نهمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی فیزیولوژی گیاهی
9th National and 1st International Conference of Plant Physiology
۱۳–۱۱ بهمن ۱۴۰۴، دانشگاه گیلان

تأثیر تنظیم‌کننده رشد فورکلرفنورون (CPPU) بر عملکرد کمی و برخی صفات کیفی غده سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.)

محسن شیردل*[1]، یوسف احمدی[2]، مجتبی فرد[1]، زینب لک‌زاده[1] و سعید عشقی[1]
[1]* گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز
[2] گروه ژنتیک و به نژادی، پژوهشکده گل و گیاهان زینتی ، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، محلات، ایران

چکیده

سیب‌زمینی از محصولات راهبردی کشاورزی است که نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی، به‌ویژه در آسیا و ایران، ایفا می‌کند. غده‌زایی این گیاه فرایندی وابسته به تعادل هورمونی بوده و استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد می‌تواند به بهبود عملکرد و کیفیت محصول کمک کند. این پژوهش با هدف بررسی اثر غلظت‌های مختلف سایتوکینین مصنوعی فورکلرفنورون (CPPU) بر غده‌زایی، عملکرد کمی و برخی صفات کیفی سیب‌زمینی انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار سطح CPPU شامل شاهد، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و چهار تکرار، در منطقه اقلید استان فارس طی سال ۱۴۰۴ اجرا گردید. محلول‌پاشی CPPU در مرحله گلدهی انجام شد. نتایج نشان داد که CPPU تأثیر معنی‌داری بر تعداد غده در بوته، وزن غده‌های هر بوته، درصد ماده خشک و میزان کربوهیدرات‌های محلول داشت، در حالی که طول، قطر و میزان نشاسته غده تحت‌تأثیر معنی‌داری قرار نگرفتند. بیشترین مقادیر صفات پاسخ‌دهنده در غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. همچنین تحلیل همبستگی بیانگر نقش کلیدی افزایش تعداد غده در بهبود عملکرد نهایی بود. به‌طور کلی، استفاده هدفمند از CPPU می‌تواند به‌عنوان راهکاری مدیریتی مؤثر برای افزایش عملکرد و بهبود برخی ویژگی‌های کیفی سیب‌زمینی در شرایط زراعی ایران پیشنهاد شود.

واژگان کلیدی: امنیت غذایی، سیتوکنین، عملکرد غده، قدرت مخزن، وزن غده.

مقدمه

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی جهان محسوب می‌شود که به‌عنوان منبعی غنی از کالری، ویتامین‌ها و عناصر معدنی، نقش اساسی در امنیت غذایی جهانی و به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه از جمله ایران ایفا می‌کند. این محصول پس از گندم، برنج و ذرت در جایگاه چهارم تولید جهانی قرار دارد و سهم قابل‌توجهی در تغذیه انسان و صنایع تبدیلی دارد (لیموچی، ۱۳۹۴). بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، سطح زیر کشت سیب‌زمینی در جهان بیش از ۱۶ میلیون هکتار و تولید آن بالغ بر ۳۸۳ میلیون تن است که نشان‌دهنده اهمیت اقتصادی و تغذیه‌ای این محصول می‌باشد. غده‌زایی سیب‌زمینی فرایندی پیچیده است که تحت‌تأثیر عوامل ژنتیکی، محیطی و به‌ویژه تنظیمات هورمونی قرار دارد. در این میان، سایتوکینین‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین هورمون‌های گیاهی، با تحریک تقسیم سلولی، تنظیم تمایز بافتی و هدایت مواد فتوسنتزی به اندام‌های ذخیره‌ای، نقش کلیدی در آغاز و توسعه غده‌ها ایفا می‌کنند (Lomin *et al.*, 2020). پژوهش‌های فیزیولوژیک و مولکولی نشان داده‌اند که افزایش سطح سایتوکینین‌ها موجب تحریک غده‌زایی در استولون‌ها و فعال‌سازی ژن‌های مرتبط با این فرایند می‌شود (Kolachevskaya *et al.*, 2021).

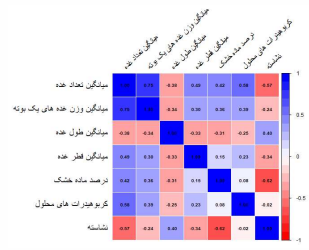
فورکلرفنورون (CPPU) به‌عنوان یک سایتوکینین مصنوعی قوی، به‌طور گسترده برای افزایش تقسیم سلولی، رشد اندام‌های ذخیره‌ای و بهبود عملکرد محصولات زراعی و باغی مورد استفاده قرار گرفته است (Davies, 2004). با این حال، اثر CPPU به‌شدت وابسته به غلظت مصرفی، مرحله رشدی و شرایط محیطی بوده و نتایج متناقضی در مطالعات مختلف گزارش شده است (Abouelsaad & Brengi, 2022; Gabr *et al.*, 2022). ازاین‌رو، با توجه به اهمیت راهبردی سیب‌زمینی در ایران و تنوع شرایط اقلیمی کشور، انجام پژوهش‌های مزرعه‌ای بومی برای تعیین غلظت بهینه CPPU و ارزیابی اثر آن بر غده‌زایی، عملکرد کمی و صفات کیفی غده ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۴ در مزرعه‌ای واقع در منطقه اقلید (استان فارس) با ارتفاع حدود ۲۲۰۰ متر از سطح دریا اجرا شد. از ریزغده‌های (مینی‌تیوبر) رقم سیفرا در کلاس سایز S (قطر ۲۵-۱۰ میلی‌متر) استفاده شد. شروع کاشت ریز غده‌ها اول تیرماه ۱۴۰۴ بود و برداشت در تاریخ ۲۰ مهرماه ۱۴۰۴ انجام شد. از SITOFEX شرکت (Alzchem, Germany) استفاده شد. زایتوفیکس در ۴ غلظت صفر (آب مقطر)، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به صورت محلول‌پاشی قبل از گلدهی بوته‌ها و در مرحله استولون‌زایی (تقریبا ۴۰ روز پس از کاشت) انجام شد. آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تیمار غلظت CPPU در چهار تکرار اجرا گردید. عملیات زراعی (آبیاری، کوددهی، کنترل علف‌های هرز) بر اساس توصیه‌های رایج منطقه به‌صورت یکسان برای همه تیمارها انجام گرفت.

در زمان برداشت سیب‌زمینی، از هر کرت ۵ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و تعداد غده هر بوته شمارش و وزن غده‌های هر بوته نیز اندازه‌گیری شد. میانگین ۵ بوته به‌ازای هر کرت محاسبه گردید. تعداد ۱۰ غده سالم به‌طور تصادفی از هر کرت انتخاب و طول، قطر آن‌ها با استفاده خط‌کش اندازه‌گیری شد و میانگین طول و قطر بر حسب میلی‌متر گزارش گردید. از هر بلوک میزان ۲۰۰ گرم نمونه غده (ترکیبی از غده‌های کوچک و بزرگ) برداشت و پس از خشک کردن در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت، درصد ماده خشک محاسبه شد. برای اندازه‌گیری قند و نشاسته از نمونه‌های خشک غده‌ها استفاده شد. برای این منظور ۱۰ میلی‌گرم از نمونه پودر شده غده سیب‌زمینی به داخل یک میکروتیوپ ریخته شد و با استفاده از یک میلی‌لیتر از اتانول ۸۰ درصد همگن شد. پس از آن میکروتیوپ به مدت ۱۰ دقیقه در ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از آن عصاره روبی برداشته شد و یک میلی‌لیتر دیگر اتانول ۸۰ درصد اضافه شد و دوباره سانتریفیوژ شد. عصاره روبی برداشته و به عصاره قبلی اضافه شد و برای سنجش کربوهیدرات‌های محلول مورد استفاده قرار گرفت. از رسوب و باقی‌مانده میکروتیوپ برای سنجش نشاسته استفاده شد. قند و نشاسته با استفاده از اسپکتروفتومتر (Epoch, USA Bio Tek Instruments, Inc) در طول موج‌های ۴۹۰ و ۶۲۰ نانومتر قرائت شد و بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک گزارش گردید (Abouelsaad and Brengi, 2022).

آزمایش به صورت بلوک‌های کامل تصادفی طراحی شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ مورد واکاوی آماری قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد و رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel 2021 انجام شد. همبستگی داده‌ها با استفاده از نرم افزار R version 4.4.2 انجام شد.



شکل ۱- همبستگی بین صفات سیب‌زمینی تحت تاثیر غلظت‌های مختلف CPPU

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای مختلف CPPU بر صفت تعداد غده در سطح احتمال یک درصد و صفات وزن غده‌های یک بوته، درصد ماده خشک و کربوهیدرات‌های محلول در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار می‌باشد و بر میانگین طول و قطر غده و میزان نشاسته معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۱). بیشترین تعداد غده در تیمار ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU با میانگین ۱۹/۴۰ غده در بوته بود و کمترین میزان در تیمار شاهد (آب مقطر) با میانگین ۱۱/۷۰ غده در بوته بود که از لحاظ آماری تفاوتی با تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU نداشت (جدول ۲). افزون بر این بیشترین وزن غده‌های یک بوته در تیمار ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU با میانگین ۲۵۴۰ گرم به دست‌آمد که با تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۲). نتایج نشان داد که بیشترین درصد ماده خشک در تیمار ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU با میانگین ۱۷/۷۶ درصد بود که با تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU تفاوتی نداشت و کمترین در ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU با میانگین ۱۵/۷۱ درصد بود که با تیمار شاهد تفاوتی نداشت (جدول ۲). بیشترین کربوهیدرات‌های محلول در ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU با میانگین ۵/۱۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک به دست‌آمد و کمترین میزان در تیمار شاهد با میانگین ۲/۸۰ میلی‌گرم در گرم وزن خشک بود (جدول ۲). نتایج همبستگی صفات نشان داد که تعداد غده با وزن غده‌های یک بوته همبستگی مثبت و نسبتاً قوی دارد (r= ۰/۷۵)، که بیانگر آن است افزایش تعداد غده‌ها نقش مستقیمی در افزایش عملکرد نهایی بوته ایفا می‌کند (شکل ۱). در مقابل، تعداد غده با طول غده همبستگی منفی متوسطی نشان داد (r=-۰/۳۸) که حاکی از آن است با افزایش تعداد غده، رشد طولی هر غده تا حدی محدود می‌شود؛ این پدیده به رقابت بین غده‌ها برای جذب مواد فتوسنتزی نسبت داده می‌شود. همچنین همبستگی مثبت تعداد غده با درصد ماده خشک (r= ۰/۴۲) و کربوهیدرات‌های محلول (r=۰/۵۸) نشان می‌دهد که افزایش تعداد غده‌ها لزوماً موجب کاهش کیفیت نشده و حتی می‌تواند با بهبود تجمع مواد پرورده همراه باشد. از سوی دیگر، همبستگی منفی و نسبتاً قوی بین تعداد غده و نشاسته (r =-۰/۵۷) نشان می‌دهد که افزایش تعداد غده ممکن است موجب کم شدن ذخایر نشاسته‌ای در هر غده شود. همچنین همبستگی مثبت وزن غده‌های یک بوته با کربوهیدرات‌های محلول (r=۰/۳۹) نشان می‌دهد که افزایش عملکرد بیشتر با افزایش انتقال قندهای محلول مرتبط بوده است. در مجموع، این الگوی همبستگی نشان می‌دهد که CPPU عمدتاً از طریق افزایش تعداد غده و بهبود تخصیص کربوهیدرات‌ها، عملکرد را افزایش داده است (شکل ۱).

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد CPPU به‌عنوان یک سایتوکینین مصنوعی، تأثیر معنی‌داری بر برخی از صفات کلیدی مرتبط با غده‌زایی و کیفیت غده سیب‌زمینی دارد، به‌گونه‌ای که پاسخ گیاه به غلظت‌های مختلف CPPU متفاوت بوده است. معنی‌دار شدن صفت تعداد غده در سطح احتمال یک درصد نشان می‌دهد که CPPU به‌طور مستقیم در فرآیند آغاز غده‌زایی نقش ایفا کرده است. سایتوکینین‌ها با تحریک تقسیم سلولی در مریستم‌های استولونی و افزایش فعالیت نواحی رشد، آغاز تشکیل غده را تسهیل می‌کنند. مطالعات مولکولی نشان داده‌اند که افزایش سطح سایتوکینین منجر به فعال‌سازی ژن‌های مرتبط با شروع غده‌زایی از جمله StLOG و StRR شده و تغییر فاز استولون به غده را تسریع می‌کند (Lomin *et al.*, 2020). افزایش تعداد غده در تیمار ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU در این پژوهش، مؤید نقش کلیدی این هورمون در تنظیم آغاز غده‌زایی است. از سوی دیگر، عدم معنی‌داری طول و قطر غده در پاسخ به تیمارهای CPPU نشان می‌دهد که اثر اصلی این تنظیم‌کننده رشد، بیش از آنکه بر رشد ابعادی هر غده متمرکز باشد، بر افزایش تعداد مخازن ذخیره‌ای (Sink) در گیاه اثرگذار بوده است. این یافته با گزارش محققان دیگر هم‌خوانی دارد که بیان کردند سایتوکینین‌ها عمدتاً از طریق افزایش تعداد غده‌ها، عملکرد را تحت تأثیر قرار می‌دهند و رشد ابعادی غده‌ها بیشتر تابع شرایط تغذیه‌ای و تعادل هورمونی با جیبرلین‌هاست (Kolachevskaya *et al.*, 2021). نتایج نشان داد که وزن غده‌های یک بوته در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار است و CPPU توانسته است با افزایش تعداد غده و بهبود تخصیص مواد فتوسنتزی، عملکرد نهایی بوته را افزایش دهد. بالاترین وزن غده‌های یک بوته در تیمار ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU به‌دست آمد که این موضوع بیانگر افزایش قدرت مخزن در گیاهان تیمارشده است. سایتوکینین‌ها با افزایش تأخیر در پیری برگ‌ها و حفظ فعالیت فتوسنتزی، منبع تأمین کربوهیدرات را تقویت کرده و در نتیجه مواد بیشتری به غده‌ها منتقل می‌شود (Davies, 2004). این یافته با نتایج با پژوهش‌گبر که افزایش عملکرد سیب‌زمینی را در پاسخ به کاربرد سایتوکینین‌ها گزارش کرد مطابقت دارد (Gabr *et al.*, 2022). در این پژوهش، درصد ماده خشک غده‌ها نیز تحت تأثیر CPPU به‌طور معنی‌داری تغییر کرد، به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار ماده خشک در غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. ماده خشک یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفی سیب‌زمینی، به‌ویژه برای مصارف صنعتی است و افزایش آن نشان‌دهنده بهبود تجمع مواد آلی در غده‌هاست. افزایش ماده خشک می‌تواند ناشی از بهبود انتقال و ذخیره‌سازی کربوهیدرات‌ها در غده باشد که تحت تأثیر تنظیم‌کننده‌های رشد و تغییر در تعادل منبع–مخزن اتفاق می‌افتد (Lomin *et al.*, 2020). با این حال، عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمار ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU نشان می‌دهد که پاسخ ماده خشک به CPPU دارای آستانه اشباع بوده و افزایش بیش از حد غلظت الزاماً منجر به بهبود بیشتر این صفت نمی‌شود. نتایج مربوط به کربوهیدرات‌های محلول از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش محسوب می‌شود. افزایش معنی‌دار کربوهیدرات‌های محلول در تیمار ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU نشان می‌دهد که این ترکیب سایتوکینینی بر متابولیسم کربوهیدرات‌ها اثرگذار بوده است. سایتوکینین‌ها می‌توانند از طریق تنظیم فعالیت آنزیم‌های دخیل در تبدیل ساکارز، مانند اینورتازها و سوکروز سنتاز، الگوی تجمع قندها را در غده تغییر دهند (Abouelsaad and Brengi, 2022). افزایش کربوهیدرات‌های محلول می‌تواند نشان‌دهنده افزایش انتقال فتواسیمیلات‌ها به غده‌ها یا تغییر در تعادل بین سنتز نشاسته و تجمع قندهای ساده باشد. با وجود افزایش کربوهیدرات‌های محلول، میزان نشاسته تحت تأثیر تیمارهای CPPU قرار نگرفت. این نتیجه حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که CPPU در شرایط این آزمایش، بیشتر موجب تغییر در بخش محلول کربوهیدرات‌ها شده و مسیرهای سنتز نشاسته را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار نداده است. مشخص شده است که برخی سایتوکینین‌ها مانند CPPU و کینتین می‌توانند موجب افزایش قندهای احیاکننده شوند بدون آنکه لزوماً نشاسته افزایش یابد (Abouelsaad and Brengi, 2022). این موضوع احتمالاً به تنظیم مسیرهای آنزیمی و زمان کاربرد CPPU در مرحله خاصی از رشد غده مرتبط است.

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده سیب‌زمینی تحت‌تاثیر غلظت‌های مختلف CPPU

منابع تغییر	درجه آزادی	تعداد غده	وزن غده‌های یک بوته	طول غده	قطر غده	درصد ماده خشک	کربوهیدرات‌های محلول	نشاسته
بلوک	۳	۰/۰۹	۳۱۴۲۸۸۴۴	۲۲/۲۲	۱۰/۰۲	۰/۲۸	۴/۲۸	۰/۰۱۳
تیمار	۳	۲۱/۸۰**	۶۵۲۱۲۵۰/۰۰*	۲۲/۵۸**	۲۲۵۵**	۲/۰۳*	۲/۲۳*	۰/۰۲۳**
خطا	۹	۲/۷۱	۴۰۱۰۱۷۸	۱۵/۸۸	۱۶/۰۳	۰/۷۷	۰/۹۵	۰/۰۱۱
ضریب تغییرات (C.V.%)		۱۱/۰۷	۹/۰۰	۲۵/۲	۵/۴۱	۵/۲۷	۲۵/۵۵	۱۶/۰۳

*، ** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری در آزمون LSD می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه میانگین صفت‌های مختلف سیب‌زمینی تحت‌تاثیر غلظت‌های مختلف CPPU

تیمار	تعداد غده	وزن غده	میانگین وزن غده در بوته	درصد ماده خشک	کربوهیدرات محلول	نشاسته
شاهد (آب مقطر)	۱۱/۷۰ c	۱۹۲۲/۵۰ c	۹۰۶/۲۰ c	۱۵/۷۱ b	۲/۸۰ c	۱۹/۰۲ a
۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU	۱۵/۵۰ b	۲۲۵۸/۲۰ a	۸۸۲/۸ b	۱۶/۹۳ a	۴/۱۰ b	۱۸/۰۳ a
۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU	۱۶/۲۰ b	۲۱۴۵/۵۰ b	۸۸۸/۸ b	۱۶/۹۷ a	۴/۷۳ a	۱۸/۰۳ a
۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU	۱۹/۴۰ a	۲۵۴۰/۷۰ a	۸۹۵/۰ b	۱۷/۷۶ a	۵/۱۳ a	۱۸/۵۳ a

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد در آزمون LSD می‌باشد.

منابع

لیموچی، ک. (۱۳۹۴). تاثیر فواصل ردیف کاشت و تداخل علف‌های هرز بر عملکرد غده و برخی صفات زراعی سیب‌زمینی در شرایط خوزستان. نشریه زراعت (پژوهش و سازندگی)، ۳۸(۳)، ۹۹-۱۰۶. https://doi.org/10.22092/aj.2015.106728

Abouelsaad, I., and Brengi, S. H. (2022). Effects of cytokinin types and concentrations on potato growth, yield, and quality under field conditions. *Alexandria Science Exchange Journal,* 43(3), 495-502.

Davies, P. J. (Ed.). (2004). Plant hormones: biosynthesis, signal transduction, action!. *Springer Science & Business Media.*

Gabr, S., Roshdy, A. E. D. H., Mostafa, S., Abo El-Saad, I., and Abdel-Hamid, M. (2022). Impacts of potassium, auxin and cytokinins on yield and quality of potato cv. Hermes. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences,* 21(3), 101-126.

Kolachevskaya, O. O., Myakushina, Y. A., Getman, I. A., Lomin, S. N., Deyneko, I. V., Deigraf, S. V., and Romanov, G. A. (2021). Hormonal regulation and crosstalk of auxin/cytokinin signaling pathways in potatoes in vitro and in relation to vegetation or tuberization stages. *International Journal of Molecular Sciences,* 22(15), 8207.

Lomin, S. N., Myakushina, Y. A., Kolachevskaya, O. O., Getman, I. A., Savelieva, E. M., Arkhipov, D. V., Deigraf, S.V., & Romanov, G. A. (2020). Global view on the cytokinin regulatory system in potato. *Frontiers in Plant Science,* 11, 613624.