کاربرد توأم اسید آسکوربیک و پرولین: رویکردی نوین برای بهبود عملکرد و کیفیت پسته (*Pistacia vera* L.) رقم احمدآقایی

مریم محمدی[۱]، زهرا پاک کیش[۲] و سهیلا محمدرضا خانی[۳*]

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

افزایش کمی و کیفی محصولات باغی، نیازمند رویکردهای فیزیولوژیک نوین و بهره‌گیری از ترکیباتی است که بتوانند رشد رویشی و زایشی را بهینه سازند. پرولین و اسید آسکوربیک به‌عنوان دو ترکیب کلیدی با نقش‌های اسمولیتی و آنتی‌اکسیدانی، ظرفیت بالایی در بهبود شاخص‌های رشدی و کیفی درختان پسته دارند. به‌منظور بررسی کارایی این ترکیبات، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار بر روی پسته رقم احمدآقایی انجام شد. تیمارها شامل پرولین (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار)، اسید آسکوربیک (۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، ترکیب پرولین + اسید آسکوربیک در دو سطح، و شاهد بودند. محلول‌پاشی در دو مرحله (۶۰ و ۷۵ روز پس از تمام گل) صورت گرفت و صفاتی نظیر سطح برگ، شاخص کلروفیل، درصد پوکی، خندانی، ناخندانی، بدشکلی، وزن خشک میوه، انس میوه و عملکرد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که کاربرد همزمان پرولین و اسید آسکوربیک اثر هم‌افزایی چشمگیری در تمامی شاخص‌ها ایجاد کرد. تیمار پرولین ۱ میلی‌مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در زمان ۶۰ روز پس از تمام گل، بیشترین بهبود را در سطح برگ (بیش از ۶۶٪)، شاخص کلروفیل (تا ۴۹٪)، وزن خشک میوه (بیش از ۴۲٪) و عملکرد (۷۱٪) نسبت به شاهد داشت و به‌طور معنی‌داری درصد پوکی، ناخندانی و بدشکلی میوه را کاهش داد (بیش از ۷۰٪ کاهش نسبت به شاهد). در حالی‌که تیمارهای منفرد نیز بهبود نسبی در برخی ویژگی‌ها ایجاد کردند، اثر اصلی و پایدار در ترکیب همزمان این دو ماده ظاهر شد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده توأم پرولین و اسید آسکوربیک، به‌ویژه در مراحل حساس پس از تمام گل، یک راهبرد فیزیولوژیک مؤثر برای بهبود شاخص‌های رشد، ارتقای کیفیت و افزایش بازارپسندی پسته رقم احمدآقایی است. این یافته‌ها مسیر جدیدی در مدیریت تغذیه‌ای و فیزیولوژیک باغ‌های پسته فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: پسته، عملکرد، اسید آسکوربیک، پرولین.

۱ بخش مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنرکرمان، کرمان، ایران
۲ بخش مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنرکرمان، کرمان، ایران
۳ محقق، بخش زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، جیرفت، ایران
* نویسنده مسئول: smohammadrezakhani@yahoo.com

مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.)، گونه‌ای نیمه‌گرمسیری از خانواده Anacardiaceae، دارای ویژگی‌های قابل توجهی در سازگاری با شرایط نامساعد محیطی است (پناهی و همکاران، ۱۳۹۴). این گونه در ایران اهمیت اقتصادی بالایی دارد و حدود ۲/۵۷ درصد از کل سطح باغ‌های میوه‌های خشک، اعم از بارور و غیر بارور، را به خود اختصاص داده است (آمارنامه کشاورزی، ۱۴۰۳).

ویتامین‌ها و اسیدهای آمینه، همانند سایر ترکیبات تنظیم‌کننده رشد و پلی‌آمین‌ها، نقش کلیدی در فرآیندهای متابولیکی و فیزیولوژیکی گیاهان دارند. این ترکیبات می‌توانند از طریق خیساندن بذرها، خیس کردن قلمه‌ها، محلول‌پاشی برگی یا افزودن به محیط خاک و آب آبیاری در اختیار گیاه قرار گیرند (Abd-Elazi *et al*., 2012).

اسید آسکوربیک به عنوان قوی‌ترین آنتی‌اکسیدان محلول در آب، نقش کلیدی در متابولیسم گیاهان ایفا می‌کند. این ترکیب هم به عنوان آنزیم و هم به عنوان کوفاکتور عمل کرده، سنتز RNA و پروتئین‌ها را افزایش می‌دهد و فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی و سنتز هورمون‌ها را تقویت می‌کند (Hendawy & Ezz ELDin, 2020؛ شاکر حسینی و آزاد بخت، ۱۳۹۹). ; همچنین، اسید آسکوربیک با افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و کاهش تخریب کلروفیل، پیر شدن ناشی از استرس اکسیداتیو را کاهش می‌دهد (Sahraei *et al*., 2023). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کاربرد اسید آسکوربیک به همراه پرولین روی گیاه گوجه فرنگی و گیاهان تحت تنش می‌تواند اثرات تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری را کاهش داده و عملکرد و کیفیت محصول را بهبود بخشد (Nirmal *et al*., 2025; Kaur & Gupta, 2023; Akram *et al*., 2017). ؛ تحقیقات انجام شده با استفاده از اسید آسکوربیک سبب افزایش رشد و نمو قابل ملاحظه‌ای در گیاهان یونجه (Chen *et al*., 2021)، گندم (Horchani *et al*., 2024; Iftikhar *et al*., 2025)، فلفل دلمه‌ای (El-Beltagi *et al*., 2022)، بادام زمینی (Chen *et al*., 2023)، نخود (Kanwal *et al*, 2024) و گیاهان مختلف دیگر (Johnson et al., 2024) شد (Chen *et al*., 2021)و گندم (Horchani *et al*., 2024 ؛ Iftikhar *et al*., 2025) و فلفل دلمه ای (El-Beltagi *et al*., 2022) بادام زمینی (Chen et al., 2023)، نخود؛2024) (Kanwal *et al*.,) و گیاهان مختلف دیگر (Johnson *et al*., 2024).

پرولین، اسید آمینه‌ای پروتئینوژنیک و چندمنظوره، در پاسخ گیاهان به تنش‌های محیطی نقش حیاتی دارد. این ترکیب با تنظیم تعادل اسمزی، حفاظت از ساختار پروتئین‌ها و غشاهای سلولی، کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و تأمین منابع نیتروژن و کربن، رشد و ترمیم سلول‌ها را تسهیل می‌کند (Alvarez *et al*., 2022; Abdelaal *et al*., 2020; Ben Rejeb *et al*., 2014;

Szabados & Savouré, 2010). مسیرهای بیوسنتزی پرولین، شامل آنزیم‌های P5CS و Ornithine-δ-aminotransferase، به دقت تنظیم شده و پاسخ‌های اختصاصی به تنش‌های محیطی و مراحل توسعه‌ای گیاهان ارائه می‌دهند (Székely *et al*., 2008; Fichman *et al*., 2015; Leisinger, 2013; Trovato *et al*., 2008; Sekhar *et al*., 2007; Armengaud *et al*., 2004; Ábrahám *et al*., 2003; Roosens *et al*., 1998; Zhang *et al*., 2014; Verbruggen & Hermans, 2008).

تجمع پرولین در اندام‌های رویشی، به‌ویژه برگ و ریشه، تحت شرایط تنش‌های محیطی نقشی کلیدی در حفظ تعادل اسمزی، تثبیت ساختارهای سلولی و خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد ایفا می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش سطح پرولین با کاهش رطوبت نسبی برگ و خاک رابطه‌ای مستقیم دارد و به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم سازگاری گیاهان به تنش خشکی معرفی شده است (راهداری و همکاران، ۱۳۹۷؛ Shahid *et al*., 2022). گیاهان تحت تنش خشکی، علاوه بر نقش فیزیولوژیک، مصرف برون‌زاد پرولین به‌طور قابل توجهی کیفیت و بازارپسندی میوه را نیز ارتقا می‌دهد. به‌عنوان نمونه، تیمار پرولین موجب بهبود رنگ‌گیری آریل و پوست در انار رقم Wonderful (Farag & Shehata, 2023) و همچنین افزایش پایداری رنگ و ویژگی‌های کیفی در انار رقم Taifi تحت آبیاری محدود شده است (Okba *et al*., 2022). در هلو نیز کاربرد پرولین تحت تنش گرما باعث افزایش مقاومت میوه و بهبود ویژگی‌های کیفی گردیده است (Shehata & Farag, 2024). اثرات مشابهی در مرکبات (Caronia *et al*., 2009) و گلابی ژاپنی (Takeuchi *et al*., 2008) گزارش شده است. همچنین، هم‌افزایی پرولین و اسید آسکوربیک در بهبود عملکرد فیزیولوژیک و کیفیت میوه در انار و زیتون مورد تأیید قرار گرفته است (El Sayed *et al*., 2014a,b). یافته‌های اخیر نیز تأکید می‌کنند که پرولین به‌عنوان یک تنظم کننده مؤثر، توانایی ارتقای کیفیت و مقاومت میوه‌ها را در برابر تنش‌های محیطی دارد (Shehata, 2025).

با توجه به اهمیت ارتقای رشد رویشی و زایشی و بهبود ویژگی‌های کیفی و عملکرد در درختان پسته (*Pistacia vera* L.) رقم احمدآقایی، این پژوهش با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی اسید آسکوربیک (۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و پرولین (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) به‌صورت منفرد و ترکیبی در دو مرحله کلیدی رشد میوه (۶۰ و ۷۵ روز پس از تمام گل) طراحی و اجرا گردید. هدف اصلی این مطالعه، تبیین نقش هم‌افزایی احتمالی پرولین و اسید آسکوربیک به‌عنوان ترکیبات آنتی‌اکسیدانی در بهبود صفات فیزیولوژیک (سطح برگ، شاخص کلروفیل) و شاخص‌های کمی و کیفی میوه (وزن میوه، درصد پوکی، درصد خندانی، درصد میوه‌های بدشکل و عملکرد نهایی) بود. انتظار می رود که نتایج حاصل، نه‌تنها بینش دقیق‌تری از پاسخ پسته

به این تنظیم کننده‌ها فراهم آورد، بلکه راهکارهای عملی برای افزایش کیفیت و بازارپسندی پسته در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال‌های ۱۴۰۰–۱۴۰۱ در یک باغ تجاری واقع در حومه شهرستان زرند، در فاصله ۷۰ کیلومتری مرکز استان کرمان، روی درختان ۱۵ ساله پسته رقم احمدآقایی اجرا شد. درختان مورد مطالعه در سال پربار قرار داشتند و خاک باغ شنی-لومی بود. آبیاری هر ۱۰ روز یکبار انجام شد و درختان از نظر قدرت رشد و اندازه یکنواخت انتخاب شدند تا خطای آزمایشی به حداقل برسد.

معرفی تیمارها

تیمارها شامل محلول‌پاشی اسید آسکوربیک (Ascorbic acid, Sigma-Aldrich, Germany) با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و پرولین (L-Proline, Merck, Germany) در غلظت‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بودند. همچنین دو تیمار ترکیبی شامل اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر + پرولین ۰/۵ میلی‌مولار و اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر + پرولین ۱ میلی‌مولار اعمال شدند. درختانی که هیچ‌یک از تیمارها روی آن‌ها اعمال نشد به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. برای کاهش خطا و افزایش دقت، درختانی با قدرت رشد و اندازه یکنواخت انتخاب شدند. محلول‌پاشی‌ها در دو مرحله انجام گرفت: مرحله اول در زمان رشد سریع میوه (۱۵ اردیبهشت؛ ۶۰ روز پس از تمام گل) و مرحله دوم در آغاز پر شدن دانه (اول خرداد؛ ۷۵ روز پس از تمام گل).

صفات اندازه‌گیری‌شده

سطح برگ: از هر تکرار و در هر تیمار، ۱۰ برگ از قسمت میانی تاج درخت به‌صورت تصادفی برداشت شد. سطح برگ‌ها توسط دستگاه سطح‌سنج دیجیتال (Leaf Area Meter, Model LI-3100C, LI-COR Biosciences, USA) اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها محاسبه گردید.

شاخص کلروفیل: از هر تکرار و تیمار، ۱۰ برگ مشابه با روش فوق انتخاب و میزان شاخص کلروفیل با دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD-502 Plus, Konica Minolta, Japan) سنجیده و میانگین نتایج گزارش شد.

درصد خندانی: در زمان برداشت، از هر تکرار ۴ خوشه انتخاب و تعداد ۱۰۰ عدد میوه به‌طور تصادفی جمع‌آوری شد. پس از جداسازی پوست سبز، تعداد میوه‌هایی که شکاف طبیعی داشتند شمارش و درصد خندانی محاسبه شد.

درصد پوکی: مشابه روش تعیین خندانی، از میان ۱۰۰ عدد میوه انتخابی، تعداد میوه‌های فاقد مغز شمارش و درصد پوکی محاسبه گردید.

درصد میوه‌های بدشکل: از ۱۰۰ میوه انتخابی در هر تکرار، تعداد میوه‌های دارای شکل غیرطبیعی شمارش و درصد میوه‌های بدشکل گزارش شد.

وزن میوه: در زمان برداشت، از هر تیمار ۱۰۰ میوه با پوست از شاخه‌های شمالی و ۱۰۰ میوه از شاخه‌های جنوبی به‌صورت تصادفی جمع‌آوری گردید. وزن تر میوه‌ها با ترازوی دیجیتال (Sartorius, Model CPA225D, Germany) با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری و میانگین وزن میوه گزارش شد.

عملکرد: در زمان برداشت، تمامی میوه‌های هر درخت جمع‌آوری و وزن تر آن‌ها با ت ترازوی دیجیتال (Sartorius, Model CPA225D, Germany) با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. عملکرد نهایی بر حسب گرم بر شاخه ثبت گردید.

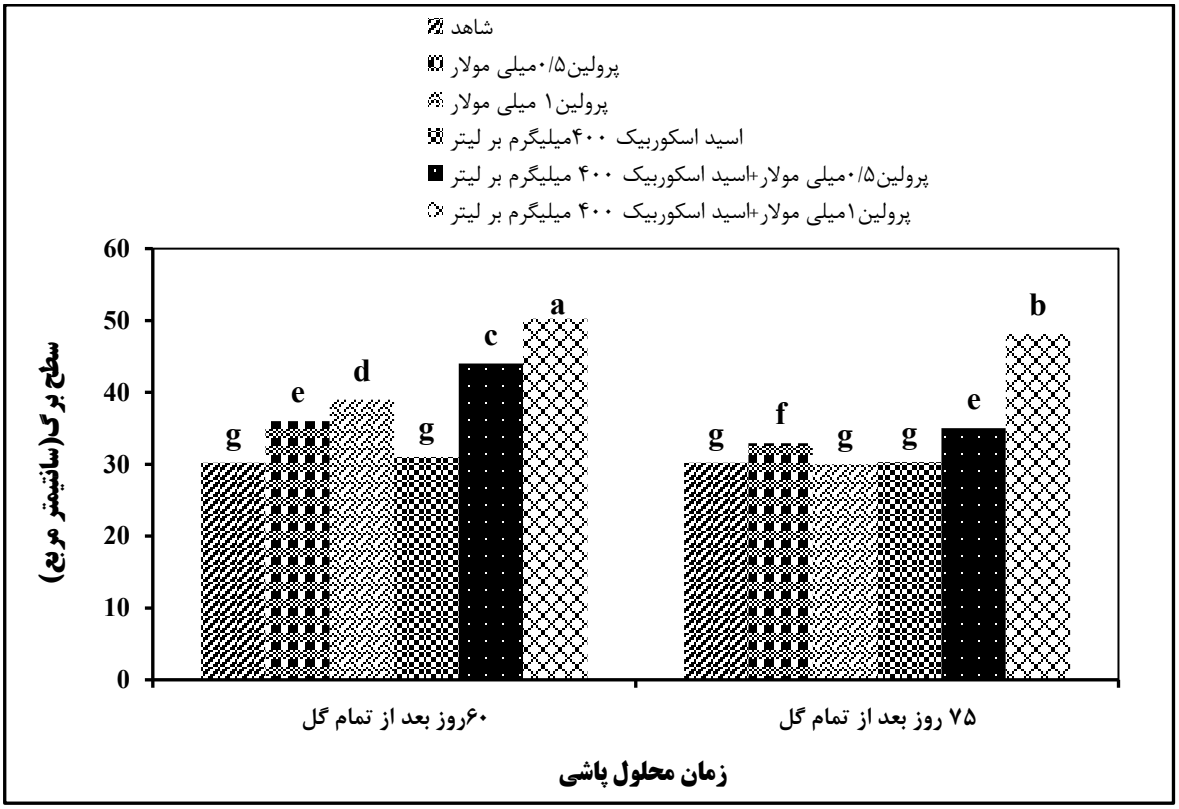
تجزیه و تحلیل آماری

طرح آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تیمار و چهار تکرار در دو زمان متفاوت اجرا گردید. داده‌های به‌دست‌آمده ، با استفاده از نرم‌افزار SAS (Version 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. مقایسه میانگین تیمارها از طریق آزمون چنددامنه‌ای دانکن (Duncan's Multiple Range Test, DMRT) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای بررسی دقیق اثرات متقابل، از نرم‌افزار MSTATC استفاده گردید. همچنین، به‌منظور ترسیم نمودارها و ارائه گرافیکی نتایج، نرم‌افزار Microsoft Excel به کار گرفته شد.

نتایج

بر اساس نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر، تحلیل داده‌های سطح برگ نشان داد که تیمارهای آزمایشی اثرات متفاوت و معنی‌داری بر رشد رویشی گیاه داشتند (آزمون دانکن، $p \leq 0.05$). تیمار شاهد با میانگین سطح برگ ۳۰/۲۱ سانتیمتر مربع در هر دو زمان اندازه‌گیری، کمترین مقدار را به خود اختصاص داد و به‌عنوان پایه مقایسه در نظر گرفته شد. پرولین ۰/۵ میلی‌مولار در ۶۰ روز بعد از تمام گل، سطح برگ را ۱۹/۲٪، نسبت به تیمار شاهد افزایش داد، اما این افزایش در ۷۵ روز تنها ۸٪/۹ بود. بر اساس آزمون دانکن، این افزایش در ۶۰ روز معنی‌دار بود اما در ۷۵ روز با کاهش اثر، تفاوت آن با شاهد در سطح پنج درصد غیرمعنی‌دار شد. پرولین ۱ میلی‌مولار در ۶۰ روز بیشترین افزایش سطح برگ در بین تیمارهای منفرد را داشت (۲۹٪/۱) بیشتر از شاهد، اما در ۷۵ روز اثر آن افت کرده و حتی در مقایسه با تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری نشان نداد. این بیانگر آن است که غلظت بالاتر پرولین، اگرچه در کوتاه‌مدت رشد برگ را تحریک می‌کند، اما پایداری اثر آن کمتر است. اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌تنهایی اثری اندک بر سطح برگ داشت (افزایش ۲/۶٪ در ۶۰ روز و ۰٪/۳ در ۷۵ روز نسبت به تیمار شاهد) و در سطح پنج درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن، این تغییرات

غیرمعنی‌دار بودند، که نشان داد اثر آسکوربیک اسید به‌تنهایی محدود بوده و نقش اصلی آن در هم‌افزایی با پرولین ظاهر می‌شود. ترکیب پرولین ۰/۵ میلی مولار +اسید آسکوربیک۴۰۰ میلی گرم بر لیتر، به‌طور معنی‌داری سطح برگ را افزایش داد (بیش از ۴۵/۶٪) در ۶۰ روز و ۱۵/۸٪ در ۷۵ روز. نتایج نشان داد که این تیمار در هر دو زمان نسبت به شاهد در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار داشت. ترکیب پرولین ۰/۵ میلی مولار + اسید آسکوربیک۴۰۰ میلی گرم بر لیتر، بیشترین تأثیر را در کل تیمارها نشان داد؛ سطح برگ در ۶۰ روز ۶۶/۳٪ و در ۷۵ روز ۵۹/۳٪، بیشتر ازتیمار شاهد بود. این افزایش در هر دو زمان در سطح پنج درصد کاملاً معنی‌دار گزارش شد و نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی بسیار قوی پرولین و اسید آسکوربیک در تحریک تقسیم سلولی، توسعه فتوسنتزی و پایداری برگ‌ها بود. پرولین به‌ویژه در ترکیب با اسید آسکوربیک، نقش کلیدی در افزایش سطح برگ داشت و باعث ارتقای ظرفیت فتوسنتزی و پتانسیل عملکرد شد. بیشترین و پایدارترین اثر مربوط به تیمار پرولین ۰/۵ میلی مولار + اسید آسکوربیک۴۰۰ میلی گرم بر لیتر بود که در هر دو زمان تفاوت معنی‌دار با شاهد و سایر تیمارها نشان داد. در مقابل، اسید آسکوربیک به‌تنهایی تفاوت معنی‌داری نداشت، اما حضور آن در ترکیب با پرولین باعث بروز اثر هم‌افزایی قوی شد. بنابراین، استفاده توأم پرولین و آسکوربیک اسید می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد فیزیولوژیک کارآمد برای بهبود شاخص‌های رشد و کیفیت در پسته پیشنهاد گردد (شکل ۱).



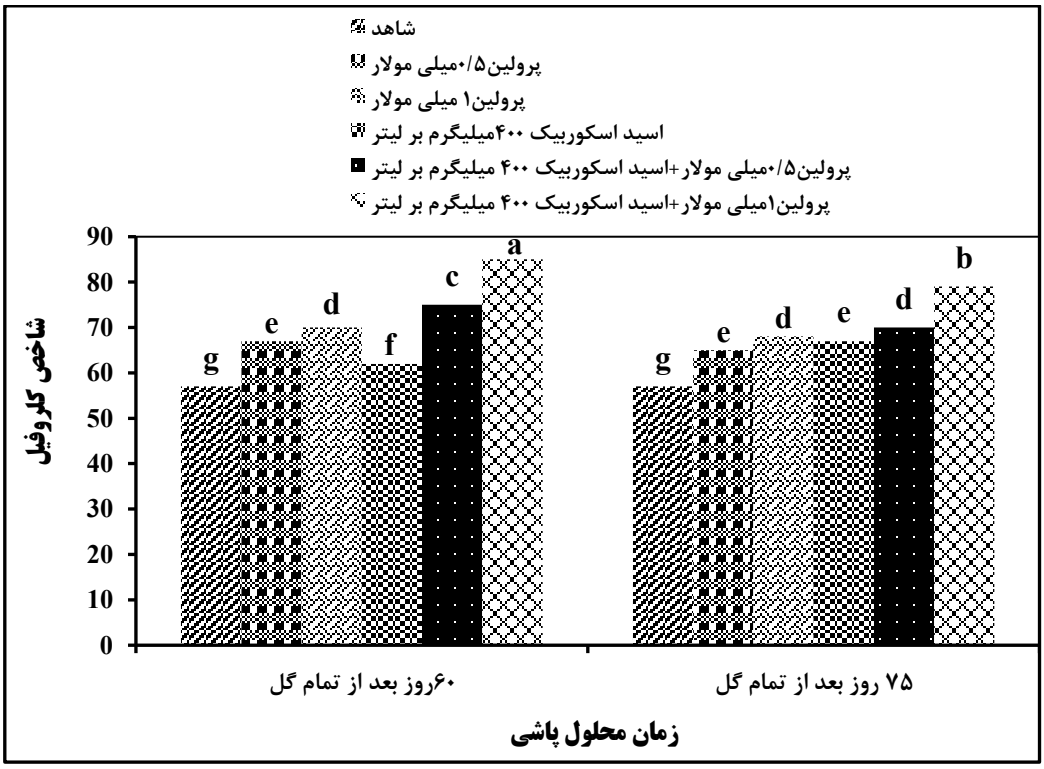
شکل۱- تاثیرتوام اسیدآسکوربیک و پرولین روی سطح برگ پسته رقم احمد آقایی در دومرحله ۶۰ و ۷۵ روز بعد از مرحله تمام گل. ستون‌های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد آزمون آماری دانکن تفاوت معنی‌داری دارند.

شاخص کلروفیل

طبق نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر، در تیمار شاهد، شاخص کلروفیل با مقدار ثابت ۵۷ در هر دو زمان، مبنای مقایسه قرار گرفت. پرولین ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش معنی‌دار شاخص کلروفیل شد (۱۷٪/۵) در ۶۰ روز و ۱۴٪ در ۷۵ روز (که نشان‌دهنده تأثیر مثبت پرولین در بهبود وضعیت فتوسنتزی برگ‌ها است. پرولین ۱ میلی‌مولار اثر قوی‌تری نسبت به غلظت پایین‌تر داشت (بیش از ۲۲/۸٪) در ۶۰ روز و (بیش از ۱۹٪/۳) در ۷۵ روز، این نشان می‌دهد که پرولین در غلظت بالاتر توانایی بیشتری در حفظ کلروفیل و کاهش تجزیه آن در مراحل رشد دارد. اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، به‌تنهایی در ۶۰ روز اثر خفیفی نسبت به تیمار شاهد داشت (۸٪/۸)، ، اما در ۷۵ روز موجب افزایش معنی‌دار ۱۷/۵٪ شد. این نتیجه نشان‌دهنده نقش تدریجی و حفاظتی اسید آسکوربیک در تأخیر پیری و حفظ کلروفیل است. تیمار پرولین ۰/۵ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر، باعث افزایش شاخص کلروفیل به میزان ۳۱/۶٪ در ۶۰ روز و ۲۲٪/۸ در ۷۵ روز (هر دو معنی‌دار) شد. این اثر هم‌افزایی بیانگر نقش ترکیبی پرولین (بهبود اسمولیت‌ها و حفاظت پروتئین‌ها) و اسید آسکوربیک

(آنتی‌اکسیدان قوی و جلوگیری از تجزیه کلروفیل) است تیمار پرولین ۰/۵ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر بیشترین و پایدارترین اثر را داشت؛ شاخص کلروفیل در ۶۰ روز ۴۹/۱٪ و در ۷۵ روز ۳۸/۶٪ بالاتر از شاهد بود. آزمون دانکن نشان داد که این تیمار در هر دو زمان اختلاف معنی‌دار بسیار واضحی با شاهد و سایر تیمارها داشت. نتایج نشان داد که پرولین به‌ویژه در غلظت ۱ میلی‌مولار و اسید آسکوربیک از طریق کاهش پراکسیداسیون غشاها، بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تثبیت ساختار کلروپلاست، نقش کلیدی در افزایش پایداری کلروفیل ایفا کردند.

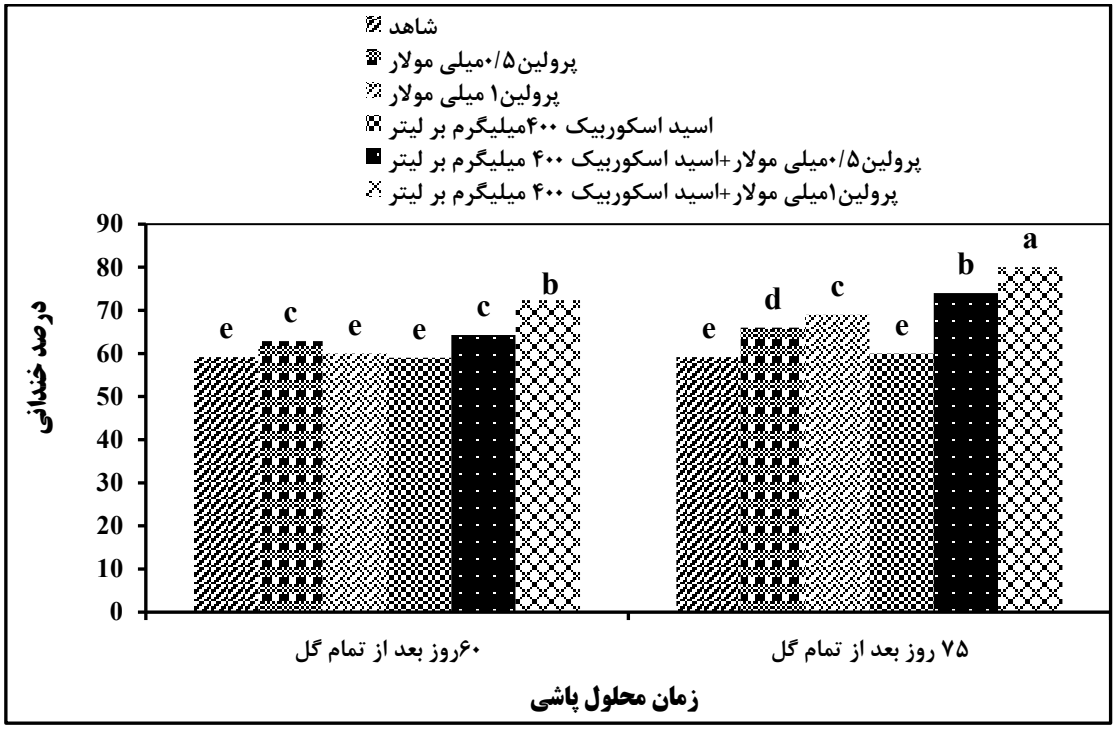
بیشترین هم‌افزایی مربوط به تیمار پرولین ۰/۵ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود که در هر دو زمان به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد و سایر تیمارها برتری داشت. اسید آسکوربیک به‌تنهایی در کوتاه‌مدت تأثیر ضعیف‌تری داشت، اما در بلندمدت اثر حفاظتی آن آشکار شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کاربرد ترکیبی پرولین و آسکوربیک اسید می‌تواند یک راهبرد فیزیولوژیک مؤثر برای بهبود ظرفیت فتوسنتزی و افزایش عملکرد نهایی پسته رقم احمدآقایی باشد (شکل۲).



شکل۲- تأثیر توام اسیدآسکوربیک و پرولین روی شاخص کلروفیل برگ پسته رقم احمد آقایی در دو مرحله ۶۰ و ۷۵ روز بعد از مرحله تمام گل. ستون‌های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد آزمون آماری دانکن تفاوت معنی‌داری دارند.

خندانی

بررسی نتایج نشان داد که اثر متقابل تیمار × زمان در صفت خندانی در سطح پنج درصد (آزمون چنددامنه‌ای دانکن) معنی‌دار شد؛ به این معنا که پاسخ درختان پسته به تیمارهای مختلف بسته به زمان نمونه‌برداری (۶۰ و ۷۵ روز پس از تمام گل) متفاوت بوده و روند تغییرات خندانی در طول زمان تحت تأثیر مستقیم تیمارها قرار گرفت. در تیمار شاهد در هر دو زمان مقدار ثابتی معادل ۵۹/۱۷٪ خندانی داشت و مبنای مقایسه قرار گرفت. پرولین ۰/۵ میلی‌مولار در ۶۰ روز تنها افزایش اندکی حدود +۶/۳٪ نسبت به شاهد ایجاد کرد، اما در ۷۵ روز اثر آن تقویت شد. این نتایج نشان داد که پرولین در غلظت پایین به‌صورت تدریجی بر رشد جنین و پرشدگی مغز اثر گذاشته و در مراحل بعدی رشد میوه بیشتر نمایان می‌شود. پرولین ۱ میلی‌مولار در ۶۰ روز تغییر اندکی نسبت به شاهد داشت (۱/۴٪) و اثر معنی داری نداشت، اما در ۷۵ روز به ۶۹٪ افزایش یافت که در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. این روند نشان می‌دهد که غلظت بالاتر پرولین تأثیر قوی‌تری در مراحل میانی تا انتهایی پرشدگی مغز دارد. اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، به‌تنهایی اثر قابل توجهی نداشت و تفاوت معنی‌داری با شاهد مشاهده نشد. این نشان داد که نقش اصلی آسکوربیک اسید بیشتر در هم‌افزایی با پرولین بروز می‌کند تا به‌صورت منفرد. ترکیب تیمار پرولین ۰/۵ میلی مولار +اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر باعث بهبود معنی‌دار درصد خندانی شد؛ این تیمار نشان داد که حتی غلظت پایین پرولین، در حضور یک آنتی‌اکسیدان قوی مانند آسکوربیک اسید، می‌تواند به‌طور چشمگیری فرآیند پرشدگی مغز و بازشدن پوسته را تسریع کند. ترکیب تیمار پرولین ۰/۵ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر ، بیشترین اثر را داشت و در هر دو زمان تفاوت معنی‌دار آشکاری با شاهد و سایر تیمارها نشان داد؛ این یافته حاکی از یک اثر هم‌افزایی قوی است که پرولین از طریق افزایش سنتز پروتئین‌ها، بهبود تقسیم سلولی و پرشدگی مغز و آسکوربیک اسید از طریق محافظت آنتی‌اکسیدانی و کاهش پراکسیداسیون غشاها منجر به افزایش چشمگیر خندانی شدند. اثر متقابل تیمار × زمان معنی‌دار بود؛ به این معنا که کارایی تیمارها در افزایش درصد خندانی در طول زمان تغییر کرده است. پرولین در غلظت بالا (یک میلی مولار) و به‌ویژه در ترکیب با اسید آسکوربیک بیشترین نقش را در بهبود درصد خندانی ایفا کرد. تیمار پرولین ۰/۵ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر در هر دو زمان (در گروه آماری بالاتر) آزمون دانکن، ($p \leq 0.05$) قرار گرفت و به‌عنوان بهترین تیمار معرفی شد. این نتایج بیانگر آن است که استفاده توأم پرولین و آسکوربیک اسید می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد فیزیولوژیک مؤثر برای بهبود پرشدگی مغز و ارتقای کیفیت بازارپسندی پسته معرفی گردد (شکل۳).

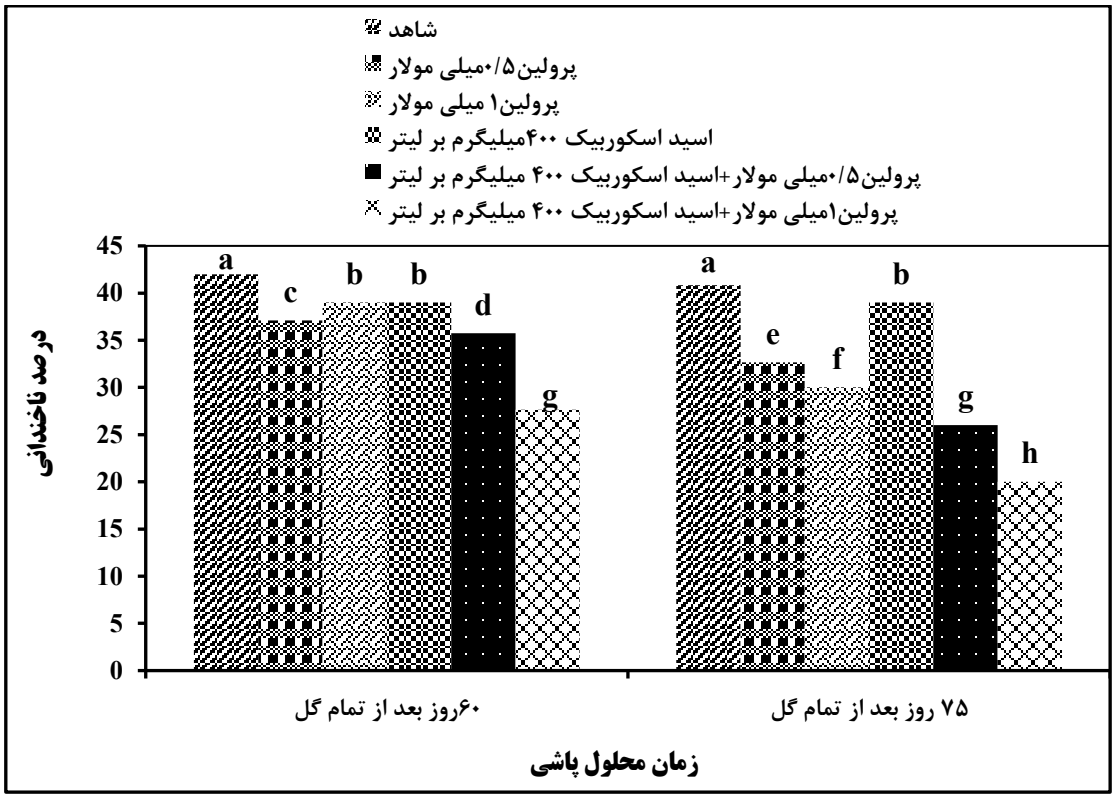


شکل۳- تأثیر توام اسیدآسکوربیک و پرولین روی درصد خندانی پسته رقم احمد آقایی در دو مرحله ۶۰ و ۷۵ روز بعد از مرحله تمام گل. ستون های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد آزمون آماری دانکن تفاوت معنی‌داری.

دهان بست (ناخندانی)

نتایج نشان داد که اثر متقابل تیمار × زمان در صفت درصد ناخندانی معنی‌دار بود؛ بدین معنا که روند تغییرات این ویژگی در طول رشد میوه به‌شدت وابسته به نوع تیمار اعمال‌شده بود. با توجه به اینکه پدیده ناخندانی در پسته ارتباط تنگاتنگی با کمبود رشد جنین، عدم تقسیم و توسعه کافی سلولی، محدودیت انتقال مواد پرورده و اختلال در تعادل هورمونی دارد، کاهش آن به‌عنوان یک شاخص کیفی مهم و اقتصادی تلقی می‌شود. شاهد در هر دو زمان بالاترین درصد ناخندانی را داشت (۴۲ و ۴۱/۸۳ درصد) که نشان‌دهنده عدم توانایی کافی در تأمین نیازهای رشدی جنین و پرشدگی مغز در شرایط طبیعی است. پرولین در هر دو غلظت باعث کاهش معنی‌دار ناخندانی شد. پرولین ۰/۵ میلی مولار با کاهش حدود ۱۱ درصد در ۷۵ روز بعد از تمام گل نسبت به شاهد کارآمدی خود را نشان داد. پرولین ۱ میلی مولار اثر قوی‌تری داشت و ناخندانی را به حدود ۳۰ درصد رساند. این امر احتمالاً ناشی از نقش پرولین در افزایش تقسیم سلولی جنین، تثبیت ساختار پروتئین‌ها و بهبود اسمولاریته در شرایط تنش است. اسید آسکوربیک به‌تنهایی اثر چندانی در کاهش ناخندانی نداشت و مقادیر نزدیک به شاهد باقی ماند (۳۹٪). این موضوع بیانگر آن است که اگرچه آسکوربیک اسید به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قدرتمند می‌تواند از آسیب اکسیداتیو جلوگیری کند، اما به‌تنهایی قادر به تحریک کافی رشد جنین نیست. تیمار ترکیبی

پرولین + اسید آسکوربیک به‌طور چشمگیری درصد ناخندانی را کاهش داد: بطوریکه، تیمار پرولین ۰/۵ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر ، ناخندانی را در ۷۵ روز بعد از تمام گل به ۲۶ درصد رساند (کاهش بیش از ۱۴ درصد نسبت به شاهد). تیمار تیمار پرولین ۱ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر بیشترین اثر را داشت و ناخندانی را به نزدیک به ۵۰ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. این تیمار در هر دو زمان در گروه آماری برتر قرار گرفت و نشان داد که هم‌افزایی پرولین و آسکوربیک اسید می‌تواند محدودیت‌های متابولیکی و فیزیولوژیکی عامل ناخندانی را به شکل چشمگیری جبران کند. پدیده ناخندانی، که همواره چالشی بزرگ در باغ‌های پسته است، در این پژوهش با دخالت هوشمندانه پرولین و آسکوربیک اسید به‌طور محسوسی مهار شد. به‌ویژه، ترکیب تیمار پرولین ۱ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر همچون «معمار تعادل متابولیکی»، توانست مسیر رشد جنین را هموار ساخته، انتقال مواد پرورده را تسهیل کند و در نهایت درصد ناخندانی را به کمترین مقدار برساند. این نتایج گویای آن است که هم‌افزایی این دو ترکیب، راهبردی ارزشمند و کاربردی برای ارتقای کیفیت و بازارپسندی پسته رقم احمدآقایی خواهد بود (شکل۴).

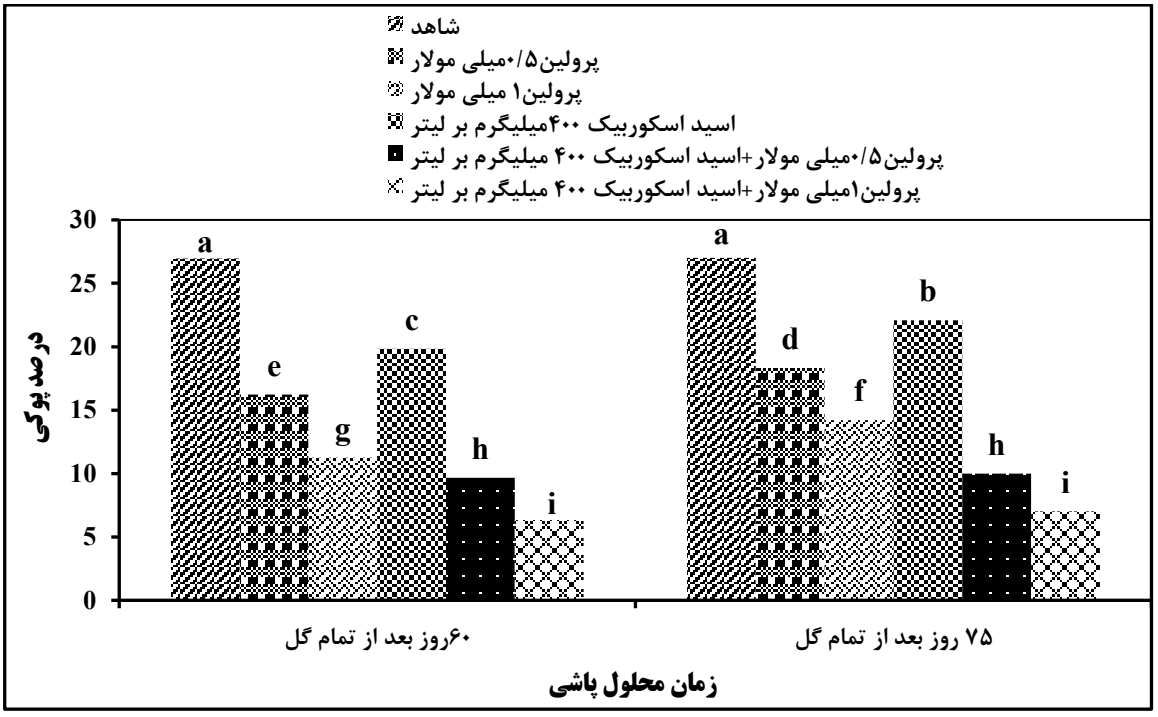


شکل۴- تأثیر توام اسیدآسکوربیک و پرولین روی درصد ناخندانی پسته رقم احمد آقایی در دو مرحله ۶۰ و ۷۵ روز بعد از مرحله تمام گل. ستون های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد آزمون آماری دانکن تفاوت معنی‌داری دارند.

پوکی

صفت پوکی در پسته بازتابی از ناکامی در پرشدن کامل جنین و مغز میوه است و به‌طور مستقیم بر کیفیت نهایی، وزن خندان‌ها و ارزش بازارپسندی محصول اثر می‌گذارد. داده‌های حاضر نشان داد که تیمارهای مختلف تأثیر قابل توجهی در کاهش این نقیصه داشتند. شاهد در هر دو زمان بالاترین میزان پوکی را نشان داد (۲۶/۹۶ و ۲۷ درصد) که بیانگر ضعف طبیعی در فرآیندهای رشد و توسعه جنین در شرایط بدون مداخله بود. تیمار پرولین تیمار ۰/۵ میلی مولار پوکی را در مقایسه با شاهد به‌طور چشمگیری کاهش داد و در ۷۵ روز بعد از تمام گل به ۱۸/۳۲درصد رساند (کاهش حدود ۳۲ درصد نسبت به تیمار شاهد). تیمار ۱ میلی مولار پرولین، عملکرد بهتری داشت و پوکی را به ۱۴/۲۱ درصد کاهش داد (معادل ۴۷ درصد کاهش نسبت به شاهد). این نتیجه با نقش پرولین در بهبود فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز پروتئین، تحریک تقسیم سلولی و افزایش ظرفیت نگهداری آب در بافت‌های در حال رشد هم‌راستا است. اسید آسکوربیک با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرمبر لیتر، به‌تنهایی کاهش متوسطی در پوکی ایجاد کرد و میزان آن را به حدود ۲۲ درصد رساند. این اثر ناشی از نقش آنتی‌اکسیدانی آسکوربیک اسید در جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها و حفظ سلامت غشاها است، هرچند برای تحریک کافی تقسیم سلولی جنین ناکافی به نظر می‌رسد. تیمار ترکیب پرولین + اسید آسکوربیک، در ترکیب ۰/۵ میلی مولار پرولین + ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آسکوربیک اسید، پوکی را به‌طور معناداری تا حدود ۱۰ درصد کاهش داد (کاهش بیش از ۶۳ درصد نسبت به تیمار شاهد). تیمار ۱ میلی مولار پرولین +۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آسکوربیک اسید بهترین نتیجه را رقم زد؛ پوکی به کمترین حد ممکن یعنی هفت درصد رسید (کاهش بیش از ۷۴ درصد نسبت به تیمار شاهد). این سطح از کاهش، بیانگر هم‌افزایی قوی میان نقش اسمولیت حفاظتی پرولین و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آسکوربیک اسید است که با هم رشد جنین را تقویت کرده، انتقال کربوهیدرات‌ها را تسهیل و تعادل هورمونی را پایدار می‌سازند.

درخت پسته، که پوکی دانه همواره همچون زخمی بر پیکره کیفیت محصول آن بوده است، با همراهی پرولین و آسکوربیک اسید توانست جان تازه‌ای بگیرد. کاهش چشمگیر پوکی به‌ویژه در تیمار پرولین ۱ میلی مولار + آسکوربیک اسید ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر که تنها هفت درصد پوکی بر جای گذاشت، نشان‌دهنده قدرت شگرف این هم‌افزایی بیوشیمیایی در هدایت فرایندهای جنینی به‌سوی کمال است. بدین‌ترتیب، این ترکیب را می‌توان کلید زرین ارتقای کیفیت و بازارپسندی پسته احمدآقایی دانست؛ کلیدی که نه‌تنها عملکرد کمی بلکه ارزش اقتصادی محصول را به‌طور چشمگیری ارتقا خواهد داد (شکل ۵).

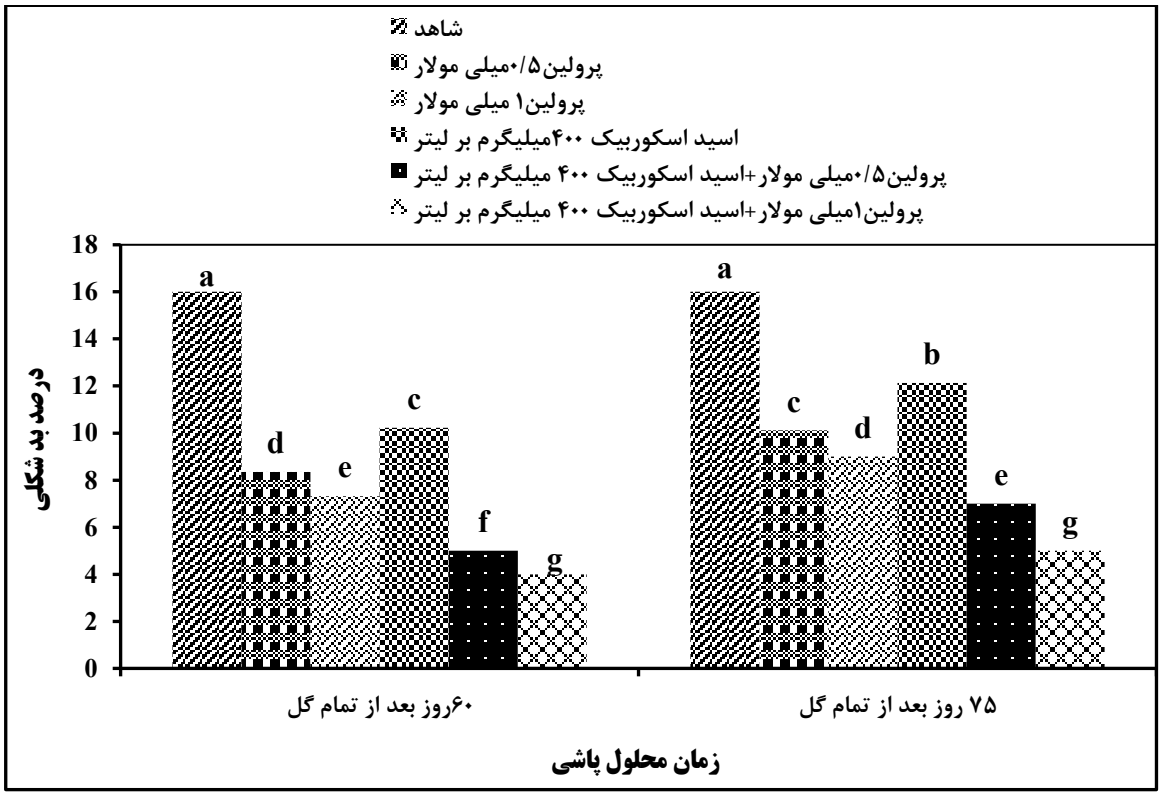


شکل۵ -تأثیر توام اسیدآسکوربیک و پرولین روی درصد پوکی پسته رقم احمد آقایی در دومرحله ۶۰ و ۷۵ روز بعد از مرحله تمام گل. ستون‌های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد آزمون آماری دانکن تفاوت معنی‌داری دارند.

بدشکلی میوه پسته

بدشکلی میوه در پسته، بازتاب اختلال در تکوین جنین، رشد نامتوازن دیواره‌های تخمدان و یا نقص در انتقال مواد فتوسنتزی است که نهایتاً کیفیت ظاهری و بازارپسندی محصول را تهدید می‌کند. طبق نتایج بدست آمده، شاهد در هر دو زمان بالاترین میزان بدشکلی (۱۶ درصد) را نشان داد؛ گواهی بر آنکه در شرایط طبیعی، بخش قابل توجهی از میوه‌ها از نقص‌های ریخت‌شناختی رنج می‌برند. در تیمار پرولین، در غلظت ۰/۵ میلی مولار، بدشکلی میوه در ۶۰ و ۷۵ روز بعد از تمام گل به‌ترتیب به ۸/۳۵ درصد و ۱۰/۱۱ درصد کاهش یافت (کاهش حدود ۴۸ درصد نسبت به تیمار شاهد در مرحله ۶۰ روز محلول پاشی. در غلظت ۱ میلی مولار تیمار پرولین، این کاهش چشمگیرتر بود؛ میزان بدشکلی در ۷۵ روز تنها ۹ درصد ثبت شد (کاهش حدود ۴۴ درصد نسبت به تیمار شاهد) نقش پرولین در بهبود فشار اسمزی سلول‌ها و تحریک تقسیم سلولی می‌تواند عامل اصلی این اثر باشد. تیمار اسید آسکوربیک (۴۰۰ میلی گرم بر لیتر) به‌تنهایی نیز کاهش محسوسی ایجاد کرد (۱۲/۱۳ درصد در ۷۵ روز؛ حدود ۲۴٪ کاهش نسبت به شاهد. این امر با خاصیت آنتی‌اکسیدانی آسکوربیک اسید و نقش آن در حفاظت از ساختارهای سلولی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو مرتبط است. تیمار ترکیب پرولین + اسید آسکوربیک، تیمار ۰/۵ میلی مولار پرولین + آسکوربیک اسید ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر بدشکلی را به حدود ۷ درصد رساند

(کاهش بیش از ۵۶ درصد نسبت به تیمار شاهد). تیمار ۱ میلی گرم بر لیتر پرولین + آسکوربیک اسید بهترین اثر را برجای گذاشت و بدشکلی را به حداقل ممکن یعنی چهار تا پنج درصد کاهش داد (کاهش بیش از ۷۰ درصدی نسبت به شاهد). این نتیجه نشان داد که هم‌افزایی میان پرولین و آسکوربیک اسید نه‌تنها از ناهنجاری‌های جنینی جلوگیری می‌کند بلکه هماهنگی رشد و توسعه بافت‌های میوه را تضمین می‌نماید. بدشکلی میوه که همواره مانعی در مسیر زیبایی و بازارپسندی پسته احمدآقایی بوده است، با مداخله‌ی پرولین و آسکوربیک اسید به‌شکل چشمگیری مهار شد. در حالی‌که شاهد ۱۶ درصد میوه بدشکل داشت، ترکیب پرولین ۱ میلی مولار + آسکوربیک اسید این عارضه را به پایین‌ترین سطح یعنی چهار تا پنج درصد رساند. این دستاورد، نشانگر آن است که تعادل بین حفاظت آنتی‌اکسیدانی و بهبود فیزیولوژیک بافت‌های در حال تقسیم می‌تواند نقشی بنیادین در ارتقای کیفیت ظاهری و اقتصادی پسته ایفا کند (شکل۶).

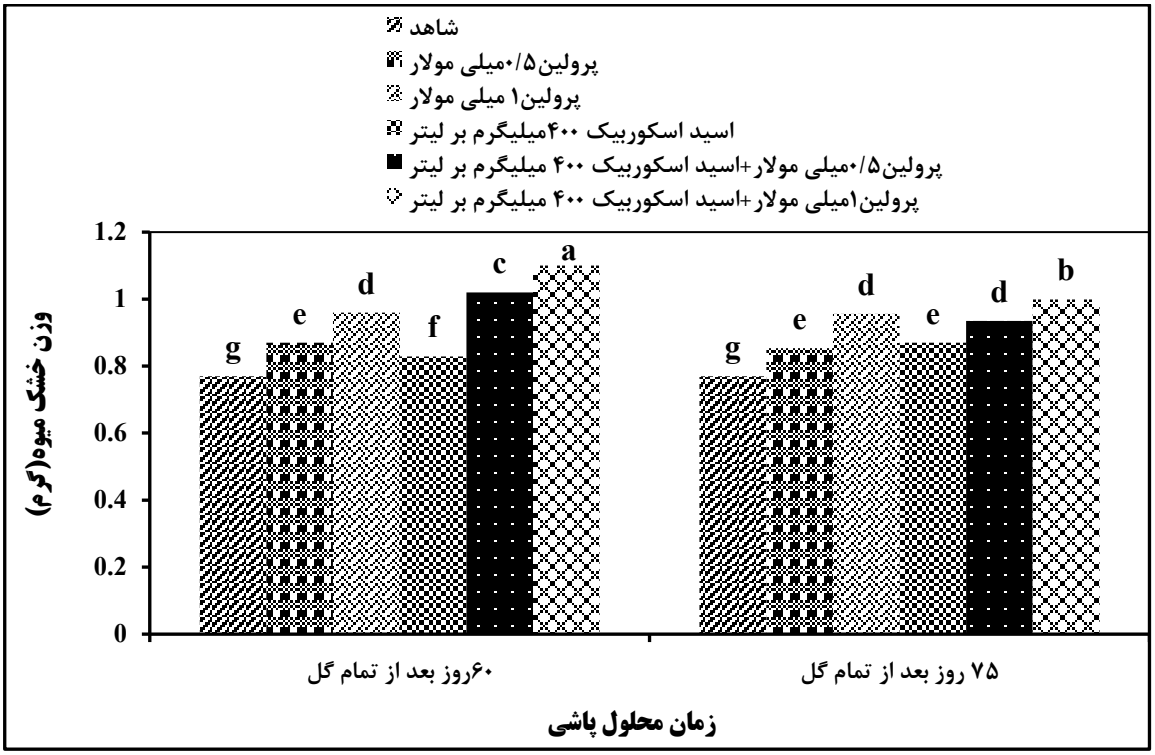


شکل۶ -تأثیر توام اسیدآسکوربیک و پرولین روی درصد میوه‌های بدشکل پسته رقم احمد آقایی در دو مرحله ۶۰ و ۷۵ روز بعد از مرحله تمام گل. ستون‌های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد آزمون آماری دانکن تفاوت معنی‌داری دارند.

وزن خشک میوه

طبق نتایج بدست آمده، تیمار شاهد با میانگین وزن خشک میوه ۰/۷۷ گرم در هر دو زمان، پایین‌ترین مقدار

را داشت. پرولین ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک میوه شد (حدود ۱۳ درصد در ۶۰ روز و ۱۰/۹ درصد در ۷۵ روز در مقایسه با تیمار شاهد)، هرچند تأثیر آن مثبت بود، اما نسبت به غلظت بالاتر ضعیف‌تر عمل کرد. پرولین ۱ میلی‌مولار اثر قوی‌تری داشت و در هر دو زمان باعث افزایش معنی‌دار حدود ۲۴ درصد نسبت به شاهد شد. این نشان می‌دهد که پرولین در دوز بالاتر توانسته با افزایش سنتز پروتئین‌ها، تسهیل جذب نیتروژن و بهبود تعادل اسمزی، به رشد میوه کمک کند. اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در ۶۰ روز تنها ۷/۷ درصد افزایش (غیرمعنی‌دار) داشت، اما در ۷۵ روز اثر آن تقویت شد و موجب افزایش معنی‌دار ۱۳ درصد نسبت به شاهد گردید. این نتیجه نشان‌دهنده نقش تدریجی آسکوربیک اسید در حفاظت از سلول‌های میوه و تأخیر در پیری فیزیولوژیک است. تیمار ترکیب پرولین ۰/۵ مکیلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر، افزایش چشمگیری ایجاد کرد (بیش از۳۲/۵ درصد) در ۶۰ روز و (۲۱/۴ درصد) در ۷۵ روز، و تفاوت معنی‌داری نسبیت به شاهد نشان دادند. این اثر هم‌افزایی بیانگر مکمل بودن نقش پرولین (بهبود متابولیسم نیتروژن و مقاومت به تنش) و اسید آسکوربیک (خاصیت آنتی‌اکسیدانی و جلوگیری از تخریب بافتی) است. تیمارپرولین ۱ میلی مولار + اسید آسکوربیک، بیشترین و پایدارترین اثر را نشان داد؛ وزن خشک میوه در ۶۰ روز ۴۲/۹ درصد و در ۷۵ روز ۲۹/۷ درصد بالاتر از شاهد بود. آزمون دانکن این تیمار را به‌طور معنی‌دار در گروه بالاتر نسبت به شاهد و بیشتر تیمارهای منفرد قرار داد. کاربرد پرولین و اسید آسکوربیک به‌ویژه به‌صورت توأم، به شکل معنی‌داری وزن خشک میوه را افزایش داد. بیشترین اثر مربوط به تیمار پرولین ۱ میلی مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر بود که در هر دو زمان تفاوت معنی‌داری با شاهد و سایر تیمارها نشان داد. اسید آسکوربیک به‌تنهایی اثر قابل توجهی نداشت، اما در ترکیب با پرولین، به‌ویژه در غلظت بالاتر، اثر هم‌افزایی قوی بروز داد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که پرولین به همراه اسید آسکوربیک می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی کارآمد برای بهبود رشد میوه و افزایش عملکرد در باغ‌های پسته رقم احمدآقایی به‌کار گرفته شود (شکل۷).

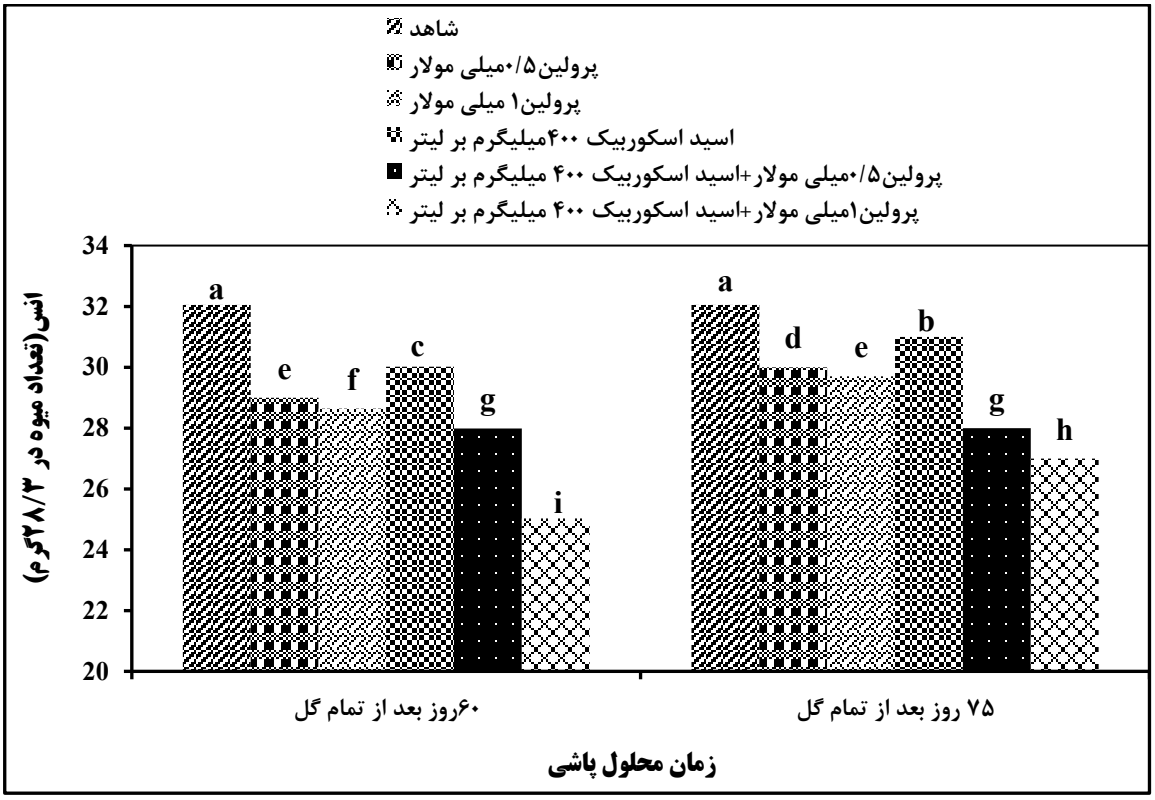


شکل۷- تأثیر توام اسیدآسکوربیک و پرولین روی وزن میوه پسته رقم احمد آقایی در دو مرحله ۶۰ و ۷۵ روز بعد از مرحله تمام گل. ستون‌های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد آزمون آماری دانکن تفاوت معنی‌داری دارند.

انس میوه پسته

نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که هر دو فاکتور تیمار و زمان و همچنین تعامل آن‌ها بر انس میوه پسته رقم احمدآقایی اثر معناداری داشته‌اند. انس میوه در شاهد در هر دو زمان ۶۰ و ۷۵ روز بعد از تمام گل برابر و برابر با ۳۲/۵۰ بود و به‌عنوان مبنای مقایسه سایر تیمارها در نظر گرفته شد. بررسی تیمارهای مختلف نشان داد که کاربرد پرولین و اسید اسکوربیک به‌طور قابل توجهی انس میوه را کاهش داده است. به‌طور خاص، تیمارهای ترکیبی پرولین و اسید اسکوربیک بیشترین کاهش انس میوه را ایجاد کردند، به گونه‌ای که انس میوه در تیمار پرولین ۱ میلی‌مولار + اسید اسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ۲۵/۳۰ در ۶۰ روز بعد از گل و به ۲۷ در ۷۵ روز بعد از گل کاهش یافت، که به ترتیب ۲۱/۹ و ۱۵/۸ درصد کمتر از شاهد بود. این کاهش بیشتر نسبت به اثر تیمارهای منفرد پرولین یا اسید اسکوربیک، نشان‌دهنده وجود اثر هم‌افزایی بین این دو عامل است. به طور جزئی، پرولین به‌تنهایی باعث کاهش انس میوه شد (پرولین ۰/۵ میلی‌مولار: ۲۹ و ۳۰ و پرولین ۱ میلی‌مولار: ۲۸/۶۴ و ۲۹/۷ در دو زمان)، در حالی که اسید اسکوربیک به‌تنهایی اثر متوسطی داشت (۳۰/۲۰ و ۳۱). این الگو نشان داد که ترکیب این دو تیمار می‌تواند مکانیزم‌های متعدد زیستی از جمله تنظیم هورمون‌های رشد، حفظ توازن آبی و تعدیل

تقسیم سلولی را هم‌زمان تحت تأثیر قرار دهد و انس میوه را به طور مؤثرتری کاهش دهد. مقایسه دو زمان نشان داد که انس میوه در تیمارهای مختلف با گذر زمان کمی افزایش یافت، به‌طوری که اثر کاهش انس میوه در ۷۵ روز بعد از گل نسبت به ۶۰ روز اندکی کاهش یافته است. با این حال، ترتیب اثرگذاری تیمارها بدون تغییر باقی ماند؛ یعنی همچنان تیمارهای ترکیبی بیشترین کاهش انس میوه را ایجاد کردند. این یافته‌ها بیانگر آن است که اثر تیمارها نه‌تنها مستقیم است، بلکه با زمان تعامل دارد؛ به عبارت دیگر، اثر ترکیبی پرولین و اسید اسکوربیک در طول دوره رشد میوه حفظ می‌شود، هرچند با شدت کمتر. کاهش انس میوه ناشی از تیمارهای پرولین و اسید اسکوربیک احتمالاً با افزایش محتوای آب میوه و کاهش تراکم سلولی مرتبط است. پرولین به‌عنوان یک آمینو اسید تنظیم‌کننده تنش و هورمون‌های رشد، می‌تواند توازن آبی سلول‌ها را بهبود دهد و رشد انس میوه را تعدیل کند. از سوی دیگر، اسید اسکوربیک با فعالیت آنتی‌اکسیدانی و اثر بر تقسیم و توسعه سلولی، به کاهش انس میوه کمک می‌کند. تعامل این دو ماده در تیمارهای ترکیبی بیانگر یک مکانیسم سینرژیک است که انس میوه را مؤثرتر کاهش می‌دهد. تیمارهای ترکیبی پرولین و اسید اسکوربیک بیشترین کاهش انس میوه را ایجاد کردند (تا ۲۱.۹٪ کاهش نسبت به شاهد در ۶۰ روز بعد از گل). اثرگذاری تیمارها در طول زمان حفظ شد، اگرچه کاهش انس میوه در ۷۵ روز بعد از گل کمی تعدیل شد. پرولین یا اسید اسکوربیک به‌تنهایی اثر متوسطی بر انس میوه داشتند، اما ترکیب آن‌ها اثر هم‌افزایی قوی ایجاد کرد. نتایج نشان‌دهنده اهمیت استفاده هم‌زمان از تنظیم‌کننده‌های رشد و آنتی‌اکسیدان‌ها برای بهبود کیفیت فیزیولوژیکی میوه پسته است (شکل ۸).



شکل ۸- تأثیر توام اسیدآسکوربیک و پرولین روی انس میوه پسته رقم احمد آقایی در دو مرحله ۶۰ و ۷۵ روز بعد از مرحله تمام گل. ستون‌های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد آزمون آماری دانکن تفاوت معنی‌داری دارند.

بحث

رشد رویشی و زایشی در گیاهان از ارکان بنیادین کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی به‌شمار می‌آید و توجه به این مقوله نه تنها موجب افزایش عملکرد می‌شود، بلکه بازگشت سریع‌تر سرمایه را نیز به دنبال دارد. در سال‌های اخیر، تمرکز بر استفاده از ترکیبات شیمیایی به‌ویژه تنظیم‌کننده‌های فیزیولوژیک نظیر اسید آسکوربیک و پرولین به‌منظور بهبود فرآیندهای رشدی و باردهی گیاهان به‌طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر، تیمار اسید آسکوربیک (با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، پرولین (در غلظت‌های ۰/۵و ۱ میلی‌مولار) و ترکیب همزمان آن‌ها (اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر + پرولین ۰/۵ میلی‌مولار و اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر + پرولین ۱ میلی‌مولار) در دو بازه زمانی ۶۰ و ۷۵ روز پس از تمام گل، منجر به افزایش چشمگیر سطح برگ، شاخص کلروفیل، درصد خندانی، وزن میوه و عملکرد گردید و به‌طور همزمان درصد پوکی و بدشکلی میوه‌ها را به‌طور معنی‌داری کاهش داد.

ویتامین‌ها ترکیبات آلی ضروری برای انجام واکنش‌های متابولیک محسوب می‌شوند. بیشتر ویتامین‌ها به‌عنوان کوآنزیم یا بخشی از آن، نقش کلیدی در فعال‌سازی واکنش‌های زیستی ایفا می‌کنند (شاکرحسینی و آزادبخت، ۱۳۸۳). در حقیقت، ویتامین‌ها می‌توانند به‌عنوان ترکیبات تنظیم‌کننده رشد گیاهی در غلظت‌های اندک، تأثیرات چشمگیری بر شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه داشته باشند. این ترکیبات با تحریک سنتز آنزیم‌ها یا ایفای نقش کوآنزیمی، موجب ارتقاء فرآیندهای رشد شده و همچنین با محافظت از گیاه در برابر تنش‌هایی نظیر دماهای بالا، فرآیندهای متابولیکی را به‌طور مثبت تحت تأثیر قرار می‌دهند (Hathout, 1995). در سال‌های اخیر، اهمیت ویتامین‌ها علاوه بر تغذیه، به‌عنوان عامل کنترل بیماری‌های گیاهی نیز مورد تأکید قرار گرفته است (Beyer *et al*., 2002).

اسید آسکوربیک به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی، نقشی اساسی در حفاظت سلول‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از رادیکال‌های آزاد اکسیژن دارد (Mukhtar *et al*., 2016). در این مطالعه، بیشترین وزن خشک میوه در تیمار ترکیبی پرولین ۱ میلی‌مولار همراه با اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در مرحله ۶۰ روز پس از تمام گل به‌دست آمد، در حالی که کمترین وزن خشک میوه در تیمار شاهد در هر دو بازه زمانی مشاهده گردید. نتایج حاضر با یافته‌های آباده‌ای و پاک‌کیش (۱۳۹۶) همخوان است که گزارش کردند محلول‌پاشی پرولین (۲۰۰ میکرومولار) در پسته رقم اوحدی تحت تنش کم‌آبی، موجب افزایش تشکیل و وزن میوه و در نهایت ارتقاء عملکرد می‌شود.

در ارتباط با درصد خندانی نیز، بالاترین مقدار مربوط به تیمار پرولین ۱ میلی‌مولار توأم با اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در ۷۵ روز پس از تمام گل بود که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. در مقابل، بیشترین درصد ناخندانی در تیمار شاهد در هر دو مرحله مشاهده شد. این امر به‌خوبی بیانگر تفاوت بارز میان درختان محلول‌پاشی شده و شاهد است؛ به‌گونه‌ای که پرولین با اثرگذاری بر فرآیند رشد و نمو و افزایش وزن و حجم میوه، درصد خندانی را ارتقاء داده و اسید آسکوربیک نیز با ایفای نقش در تقسیم سلولی و بهبود جذب عناصر غذایی، سهم بسزایی در این فرآیند داشته است (Aliei *et al*., 2010).

تحقیقات پیشین نیز این نتایج را تأیید می‌کنند؛ به‌طوری‌که Talaie *et al*., (2016) گزارش کردند کاربرد آمینواسیدهای پیش‌ساز پلی‌آمین‌ها در پسته رقم کله‌قوچی، سبب کاهش ناخندانی و افزایش خندانی می‌شود. همچنین، Mukhtar *et al*., (2016) نشان دادند که ترکیب پرولین و آسکوربیک اسید با کاهش استرس‌های محیطی و ارتقای سلامت گیاه، کیفیت خندانی پسته را بهبود می‌بخشند.

در خصوص درصد پوکی نیز نتایج نشان داد که تیمارهای پرولین و اسید آسکوربیک با بهبود وضعیت فیزیولوژیک و افزایش مقاومت گیاه به استرس‌های محیطی، منجر به کاهش پوکی شدند. پرولین به‌عنوان یک اسمولیت مهم، در شرایط خشکی و شوری تجمع می‌یابد و تعادل آبی و پایداری سلولی را تضمین می‌کند. این ویژگی‌ها موجب افزایش تحمل گیاهان پسته در برابر تنش‌های محیطی و کاهش پوکی می‌گردد (Nikoogoftar-Sedghi et al., 2018; Abdi, 2022).

از سوی دیگر، بدشکلی میوه که در تیمار شاهد بیشترین مقدار را داشت، در تیمار ترکیبی پرولین ۱ میلی‌مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر به کمترین حد خود رسید. پرولین علاوه بر نقش در تعادل رشد و نمو، با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و تنظیم باردهی شاخه از طریق کنترل ریزش جوانه‌های گل، میزان بدشکلی را کاهش می‌دهد (اصغری و همکاران، ۱۳۹۵؛ Dolatabadian *et al*., 2020).

همچنین نتایج مربوط به شاخص کلروفیل و سطح برگ نشان داد که تیمار ترکیبی پرولین ۱ میلی‌مولار + اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در ۶۰ روز پس از تمام گل، بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داد، در حالی که کمترین میزان در تیمار شاهد ثبت شد. این نتایج با مطالعات Wang *et al*., (2018) و Reda *et al*., (2017) مطابقت دارد که به نقش پرولین در تأخیر تخریب کلروفیل و اثرات آنتی‌اکسیدانی آسکوربیک اسید در حفاظت از رنگدانه‌های فتوسنتزی اشاره کرده‌اند.

در نهایت، بالاترین میزان عملکرد در پسته رقم احمدآقایی مربوط به تیمار پرولین ۱ میلی‌مولار توأم با اسید آسکوربیک ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در ۶۰ روز پس از تمام گل (۱۳۲۰ گرم بر شاخه) بود که تقریباً دو برابر تیمار شاهد محسوب می‌شود. این امر نشان می‌دهد که افزایش وزن میوه‌های خندان و کاهش درصد پوکی و بدشکلی، عوامل اصلی ارتقاء عملکرد در این تیمار بوده‌اند. این یافته‌ها با نتایج Liu *et al*., (2017)، Kamran *et al*., (2023) و Hosseinifard *et al*., (2022) همخوانی دارد که به نقش کلیدی این ترکیبات در تقسیم سلولی، رشد میوه، فتوسنتز و مقاومت به تنش اشاره کرده‌اند.

بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد اسید آسکوربیک و پرولین به‌عنوان دو ترکیب کلیدی در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک و متابولیک، نه تنها سلامت عمومی درختان پسته را ارتقاء داده، بلکه با بهبود کیفیت و کمیت محصول، راهکاری پایدار برای افزایش عملکرد در شرایط محیطی خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌آورد (Alnajjar et al., 2020؛ راهداری و همکاران، ۱۳۹۹). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد برون‌زاد پرولین و اسید آسکوربیک، به‌ویژه به‌صورت ترکیبی، اثرات چشمگیری بر بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک و کیفی میوه پسته داشت. این

یافته‌ها از جنبه‌های مختلف با گزارش‌های پیشین همخوانی داشته و تأییدکننده‌ی نقش اساسی این دو ترکیب در بهبود رشد و عملکرد گیاهان تحت شرایط مختلف می‌باشد.

بنابراین، پرولین به‌عنوان یک اسمولیت سازگار، در حفاظت از ساختارهای سلولی، تنظیم اسمزی و خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد نقش اساسی دارد (Szabados & Savouré, 2010; Ben *Rejeb et al*., 2014; Verbruggen & Hermans, 2008). مسیرهای بیوسنتزی پرولین و تنظیم آن در شرایط تنش توسط ژن‌های کلیدی مانند P5CS و آنزیم اورنیتین-δ-آمینوترانسفراز به‌طور گسترده بررسی شده است (Ábrahám *et al*., 2003; Székely *et al*., 2008; Roosens *et al*., 1998; Sekhar *et al*., 2007; Armengaud *et al*., 2004; Fichman *et al*., 2015). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تجمع پرولین علاوه بر نقش حفاظتی، در رشد و نمو میوه نیز مشارکت دارد (Trovato *et al*., 2008; Kavi Kishor & Sreenivasulu, 2014; Zhang *et al*., 2014). در پژوهش حاضر نیز کاربرد پرولین موجب افزایش سطح کلروفیل برگ، وزن خشک میوه و افزایش کیفیت میوه پسته رقم احمدآقایی شد که همسو با نتایج گزارش‌شده در پسته، انار و مرکبات است (Caronia *et al*., 2009; Takeuchi *et al*., 2008; El Sayed *et al*., 2014a; Farag & Shehata, 2023; Shehata & Farag, 2024).

اسید آسکوربیک یکی از مهم‌ترین آنتی‌اکسیدانت‌های غیرآنزیمی است که در خنثی‌سازی ROS، حفظ پایداری کلروفیل، تحریک سنتز RNA و پروتئین و در نتیجه بهبود رشد و کیفیت میوه نقش دارد (Akram *et al*., 2017; Chen *et al*., 2021; El-Beltagi *et al*., 2022). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کاربرد برون‌زاد این ترکیب می‌تواند کارایی فتوسنتز، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های محیطی ارتقا دهد (Kanwal *et al*., 2024; Chen *et al*., 2023; Johnson *et al*., 2024; Nirmal *et al*., 2025; Iftikhar *et al*., 2025). همسو با یافته‌های حاضر، محلول‌پاشی اسید آسکوربیک در گوجه‌فرنگی، گندم و بادام‌زمینی موجب بهبود رشد، افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و کاهش اثرات تنش شوری و فلزات سنگین شده است (Kaur & Gupta, 2023; Horchani *et al*., 2024; Chen *et al*., 2021).

اثر هم‌افزای پرولین و اسید آسکوربیک در این مطالعه به خوبی نشان داده شد. یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، مشاهده‌ی اثرات هم‌افزای پرولین و اسید آسکوربیک در بهبود کیفیت میوه بود. ترکیب این دو ماده توانست بیشترین تأثیر را در کاهش درصد پوکی (۷٪)، ناخندانی (۲۰٪) و بدشکلی میوه (۵٪) و همچنین افزایش خندانی (۸۰٪) داشته باشد. این موضوع به‌خوبی نشان می‌دهد که پرولین با ایفای نقش در حفاظت ساختاری و تنظیم اسمزی و اسید آسکوربیک با خاصیت

آنتی‌اکسیدانی و تحریک متابولیسم، مکانیزم‌های مکملی را فعال می‌سازند که در نهایت موجب بهبود رشد و کیفیت میوه می‌شود (Horchani *et al*., 2024; Shehata, 2025). یافته‌های مشابهی نیز در انار (El Sayed *et al*., 2014a; Farag & Shehata, 2023)، زیتون (El-Sayed *et al*., 2014b) و گوجه‌فرنگی (Kaur & Gupta, 2023) گزارش شده است.

نتایج حاضر با مطالعاتی که بر نقش پرولین در بهبود کیفیت میوه‌های انار، هلو و مرکبات تأکید داشته‌اند همسو است (Takeuchi *et al*., 2008; Caronia *et al*., 2009; Shehata & Farag, 2024). همچنین، یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های مرتبط با اسید آسکوربیک در بهبود کیفیت میوه‌های فلفل، گوجه و گندم نیز تطابق دارد (El-Beltagi *et al*., 2022; Chen *et al*., 2023; Kanwal *et al*., 2024). در نهایت، این نتایج با مطالعات اخیر که به‌طور هم‌زمان بر اثرات مکمل پرولین و اسید آسکوربیک تأکید داشته‌اند نیز مطابقت کامل دارد (Horchani *et al*., 2024; Johnson *et al*., 2024; Shehata, 2025).

بنابراین، پژوهش حاضر با تکیه بر شواهد تجربی و همخوانی با منابع معتبر بین‌المللی، نشان داد که محلول‌پاشی ترکیبی پرولین و اسید آسکوربیک می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی کارآمد در بهبود کیفیت میوه و ارتقای بازارپسندی پسته معرفی شود.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر به‌روشنی نشان داد که کاربرد برون‌زاد اسید آسکوربیک و پرولین، به‌ویژه در قالب تیمار توأم، نقشی بنیادین در بهبود صفات رشدی و عملکردی پسته رقم احمدآقایی داشت. افزایش سطح برگ، ارتقای وزن خشک میوه و بهبود سایر شاخص‌های رشدی در تیمارهای مورد بررسی، بیانگر آن است که این ترکیبات نه‌تنها به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌ها و اسمولیت‌های سازگار، بلکه به‌مثابه تنظیم‌کننده‌های مؤثر متابولیسم و تعادل هورمونی عمل می‌نمایند. همسویی کامل نتایج حاضر با گزارش‌های متعدد در گیاهان مختلف از جمله گوجه‌فرنگی، فلفل دلمه‌ای، مرکبات و انار، اعتبار علمی یافته‌های این تحقیق را دوچندان می‌کند و بر نقش کلیدی این ترکیبات در بهبود سازگاری گیاهان با شرایط محیطی تأکید دارد. به‌طور خاص، پرولین با ایفای نقش چندوجهی در تنظیم فشار اسمزی، تثبیت ساختارهای پروتئینی و غشایی و تأمین منابع کربن و نیتروژن، توانست ظرفیت سازگاری گیاه را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. از سوی دیگر، اسید آسکوربیک با کاهش تخریب کلروفیل، تحریک سنتز پروتئین و افزایش فتوسنتز، سبب بهبود رشد و عملکرد پسته رقم احمدآقایی گردید. هم‌افزایی این دو ترکیب در تیمار توأم، اثربخشی مضاعفی را نشان داد که حکایت از یک مکانیسم پیچیده و مکمل در بهبود کارایی فیزیولوژیک و افزایش کیفیت و عملکرد پسته رقم احمد آقایی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که

کاربرد هدفمند و تلفیقی اسید آسکوربیک و پرولین، رویکردی کارآمد برای بهبود رشد رویشی و زایشی و ارتقای کیفیت محصولات باغبانی است. این نتایج، چشم‌اندازی روشن برای توسعه فناوری‌های مدیریت تغذیه‌ای در کشاورزی پایدار فراهم می‌آورد و می‌تواند بستری برای تحقیقات آینده در راستای تبیین مکانیزم‌های مولکولی و ژنتیکی اثرات این ترکیبات باشد.

منابع

۱. آباده‌ای، فریده و پاک‌کیش، زهرا. (۱۳۹۶). نقش پرولین بر افزایش تشکیل میوه پسته رقم اوحدی در شرایط کم آبی. چهاردهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان. ایران.

۲. اصغری، محسن، معصومی، ابوالفضل.، و یوسفی راد، مجتبی. (۱۳۹۵). تأثیر محلولپاشی اسید آسکوربیک بر خصوصیات فیزیولوژیک و اجزای عملکرد ذرت شیرین تحت رژیم‌های آبیاری. مجله حقیقات غلات. ۶ (۲)، ۲۴۰-۲۲۹.

۳. آمار نامه وزارت جهاد کشاورزی. (۱۴۰۳). نتایج آمارگیری نمونه‌ای محصولات باغی. انتشارات وزارت جهاد کشاورزی. ۱۱۰ صفحه.

۴. پناهی، بهمن، اسماعیل پور، علی، فربود، فرزاد، مؤذن پورکرمانی، منصور، و فریور مهین، حسین. (۱۳۹۴). اصول آماده سازی زمین و کاشت پسته. نشرآموزش کشاورزی، تهران. ۲۷ صفحه.

۵. راهداری، پروانه، مظفری، اکرم. و پناهی، بهمن. (۱۳۹۱). بررسی اثر محلول پاشی اسید آمینه‌های آزاد بر برخی ویژگی‌های کیفی و کمی پسته (Pistacia vera L.) رقم فندقی. مجله زیست‌شناسی ایران. ۲۵ (۴)، ۶۱۷-۶۰۶.

۶. شاکر حسینی، راهبه، و آزاد بخت، مصطفی. (۱۳۸۳). ویتامین‌ها. دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی. نشر گرایش. ۱۹۷ صفحه.

7. Abdi, L. (2022). From Kashmir to the Ka’ba: A Journey to the Faith of the Aged Pilgrims. *miqat hajj*, *30*(119), 111-1.Abd-Elaziz, N. G., Mazherazz, A. M., & El-Habba, E. (2012). Effect of foliar spraying ascorbic acid on growth and chemical constituents of Khaya senegalensis growth under salt condition. *American-Eurasian Journal of Agriculture Environment Sciences, 1*(3), 207–214.

8. Abdelaal, K. A., Attia, K. A., Alamery, S. F., El-Afry, M. M., Ghazy, A. I., Tantawy, D. S., ... & Hafez, Y. M. (2020). Exogenous application of proline and salicylic acid can mitigate the injurious impacts of drought stress on barley plants associated with physiological and histological characters. *Sustainability*, *12*(5), 1736.

9. Abraham, E., Rigó, G., Székely, G., Nagy, R., Koncz, C., & Szabados, L. (2003). Light-dependent induction of proline biosynthesis by abscisic acid and salt stress is inhibited by brassinosteroid in *Arabidopsis*. *Plant Molecular Biology, 51*, 363–372.

10. Akram, N. A., Shafiq, F., & Ashraf, M. (2017). Ascorbic acid—a potential oxidant scavenger and its role in plant development and abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science, 8*, 613.
11. Aliei, M. M., Ashraffuzaman, M., Ismail, M. R., Shahidullah, S. M., & Prodhan, A. K. (2010). Influence of foliar applied on growth and yield contributing characters of white gourd (*Benincasa hispida*). *International Journal of Agriculture and Biology, 12*(3), 373–376.
12. Alnajjar, M. A., Alpresem, W. F., & Ibrahim, M. (2020). Effect of amino acid proline treatment on anatomical characteristics of leaves and roots of date palm seedlings *Phoenix dactylifera L.* developed under saline stress conditions. *Journal of Agriculture and Biological Sciences, 20*(1), 755–760.
13. Alvarez, M. E., Savouré, A., & Szabados, L. (2022). Proline metabolism as regulatory hub. *Trends in Plant Science*, *27*(1), 39-55.
14. Armengaud, P., Thiery, L., Buhot, N., Ghislaine, G. D. M., & Savouré, A. (2004). Transcriptional regulation of proline biosynthesis in *Medicago truncatula* reveals developmental and environmental specific features. *Physiologia Plantarum, 120*, 442–450.
15. Ben Rejeb, K., Abdelly, C., & Savouré, A. (2014). How reactive oxygen species and proline face stress together. *Plant Physiology and Biochemistry, 80*, 278–284.
16. Caronia, A., Gugliuzza, G., & Inglese, P. (2009). Influence of L-proline on *Citrus sinensis* (L.) ['New Hall' and 'Tarocco Scire'] fruit quality. In *XI International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production* (pp. 423–426). DOI
17. Chen, X., Han, H., Cong, Y., Li, X., Zhang, W., Wan, W., Cui, J., Xu, W., Diao, M., & Liu, H. (2023). The protective effect of exogenous ascorbic acid on photosystem inhibition of tomato seedlings induced by salt stress. *Plants, 12*(6), 1379.
18. Chen, Z., Cao, X.-L., & Niu, J.-P. (2021). Effects of exogenous ascorbic acid on seed germination and seedling salt-tolerance of alfalfa. *PLoS One, 16*, e0250926.
19. Dolatabadian, A., Mohammad, S. A., Sanvy, M., & Sharif, M. (2018). Effect of salicylic acid and salt on wheat seed germination. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B- Soil and Plant Science, 2*(1), 1–9.
20. El Sayed, O. M., El Gammal, O. H. M., & Salama, A. S. M. (2014). Effect of proline and tryptophan amino acids on yield and fruit quality of Manfalouty pomegranate variety. *Scientia Horticulturae*, *169*, 1-5.
21. El-Sayed, O. M., El-Gammal, O. H. M., & Salama, A. S. M. (2014). Effect of ascorbic acid, proline and jasmonic acid foliar spraying on fruit set and yield of Manzanillo olive trees under salt stress. *Scientia Horticulturae, 176*, 32–37.
22. El-Beltagi, H. S., Ahmad, I., Basit, A., & Shehata, W. (2022). Ascorbic acid enhances growth and yield of sweet peppers (*Capsicum annuum*) by mitigating salinity stress. *Gesunde Pflanzen, 74*(2).

23. Farag, K. M., & Shehata, R. S. (2023). Effect of proline and fruit bagging on the coloration of aril and peel of “Wonderful” pomegranates. *Horticulture International Journal, 7*(1), 21–26.
24. Fichman, Y., Gerdes, S. Y., Kovács, H., Szabados, L., Zilberstein, A., & Csonka, L. N. (2015). Evolution of proline biosynthesis: Enzymology, bioinformatics, genetics, and transcriptional regulation. *Biological Reviews, 90*, 1065–1099.
25. Gaafar, A. A., Ali, S. I., El-Shawadfy, M. A., Salama, Z. A., Sekara, A., Ulrichs, C., & Abdelhamid, M. T. (2020). Ascorbic acid induces the increase of secondary metabolites, antioxidant activity, growth, and productivity of the common bean under water stress conditions. *Journal of Agriculture and Biology Science, 9*(5), 62–67.
26. Horchani, F., Bouallegue, A., Namsi, A., & Abbes, Z. (2024). Simultaneous application of ascorbic acid and proline as a smart approach to mitigate the adverse effects of salt stress in wheat (*Triticum aestivum*). *Biology Bulletin, 51*, 1346–1363.
27. Hosseinifard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, Ł., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(9), 5186.
28. Hendawy, S. F., Ezzner, B., & EL-Din, A. A. (2020). Growth and yield of *Foeniculum vulgar var. azoricum* influenced by some vitamins and amino acids. *Ozean Journal of Applied Science, 3*(1), 113–123.
29. Iftikhar, H., Arshad, A., Tamreen, Y., & Shahid, S. (2025). Influence of exogenous ascorbic acid levels on growth and physiological responses of wheat (*Triticum aestivum*) exposed to drought stress. *Indus Journal of Bioscience Research, 3*(4), 424–437.
30. Johnson, R., Joel, J. M., Anjitha, K. S., Tóth, S. Z., & Puthur, J. T. (2024). Ascorbate, as a versatile regulator of plant development: practical implications for enhancing crop productivity, quality, and postharvest storage. *Horticultural Plant Journal*.
31. Kaur, H., & Gupta, N. (2023). Seed treatment with ascorbic acid and proline improved salt tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum L. cv. Roma*) by enhancing antioxidant enzyme activity. *Plant Physiology Reports, 28*, 568–576.
32. Kanwal, R., Maqsood, M. F., Shahbaz, M., Naz, N., Zulfiqar, U., Ali, M. F., ... & Alsakkaf, W. A. (2024). Exogenous ascorbic acid as a potent regulator of antioxidants, osmo-protectants, and lipid peroxidation in pea under salt stress. *BMC Plant Biology*, *24*(1), 247.
33. .
34. Leisinger, T. H. O. M. A. S. (1987). Biosynthesis of proline. *Escherichia coli and Salmonella typhimurium: Cellular and Molecular Biology.*, 346-351.
35. Liu, P., Gupta, N., Jing, Y., & Zhang, H. (2017). Age-related changes in polyamines in memory-associated brain structures in rats. *Journal of Neuroscience, 155*(3), 789–796.
36. Nikoogoftar-Sedghi, M., Rabiei, V., Razavi, F., Molaei, S., & Khadivi, A. (2018). Ascorbic acid foliar application: A novel approach enhancing antioxidant capacity and nutritional

quality of pistachio (*Pistacia vera* L.). *Iranian Journal of Agriculture Science, 24*(1), 24–31.

37. Nirmal, D., Teraiya, S., Patel, H., & Joshi, P. (2025). Studies on effect of exogenous application of ascorbic acid on growth, photosynthetic pigment and oxidative defence in 'groundnut'(Arachis hypogaea L.) under lead (Pb) stress. *Discover Plants*, *2*(1), 169.
38. Okba, S. K., Mazrou, Y., Mikhael, G. B., Farag, M. E. H., & Alam-Eldein, S. M. (2022). Magnetized water and proline to boost the growth, productivity and fruit quality of 'Taifi' pomegranate subjected to deficit irrigation in saline clay soils of semi-arid Egypt. *Horticulturae, 8*, 564.
39. Roosens, N. H. C. J., Thu, T. T., Iskandar, H. M., & Jacobs, M. (1998). Isolation of the Ornithine-δ-Aminotransferase cDNA and effect of salt stress on its expression in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology, 117*, 263–271.
40. Reda, F., Abdel-rahim, E. A., El-baroty, G. S. A., & Ayad, H. S. (2017). Response of essential oil, phenolic components and polyphenol oxidative activity of thyme (*Thymus vulgaris*) to some bioregulators and vitamins. *Journal of Agriculture and Biology, 7*(5), 735–739.
41. Sahraei, F., Solgi, M., & Taghizadeh, M. J. (2023). The application of methyl jasmonate in combination with ascorbic acid on morphological traits and some biochemical parameters in red willow. *Journal of Biology Plant, 29*(2), 185–193.
42. Sekhar, P. N., Amrutha, N. R., Sangam, S., Verma, D. P. S., & Kavi Kishor, P. B. (2007). Biochemical characterization, homology modeling and docking studies of ornithine δ-aminotransferase an important enzyme in proline biosynthesis of plants. *Journal of Molecular Graphics and Modelling, 26*, 709–719.
43. Shehata, R. S. (2025). Proline in action: Enhancing fruit quality. *DYSONA - Applied Science, 6*, 8–15.
44. Shehata, R. S., & Farag, K. M. (2024). Effect of potassium silicate, glycine betaine and proline on fruit quality of peaches in newly reclaimed land exposed to heat stress. *Horticultural Science, 41*(2), 42–49.
45. Szabados, L., & Savouré, A. (2010). Proline: A multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science, 15*(2), 89–97.
46. Székely, G., Abraham, E., Cselo, A., Rigo, G., Zsigmond, L., Csiszar, J., Ayaydin, F., Strizhov, N., Jasik, J., Schmelzer, E., Koncz, C., & Szabados, L. (2008). Duplicated P5CS genes of *Arabidopsis* play distinct roles in stress regulation and developmental control of proline biosynthesis. *Plant Journal, 53*, 11–28.
47. Takeuchi, M., Arakawa, C., Kuwahara, Y., & Gemma, H. (2008). Effects of L-proline foliar application on the quality of 'Kosui' Japanese pear. In *X International Pear Symposium* (549–554).
48. Talaie, A., Seyedi, M., Panahi, B., & Khezri, M. (2016). Effects of shoot girdling and urea combined with 6-

benzyl adenine on abscission of inflorescence buds in “Ohadi” pistachio cultivar (*Pistacia vera* L.). *International Journal of Agriculture and Biology, 8*, 474–476.

49. Trovato, M., Mattioli, R., & Costantino, P. (2008). Multiple roles of proline in plant stress tolerance and development. *Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche, 19*, 325–346.
50. Verbruggen, N., & Hermans, C. (2008). Proline accumulation in plants: A review. *Amino Acids, 35*, 753–759.
51. Wang, R. F., Xie, W. D., Zhang, Z., Xing, D. M., Ding, Y., Wang, W., Ma, C., & Du, L. J. (2018). Bioactive compounds from the seeds of *Punica granatum* (Pomegranate). *Journal of Natural Products, 67*(4), 2096–2098.
52. Zhang, M., Huang, H., & Dai, S. (2014). Isolation and expression analysis of proline metabolism-related genes in *Chrysanthemum lavandulifolium*. *Gene, 537*, 203–213.

Combined Application of Ascorbic Acid and Proline: A Novel Approach to Enhancing Yield and Fruit Quality of *Pistacia vera* L. cv. Ahmad Aghaii

Maryam Mohammadi[1], Zahra Pakkish[2], Soheila Mohammad Rezakani[3*]

Abstract

Enhancing the quantitative and qualitative attributes of horticultural crops requires advanced physiological approaches and the application of bioactive compounds that can optimize both vegetative and reproductive growth. Proline and ascorbic acid, as two key molecules with known osmoprotective and antioxidant functions, possess significant potential to improve the growth parameters and fruit quality of pistachio trees. To evaluate their effectiveness, a factorial experiment was conducted using a randomized complete block design with four replications on *Pistacia vera* L. cv. Ahmadaghaii. Treatments included proline (0.5 and 1 mM), ascorbic acid (400 mg L^{-1}), their combined applications at two levels, and a control. Foliar sprays were applied at two developmental stages (60 and 75 days after full bloom), and traits such as leaf area, chlorophyll index, percentage of blank nuts, split nuts, non-split nuts, fruit deformity, fruit dry weight, nut size (ounce), and yield were measured. The results revealed a pronounced synergistic effect of the combined treatments. The application of 1 mM proline + 400 mg L^{-1} ascorbic acid at 60 days after full bloom resulted in the highest improvements in leaf area (over 66%), chlorophyll index (up to 49%), fruit dry weight (over 42%), and yield (71%) compared to the control. Moreover, this treatment significantly reduced the percentages of fruit blankness, non-splitting, and deformity (more than 70% reduction relative to the control). Although individual applications of proline or ascorbic acid exerted positive effects on some parameters, the most consistent and remarkable responses were observed with combined application. Overall, the findings suggest that the integrated use of proline and ascorbic acid, particularly at sensitive early fruit development stages, represents a highly effective physiological strategy to improve growth indices, enhance nut quality, and increase marketability of Ahmadaghaii pistachio. These insights provide a novel perspective for nutritional and physiological management in pistachio orchards.

Key words: Pistachio, Yield, Ascorbic acid, Proline

1 Department of Horticultural Sciences, Agricultural College, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2 Department of Horticultural Sciences, Agricultural College, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3 Researcher, Department of Crop and Horticultural Science Research, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Jiroft, Iran.
∗ Corresponding author: smohammadrezakhani@yahoo.com.