار هورمون سالیسیلیک اسید افزایش معنی‌داری را نسبت به نمونه شاهد نشان داد. آنزیم‌های PAL و TAL آنزیم‌های کلیدی سنتز متابولیت های ثانویه می‌باشند که به‌وسیله عوامل مختلفی همچون زخم، عوامل پاتوژنی، تنش‌های زیستی و غیر زیستی و همچنین هورمون‌های رشدی همچون سالیسیلیک اسید القا می‌شوند (۳۷). به‌گونه‌ای که هر عامل استرس‌زا می‌تواند این دو آنزیم کلیدی را در گیاهان القا کند که درنهایت منجر به تجمع متابولیت های ثانویه در گیاه می‌گردد (۳۸). بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت که گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده توسط هورمون سالیسیلیک اسید بمنظور پیام‌رسانی توانسته است فعالیت این دو آنزیم را نیز را در مقایسه با نمونه شاهد افزایش دهد. علاوه بر این مشاهده شده است که فعالیت این دو آنزیم به مقدار زیاد به‌وسیله رونویسی و ترجمه القا می‌گردد (۳۹). با توجه به مطالعات قبلی که نشان داده‌اند سالیسیلیک اسید می‌تواند بیان mRNA آنزیم PAL را القا کنند (۳۷) می‌توان پیشنهاد نمود که افزایش در میزان فعالیت این دو آنزیم احتمالاً به دلیل اثر القایی سالیسیلیک اسید بر رونویسی و بیان ژن‌های دخیل در این آنزیم‌ها می‌باشد.

افزایش در ظرفیت آنتی‌اکسیدانی یکی از پاسخ‌های مؤثر و کلیدی گیاه به تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و تنش اکسیداتیو ناسی از آن می‌باشد. بمنظور ارزیابی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی از درصد مهار رادیکال DPPH استفاده می‌گردد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تیمار سالیسیلیک اسید موجب تغییر درصد مهار رادیکال DPPH شده و با افزایش غلظت این هورمون میزان درصد مهار افزایش نشان داده است. القاکنندگان همچون سالیسیلیک اسید در گیاهان از طریق تولید گونه‌های فعال اکسیژن متابولیسم گیاه، سنتز ترکیبات فنلی و مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی را فعال می‌کنند (۴۰). با توجه به نقش آنتی‌اکسیدانی متابولیت های ثانویه، می‌توان گفت با افزایش میزان متابولیت های ثانویه میزان درصد مهار رادیکال DPPH افزایش می‌یابد و به‌عبارت‌دیگر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گسترش و بهبود می‌یابد (۴۱).

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

به‌طورکلی میان محتوای متابولیت های ثانویه همچون ترکیبات فنلی و فلاونوئید ها و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و همچنین درصد مهار DPPH همبستگی مثبتی وجود دارد (۴۲). این مطالعه نیز همبستگی مثبت ترکیبات فنلی را با فعالیت آنتی‌اکسیدانی نشان داد. مشابه با نتایج حاضر، مطالعات مختلفی نشان دادند سالیسیلیک اسید درصد مهار رادیکال DPPH را در گیاه *Ammi Visnaga* L. (۴۱)، اسطوخودوس (۴۳) و اسفناج (۳۳) افزایش داده است. بنابراین می‌توان بیان کرد افزایش در قدرت مهار رادیکال DPPH به دلیل افزایش ترکیبات فنلی با خاصیت آنتی‌اکسیدانی در اثر تیمار سالیسیلیک اسید می‌باشد.

آنزیم پراکسیداز یکی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کلیدی می‌باشد که با حذف گونه‌های فعال تولید شده در گیاهان و تبدیل هیدروژن پراکسید به آب و اکسیژن میزان تخریب سلولی را کاهش داده و از مهار رشدی جلوگیری می‌نماید. علاوه بر این آنزیم از طریق اکسیداسیون پیش ماده‌های فنلی در آخرین مرحله تشکیل لیگنین به‌عنوان یکی از ترکیبات فنلی نقش دارد (۴۴). در این مطالعه میزان فعالیت این آنزیم تحت تیمار سالیسیلیک اسید افزایش یافت. با توجه به نقش آنتی‌اکسیدانی آنزیم پراکسیداز می‌توان بیان کرد افزایش در فعالیت آنزیم می‌تواند در جهت حذف گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده به‌وسیله سالیسیلیک اسید باشد. در تائید نتایج حاضر مطالعات گذشته نیز نشان داده‌اند که آنزیم پراکسیداز در گیاه شنبلیله (۴۵) و گیاه گندم (۲۹) تحت تیمار سالیسیلیک اسید افزایش یافته است. علاوه بر این، بر اساس نتایج حاضر میان فعالیت آنزیم پراکسیداز و تولید متابولیت های ثانویه نیز همبستگی مثبتی مشاهده شد. با توجه به اینکه آنزیم پراکسیداز به‌عنوان یکی از آنزیم‌های دخیل در سنتز متابولیت های ثانویه ایفای نقش می‌کند، می‌توان چنین استنباط نمود که افزایش در میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز می‌تواند به دلیل نقش این آنزیم در تولید ترکیبات فنلی همچون لیگنین تحت تیمار سالیسیلیک اسید باشد.

نتیجه‌گیری کلی:

سالیسیلیک اسید با تولید گونه‌های فعال اکسیژن به‌عنوان مولکول دخیل در پیام‌رسانی به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشدی نقش خود را در بهبود رشد و متابولیسم گیاهان ایفا می‌کند. در این مطالعه سالیسیلیک اسید با اثرات مثبت القایی در غلظت‌های پائین و بهینه (۱۰ میکرومولار) توانست وزن‌تر و خشک گیاه سیب‌زمینی را به‌عنوان شاخص‌های رشدی بهبود بخشد. این هورمون احتمالاً از یک‌سو با تولید گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی میزان ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی و آنتوسیانین را افزایش داد. همچنین از سوی دیگر احتمالاً با اثرات مستقیم بر فعالیت آنزیم‌های PAL و TAL توانست میزان ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی را گسترش دهد. با توجه به نتایج حاصل این هورمون می‌تواند به‌عنوان القا دهنده و افزایش‌دهنده میزان رشد و سطوح ترکیبات بیوشیمیایی در گیاهان مورداستفاده قرار گیرد. علاوه بر این، با توجه به اینکه گیاهان به‌ویژه گیاهان دارویی به‌عنوان منابعی از ترکیبات بیوشیمیایی در جهت مصارف تجاری، صنعتی و دارویی محسوب می‌گردند، استفاده از این هورمون می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی کارآمد در جهت افزایش ترکیبات بیوشیمیایی و متابولیت های ثانویه همچون ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی معرفی گردد.

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

تضاد منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافعی ندارند.

سپاسگزاری:

نویسندگان این مقاله مراتب قدرانی خود را از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان بمنظور انجام این مطالعه ابراز می‌نماید.

فهرست منابع:

1. Jeyasri R, Muthuramalingam P, Karthick K, Shin H, Choi SH, Ramesh M., 2023. Methyl jasmonate and salicylic acid as powerful elicitors for enhancing the production of secondary metabolites in medicinal plants: an updated review. Plant Cell, Tissue Organ Culture, 53(3): 447-552.
2. Twaij BM, Hasan MN, 2022. Bioactive secondary metabolites from plant sources: types, synthesis, and their therapeutic uses. International Journal of Plant Biology, 13(1):4-14.
3. Miladinova-Georgieva K, Geneva M, Stancheva I, Petrova M, Sichanova M, Kirova E., 2022. Effects of different elicitors on micropropagation, biomass and secondary metabolite production of *Stevia rebaudiana*—A review. Plants, 12(1):153-168.
4. Jan R, Asaf S, Numan M, Lubna, Kim K-M., 2021. Plant secondary metabolite biosynthesis and transcriptional regulation in response to biotic and abiotic stress conditions. Agronomy, 11(5):968-977.
5. Ali B, 2021. Salicylic acid: An efficient elicitor of secondary metabolite production in plants. Biocatalysis Agricultural Biotechnology, 31:101-184.
6. Saleem M, Fariduddin Q, Castroverde CDM., 2021. Salicylic acid: A key regulator of redox signalling and plant immunity. Plant Physiology Biochemistry, 168:381-397.
7. Farooq MA, Niazi AK, Akhtar J, Farooq M, Souri Z, Karimi N, et al., 2019. Acquiring control: The evolution of ROS-Induced oxidative stress and redox signaling pathways in plant stress responses. Plant Physiology Biochemistry, 141:353-369.
8. Nazar R, Iqbal N, Umar S, 2017. Heat stress tolerance in plants: action of salicylic acid. Salicylic acid: a multifaceted hormone. Springer. Sangapore. pp 145-161.
9. Pál M, Janda T, Majláth I, Szalai G., 2020. Involvement of salicylic acid and other phenolic compounds in light-dependent cold acclimation in maize. International journal of molecular sciences, 21(6):1942-1955.
10. Singh S., 2023. Salicylic acid elicitation improves antioxidant activity of spinach leaves by increasing phenolic content and

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

enzyme levels. Food Chemistry Advances, 2:100-156.
11. Gomes EP, Borges CV, Monteiro GC, Belin MAF, Minatel IO, Junior AP, et al.,2021. Preharvest salicylic acid treatments improve phenolic compounds and biogenic amines in '*Niagara Rosada*'table grape. Postharvest Biology Technology, 176:111-505.
12. Preciado-Rangel P, Reyes-Pérez JJ, Ramírez-Rodríguez SC, Salas-Pérez L, Fortis-Hernández M, Murillo-Amador B, et al., 2019. Foliar aspersion of salicylic acid improves phenolic and flavonoid compounds, and also the fruit yield in cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plants, 8(2):44-55.
13. Rithichai P, Jirakiattikul Y, Nambuddee R, Itharat A., 2024. Effect of Salicylic Acid Foliar Application on Bioactive Compounds and Antioxidant Activity in Holy Basil (*Ocimum sanctum* L.). International Journal of Agronomy, 6: 142-157.
14. Li X, Zhang L, Ahammed GJ, Li Y-T, Wei J-P, Yan P ,et al., 2019. Salicylic acid acts upstream of nitric oxide in elevated carbon dioxide-induced flavonoid biosynthesis in tea plant *(Camellia sinensis* L.). Environmental Experimental Botany, 161:367-374.
15. Song X, Guo H, Liu Y, Wan F, Zhang J, Chang X., 2020. Effects of salicylic acid and sucrose on pigment content in Pistacia chinensis leaves. Scientia Horticulturae, 259:108-783.
16. Oraei M, Panahirad S, Zaare-Nahandi F, Gohari G., 2019. Pre-véraison treatment of salicylic acid to enhance anthocyanin content of grape (*Vitis vinifera* L.) berries. Journal of the Science of Food Agriculture, 99(13):5946-52.
17. Liu Y, Li M, Li T, Chen Y, Zhang L, Zhao G, et al., 2020. Airborne fungus-induced biosynthesis of anthocyanins in Arabidopsis thaliana via jasmonic acid and salicylic acid signaling. Plant science, 300:110-135.
18. Barros J, Dixon RA., 2020. Plant phenylalanine/tyrosine ammonia-lyases. Trends in plant science, 25(1):66-79.
19. Dogbo D, Gogbeu S, N'zue B, Ya K, Zohouri G, Mamyrbekova-Bekro J, et al., 2012. Comparative activities of phenylalanine ammonia-lyase and tyrosine ammonia-lyase and phenolic compounds accumulated in cassava elicited cell. African Crop Science Journal, 20(2):85-94.
20. Ghodsimaab SP, Ghasimi Hagh Z, Makarian H, Gholipoor M., 2023. Deciphering morphological and biochemical responses of *Salvia leriifolia* to seed cold plasma treatment, priming, and foliar spraying with nano-salicylic acid. Scientific Reports, 13(1):186-172.
21. Beaudoin-Eagan LD, Thorpe TA., 1985. Tyrosine and phenylalanine ammonia lyase activities during shoot initiation in tobacco callus

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

cultures. Plant Physiology, 78(3):438-441.
22. Singleton VL, Orthofer R, Lamuela-Raventos RM., 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods in enzymology, 299:152-178.
23. Pękal A, Pyrzynska K., 2014. Evaluation of aluminium complexation reaction for flavonoid content assay. Food Analytical Methods, 7(9):1776-1782.
24. Wagner GJ., 1979. Content and vacuole/extravacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplasts. Plant Physiology, 64(1):88-93.
25. Liyana-Pathirana CM, Shahidi F., 2005. Antioxidant activity of commercial soft and hard wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by gastric pH conditions. Journal of agricultural food chemistry, 53(7):2433-2440.
26. Li A, Sun X, Liu L., 2022. Action of salicylic acid on plant growth. Frontiers in Plant Science, 13:878-876.
27. Fujikura U, Ezaki K, Horiguchi G, Seo M, Kanno Y, Kamiya Y, et al., 2020. Suppression of class I compensated cell enlargement by mutation is mediated by salicylic acid signaling. PLoS Genetics, 16(6):e1008873.
28. Tsukaya H., 2019. Re-examination of the role of endoreduplication on cell-size control in leaves, Journal of plant research, 132(5):571-580.
29. Alam P, Balawi TA, Faizan M., 2022. Salicylic acid's impact on growth, photosynthesis, and antioxidant enzyme activity of *Triticum aestivum* when exposed to salt. Molecules, 28(1):100-128.
30. Seyedi A, Fathi S, Asl Mohammadi Z., 2023. Influence of exogenous salicylic acid on growth and biochemical parameters of *Spinacia oleracea* L. under salinity stress. Journal of plant process and function, 12(55):33-40.
31. Shaheen M, Ayyub C, Hussain R, Manan A, Mustafa Z, Sarwar M, et al., 2018. Salicylic acid improved the heat tolerance by enhancing growth, gas exchange attributes and chlorophyll contents of tomato. plant physiology, 25(2): 205-218.
32. Banik N, Bhattacharjee S., 2020. Complementation of ROS scavenging secondary metabolites with enzymatic antioxidant defense system augments redox-regulation property under salinity stress in rice, Physiology molecular biology of plants, 26(8): 1623-1633.
33. Singh S., 2023. Salicylic acid elicitation improves antioxidant activity of spinach leaves by increasing phenolic content and enzyme levels. Food Chemistry Advances, 2:100-156.
34. Linić I, Mlinarić S, Brkljačić L, Pavlović I, Smolko A, Salopek-Sondi B., 2021. Ferulic acid and salicylic acid foliar treatments

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

reduce short-term salt stress in chinese cabbage by increasing phenolic compounds accumulation and photosynthetic performance. Plants, 10(11):23-46.
35. Gai Q-Y, Jiao J, Wang X, Zang Y-P, Niu L-L, Fu Y-J., 2019. Elicitation of Isatis tinctoria L. hairy root cultures by salicylic acid and methyl jasmonate for the enhanced production of pharmacologically active alkaloids and flavonoids. Plant Cell, Tissue Organ Culture, 137:77-86.
36. Yamamoto R, Ma G, Zhang L, Hirai M, Yahata M, Yamawaki K, et al., 2020. Effects of salicylic acid and methyl jasmonate treatments on flavonoid and carotenoid accumulation in the juice sacs of *satsuma mandarin* in vitro. Applied Sciences. 10(24):89-96.
37. Wen P-F, Chen J-Y, Wan S-B, Kong W-F, Zhang P, Wang W, et al., 2008. Salicylic acid activates phenylalanine ammonia-lyase in grape berry in response to high temperature stress. Plant Growth Regulation, 55:1-10.
38. Ghamari M, Hosseininaveh V, Talebi K, Nozari J, Allahyari H., 2020. Biochemical characterization of the induced immune system of pistachio (*Pistacia vera*) by salicylic acid. International Journal of Fruit Science, 20(2):117-132.
39. Campos-Vargas R, Nonogaki H, Suslow T, Saltveit ME., 2005. Heat shock treatments delay the increase in wound-induced phenylalanine ammonia-lyase activity by altering its expression, not its induction in Romaine lettuce (*Lactuca sativa*) tissue. Physiologia Plantarum, 123(1):82-91.
40. Pastore C, Allegro G, Valentini G, Colucci E, Battista F, Filippetti I., 2019. Biochemical and molecular effects of yeast extract applications on anthocyanin accumulation in Sangiovese. Journal of plant interaction, 2:103-112.
41. Osama S, El Sherei M, Al-Mahdy DA, Bishr M, Salama O., 2019. Effect of salicylic acid foliar spraying on growth parameters, γ-pyrones, phenolic content and radical scavenging activity of drought stressed *Ammi visnaga* L. plant. Industrial Crops Products, 134:1-10.
42. Youssef SM, López-Orenes A, Ferrer MA, Calderón AA., 2022. Salicylic-acid-regulated antioxidant capacity contributes to growth improvement of okra (*Abelmoschus esculentus*). Agronomy, 12(1):168-179.
43. Skrypnik L, Golovin A, Savina T., 2022. Effect of salicylic acid on phenolic compounds, antioxidant and antihyperglycemic activity of Lamiaceae plants grown in a temperate climate. Frontiers in Bioscience, 14(1):3-16.
44. Moosa A, Sahi ST, Khan SA, Malik AU., 2019. Salicylic acid and jasmonic acid can suppress green and blue moulds of citrus fruit and induce the activity of

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

polyphenol oxidase and peroxidase. Folia Horticulturae, 31(1):195-204.

45. Choudhary S, Bhat TM, Alwutayd KM, Abd El-Moneim D, Naaz N., 2024. Salicylic acid enhances thermotolerance and antioxidant defense in *Trigonella foenum graecum* L. under heat stress. Heliyon, 10(6): 152-163.

مقاله پژوهشی، صفحات ۲۶۹-۲۸۴
DOI:10.22034/jpr.2025.8455.3355

Effect of salicylic acid on the activities of phenylammonialase (PAL), tyrosine ammonialase (TAL) and peroxidase (POD) on potato plant under in vitro culture

Mohammad sadegh maleki, Ali Akbar Ehsanpour*

Department of Plant and Animal Biology, University of Isfahan, Isfahan, iran.

*Corresponding Author Email: ehsanpou@sci.ui.ac.ir

Abstract:

Potato is one of the crop plants can be used as a model in biological studies. Salicylic acid, a stimulator, induces growth by producing reactive oxygen species. This hormone can increase the antioxidant capacity and accumulation of secondary metabolites such as phenols, flavonoids, anthocyanins and enzymes involved in their biosynthetic pathway. In this study, potato seedlings were grown in MS medium under concentrations of 0, 0.1, 1, 10, and 100 µM salicylic acid. This research showed that low concentrations of salicylic acid (0.1, 1 and 10 µM) increased the fresh and dry weight of the plants compared to the control samples. Additionally , the content of phenolic, flavonoid, and anthocyanin compounds increased with increasing concentration of salicylic acid. Furthermore, salicylic acid enhanced the activity of phenylammonialyase, tyrosine ammonialyase, peroxidase and antioxidant capacity, the highest results were observed at the concentration of 100 µM. Based on these results, it can be suggested that due to the inductive roles of salicylic acid, the growth indicators and some secondary metabolites in potato plants increased under in vitro conditions.

Key words: *In vitro* culture, Phenolic compounds, Potato, Reactive oxygen species, Salicylic acid