نقش پتاسیم در کاهش تنش کادمیم و ترکیب شیمیایی میوه گوجه‌فرنگی

مریم کامرانی آلیله[۱]، حنیفه سید حاجی زاده[۱*]، فرهاد بهتاش[۱] و سید بهمن موسوی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۱۷)

چکیده

گیاهان اغلب کادمیم را در بخش خوراکی خود تجمع می‌دهند که باعث کاهش عملکرد و کیفیت محصول می‌شود. بدین منظور، آزمایشی به صورت فاکتوریل، بر پایه طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار، برای تعیین اثر غلظت‌های مختلف پتاسیم (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در گوجه‌فرنگی‌های تحت تنش کادمیم (صفر، ۲ و ۴ میلی‌گرم بر لیتر) و ارزیابی کارایی آن در کاهش اثرهای تنش کادمیم صورت گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از کادمیم موجب افزایش معنی‌داری در غلظت کادمیم تجمع یافته در میوه شد. وجود کادمیم در محلول غذایی باعث کاهش معنی‌داری در وزن تر و خشک میوه، میزان سفتی، اسیدیته قابل تیتراسیون و در نهایت عملکرد گردید. همچنین، اثر منفی سمیت تنش کادمیم بر اسیدیته و سفتی محصول با افزایش مقدار پتاسیم در ترکیب با آن، کاهش یافته و پتاسیم باعث افزایش مقدار مواد جامد محلول و بهبود رنگ‌گیری میوه با تأثیر بر پارامتر a^* گردید و میوه‌ها از رنگ قرمز بیشتر و درجه رسیدگی بالاتری برخوردار بودند. تیمارها هیچ اثر معنی‌داری بر pH و ضخامت پریکارپ میوه نداشتند.

کلمات کلیدی: ***Lycopersicon esculentum* cv. Super Chief**، فلزات سنگین، ثابت پایداری غشا، کیفیت میوه

مقدمه

آلودگی محیط‌زیست به وسیله فلزات سنگین در اثر فعالیت‌های معدن‌کاری و صنعتی در قرون ۱۹ و ۲۰ میلادی افزایش یافته است. به‌طوری که سطح وسیعی از این آلودگی در اثر عناصر سنگین کادمیم، مس، جیوه و سرب می‌باشد (۴۷). یکی از راهکارهای بهبود امنیت غذایی جمعیت رو به افزایش جهان، افزایش مقدار تولید در واحد سطح می‌باشد. از مهم‌ترین عوامل مرتبط با تولید محصول، تغذیه صحیح گیاهان است که نقش قابل ملاحظه‌ای در افزایش عملکرد دارد. ولی کشاورزی امروزه، به لحاظ عدم رعایت مصرف بهینه نهاده‌های کشاورزی و نیز آلودگی محیط‌زیست به وسیله فلزات سنگین با مشکلات زیادی مواجه شده است. سارکر و همکاران (۳۹) بیان کردند که استفاده از کودهای شیمیایی کامل در افزایش میزان محصول نقش به‌سزایی دارد. نیتروژن، فسفر و پتاسیم بر ترکیبات میوه گوجه‌فرنگی تأثیر می‌گذارد. نیتروژن باعث رشد سریع گیاه، افزایش اندازه و کیفیت بالای برگ و افزایش تعداد دانه‌ها و

۱. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه
*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hajizade@maragheh.ac.ir

میوه می‌شود. نیتروژن یکی از اجزای سازنده اسیدهای آمینه می‌باشد که برای سنتز پروتئین مورد نیاز است و بیشترین تأثیر را بر میزان قند میوه گوجه‌فرنگی دارد. استفاده از فسفر طی رشد گیاه گوجه‌فرنگی باعث کاهش اسیدیته میوه و استفاده از پتاسیم باعث افزایش عملکرد می‌شود. کادمیم (Cd) یکی از فلزات سنگین با تحرک زیاد در محیط‌زیست است (۴۲). نیمه عمر بیولوژیک این عنصر ۳۰ سال است (۴۵) که به راحتی توسط ریشه گیاهان جذب شده و به اندام‌های مختلف گیاه منتقل می‌گردد (۴۸). کاهش و توقف رشد ریشه، چوب‌پنبه‌ای شدن و صدمه به ساختمان خارجی و داخلی ریشه، کاهش هدایت هیدرولیکی آب در ریشه، تداخل با جذب و انتقال طبیعی عناصر غذایی، کاهش میزان کلروفیل، کاهش عملکرد و کلروز برگ از علائم عمومی ناشی از جذب مقادیر اضافی کادمیم می‌باشد (۲۹). کادمیم با اختلال در فتوسنتز، تنفس و متابولیسم نیتروژن در گیاهان منجر به کاهش رشد می‌گردد که به دنبال آن عملکرد نیز کاهش می‌یابد (۱۳). در حضور یون کادمیم، رشد گیاه بسیار کاهش می‌یابد. در حقیقت، کادمیم از تقسیم سلول‌های منطقه مریستمی و رشد سلول‌های منطقه رشد جلوگیری می‌کند (۱۴). همچنین، با وجود رنگیزه‌های فتوسنتزی، افزایش کادمیم در بافت‌های گیاهی سبب کاهش فتوسنتز از طریق اثر مخرب آن بر واکنش‌های تاریکی شده و در فعالیت آنزیم‌های لازم طی واکنش‌های تاریکی اختلال ایجاد می‌کند (۱). از سوی دیگر، چون تجمع کادمیم در برگ‌ها بیش از سایر قسمت‌های گیاه است، کادمیم با تخریب کلروپلاست برگ‌های جوان باعث کاهش فتوسنتز می‌شود (۴۱). طبق اعلام سازمان جهانی بهداشت، مصرف کادمیم نباید بیش از ۰/۴–۰/۵ میلی‌گرم در هفته باشد. همچنین، حد مجاز کادمیم در محصولات کشاورزی ۰/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم است (۷). یکی از منابع مهم آلودگی خاک‌های زراعی با کادمیم، مصرف کودهای فسفاتی و سولفات روی است. غلظت کادمیم در کودهای فسفاتی از ۱۰ تا ۱۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر می‌باشد (۸). با این حال، جهت افزایش عملکرد و نیز بالا بردن کیفیت محصولات تولیدی، بخصوص در محصولات باغبانی، به ناچار از کودهای شیمیایی استفاده می‌گردد.

یکی از عناصر پُرمصرف در کودهای کامل، پتاسیم (K) می‌باشد که یک فلز قلیایی بوده و حدود ۲/۴ درصد از وزن پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. پتاسیم از نظر فراوانی هفتمین عنصر بوده و یک عنصر ضروری برای همه موجودات زنده است (۲۸). پتاسیم تأثیر زیادی بر کیفیت محصول دارد. غلظت این عنصر در زمان کاشت برای کنترل رشد و در پایان دوره رشد برای جلوگیری از دیررسی میوه‌ها اهمیت دارد. میزان پتاسیم به طور قابل توجهی مقدار مواد جامد محلول، ویتامین C، رنگ میوه، غلظت ترکیبات فنلی، مزه و سفتی میوه را نیز بهبود می‌بخشد (۲۶). مقدار پتاسیم به طور قابل توجهی بر غلظت رنگدانه‌هایی نظیر لیکوپن و بتاکاروتن، که شاخص‌های کیفیت درونی میوه هستند، تأثیر می‌گذارد. تغذیه با پتاسیم باعث افزایش اندازه و تعداد میوه، میزان قند و اسید می‌شود. همچنین، مقدار مواد جامد محلول، ویتامین C، رنگ میوه، غلظت کارتنوئیدها، پلی‌آمین‌ها و غلظت ترکیبات فنلی و نیز مزه و سفتی میوه را نیز بهبود می‌بخشد (۱۹). ژائو (۴۸) اثر شکل‌های مختلف کود پتاسیم بر میزان کادمیم جذب شده توسط دو رقم گندم بهاره را مورد مطالعه قرار داد و به این نتیجه رسید که وجود پتاسیم غلظت کادمیم در ریشه و شاخه را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. قاسمی و شهابی (۴) نشان دادند که روی و کادمیم در گیاه گوجه‌فرنگی اثر متقابل مثبت (سینرژیستی) داشته و به این ترتیب وجود غلظت زیاد و همزمان هر دو در محیط ریشه، باعث کاهش رشد و کاهش میزان قندهای محلول گیاه می‌شود. ولی کاربرد پتاسیم و وجود غلظت زیاد آن در محیط ریشه در حضور کادمیم باعث افزایش نسبت سطح برگ و سطح ویژه برگ شده و به این ترتیب با کادمیم اثر متقابل منفی (آنتاگونیستی) دارد. نتایج حاصل از پژوهش گولسر و سونمز (۲۴) نشان داد که به طور قابل توجهی میانگین غلظت کادمیم در شاخه با افزایش مقدار پتاسیم شاخه در گیاهچه فلفل کاهش یافت.

موضوع آلودگی خاک‌های کشاورزی با فلزات سنگین به خاطر توانایی آسیب‌رسانی آنها به سلامت انسان و حیوان در چند دهه گذشته از نظر مسائل زیست‌محیطی همواره مورد توجه و مطالعه قرار گرفته و سعی شده تا حد امکان از ورود آنها به محیط‌زیست و چرخه غذایی جلوگیری شود. در این راستا، هدف مورد مطالعه در این پژوهش، بررسی کارایی استفاده از پتاسیم در کاهش اثر کادمیم و نیز ترکیبات شیمیایی میوه گوجه‌فرنگی در خاک‌های آلوده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و آزمایشگاه‌های گروه علوم و مهندسی باغبانی، آزمایشگاه زحاصل‌خیزی و خاک‌شناسی گروه خاک‌شناسی دانشگاه مراغه و اندازه‌گیری‌های مربوط به سفتی و رنگ در آزمایشگاه فیزیولوژی پس از برداشت دانشگاه تهران انجام گرفت. بذر گوجه‌فرنگی رقم Super Cheif از شرکت Bonanza (آمریکا) با خلوص ۹۹٪ و قابلیت جوانه زنی ۸۵٪ تهیه شد. از گلدان‌های پلاستیکی ۱۲ لیتری به عنوان ظروف کاشت و از ماسه به عنوان بستر کاشت استفاده گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با فاکتور پتاسیم در سه سطح (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر) به‌صورت (شاهد)K_1، K_2 و K_3 از منبع نیترات پتاسیم (KNO_3) و فاکتور کادمیم در سه سطح (صفر، ۲و ۴ میلی‌گرم بر لیتر) به‌صورت (شاهد) Cd_1، Cd_2 و Cd_3 از منبع سولفات کادمیم ($3CdSO_4.8H_2O$) در سه تکرار اجرا گردید. هر واحد آزمایشی شامل یک گلدان بود. محلول غذایی مورد استفاده، محلول هوگلند تغییر یافته بود. در مورد تیمار شاهد فقط از محلول هوگلند استفاده شد و در سایر تیمارها مقادیر یاد شده Cd و K به محلول هوگلند اضافه شده و سپس مصرف گردید. pH محلول غذایی در ۶/۵ تنظیم گردید و برای این منظور از اسید سولفوریک یک مولار استفاده شد. تیمارهای مورد نظر از زمان چهاربرگی گیاهان اعمال گشته و به‌طور متوسط به هر گلدان هر روز حدود یک لیتر از محلول تیماری داده شد. دمای محیط گلخانه طی روز حدود ۳±۲۵ و در شب ۳±۲۰ درجه سلسیوس بود.

صفات مورد بررسی

رنگ میوه با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج (CR-300Japan-Minolta) در سه نقطه از سطح میوه‌ها اندازه‌گیری شد و سپس مقدار a* (پارامتر خوب برای نشان دادن توسعه رنگ قرمز و درجه رسیدگی)، b* (نشان‌دهنده رنگ زرد در میوه) و L* (نشان‌دهنده میزان درخشندگی) ثبت شد (۱۱). سفتی بافت میوه توسط دستگاه سفتی‌سنج یا پنترومتر دستی (Effegi مدل FT327 ایتالیا) با قطر پیستون ۸ میلی‌متر و برحسب کیلوگرم نیرو محاسبه گردید (۱۰). مقدار مواد جامد محلول (TDS) توسط دستگاه رفراکتومتر (RE-20E) اندازه‌گیری شده و غلظت آنها برحسب درجه بریکس در دمای ۲۵ درجه سلسیوس خوانده شد (Brix^o= 0-32%). برای تعیین میزان pH از هر تیمار آب میوه صاف شده تهیه و pH آب میوه توسط دستگاه pH متر(PB-11) –(SARTORIUS) اندازه‌گیری گردید. میزان ثابت پایداری غشا (MSI) توسط EC متر (AL10Con) قرائت و طبق معادله (۱) محاسبه شد (۳۷):

$$MSI(\%) = (1-\frac{c_1}{c_2})\times 100 \qquad [1]$$

برای اندازه‌گیری میزان اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) به روش پیوست و همکاران (۳۶) عمل شده و مقدار آن طبق فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{اسیدتیه (٪)} = \frac{\text{(میلی اکی والان اسید غالب میوه} \times \text{نرمالیته سود} \times \text{میلی‌لیتر سود مصرفی)}}{\text{میلی‌لیتر حجم آب میوه}} \times 100 \qquad [2]$$

برای تعیین غلظت عناصر، ابتدا هضم نمونه‌های گیاهی به روش دانگ و همکاران (۱۸) انجام گرفت و سپس عصاره حاصل توسط کاغذ واتمن شماره ۴۲ صاف گردیده و توسط آب مقطر در بالن ژوژه‌ها به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس به فلاسک‌های حجمی دستگاه جذب اتمی (Shimadzu, AA6300, Japan) برای تعیین غلظت عنصر

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثرهای Cd و K برخصوصیات فیزیولوژیک میوه گوجه‌فرنگی.

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن تر میوه	وزن خشک میوه	موادجامد محلول	اسیدیته قابل تیتراسیون	سفتی	ثابت پایداری غشا
کادمیم	۲	۳۶۵/۶۰**	۱۲۲/۶۷**	۰/۱۳۸^{ns}	۰/۰۳**	۲/۳۴**	۵۳۶/۶**
پتاسیم	۲	۸۳/۲۴**	۶۹/۳۹**	۷/۶۷**	۰/۰۵۹**	۵/۳۷**	۲۵۱/۵۱**
کادمیم در پتاسیم	۴	۹/۷۵^{ns}	۲/۳۷^{ns}	۰/۳۷۵^{ns}	۰/۰۳*	۰/۱*	۳۹/۳۳**
اشتباه آزمایشی	۱۸	۶/۶۷	۲/۲۳	۰/۱۸	۰/۰۰۱۳	۰/۰۳۸	۸/۸۶
ضریب تغییرات		۱۷/۱۴	۱۸/۲۵	۰/۲۱	۷/۳۹	۵/۷	۳/۳۵

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

کادمیم در نمونه‌های گیاهی منتقل گردید.

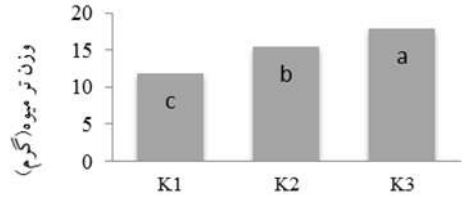
تجزیه آماری

داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش به وسیله نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین آن‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱٪ انجام شد. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel (2010) استفاده گردید.

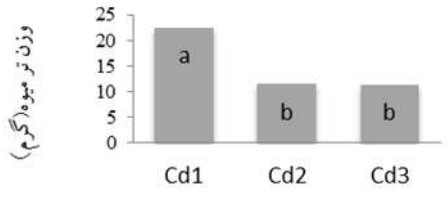
نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که تأثیر سطوح مختلف کادمیم و پتاسیم بر وزن تر و وزن خشک میوه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. در حالی که اثر متقابل کادمیم و پتاسیم بر وزن تر و وزن خشک میوه معنی‌دار نبود. همچنین، اثرهای اصلی کادمیم و پتاسیم بر سفتی میوه در سطح احتمال ۱٪، اثر متقابل کادمیم و پتاسیم در سطح احتمال ۵٪ و کاربرد سطوح مختلف پتاسیم بر مقدار مواد جامد محلول در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشد. کاربرد سطوح مختلف کادمیم و پتاسیم بر میزان اسیدیته قابل تیتراسیون نیز در سطح احتمال ۱٪ و اثر متقابل کادمیم و پتاسیم درسطح احتمال ۵٪ معنی‌دار می‌باشد. اعمال هیچیک از تیمارها بر pH و ضخامت پریکارپ اثر معنی‌دار نداشت. اثر کادمیم و پتاسیم و اثر متقابل آنها بر ثابت پایداری غشاء میوه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود.

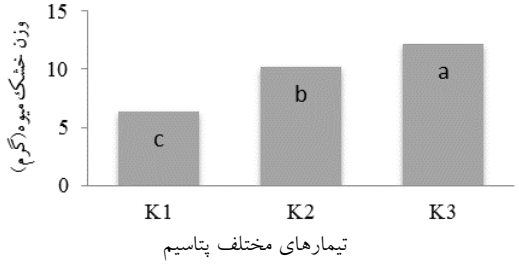
نتایج حاصل از شکل (۱) نشان داد که بر اثر کاربرد پتاسیم، وزن تر میوه از ۱۱/۸۵ گرم در تیمار شاهد (K_1) به ۱۵/۴۶ و ۱۷/۱۹ گرم در هر گیاه به‌ترتیب در تیمارهای K_2 و K_3 افزایش یافت. اختلاف بین تیمارهای K_2 و K_3 معنی‌دار بود. میانگین افزایش وزن تر میوه در تیمارهای K_2 و K_3 نسبت به تیمار شاهد (K_1) برابر ۳۰ و ۴۵ درصد بود. همچنین، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بر اثر کاربرد کادمیم، وزن تر میوه نسبت به شاهد کاهش یافت. به‌طوری که وزن تر از ۲۲/۴۳ گرم در تیمار شاهد (Cd_1) به ۱۱/۴۵ و ۱۱/۳۳ گرم در هر گیاه به‌ترتیب در تیمارهای Cd_2 و Cd_3 کاهش یافت که اختلاف بین تیمارهای Cd_2 و Cd_3 معنی‌دار نبود. وزن خشک میوه نیز با کاربرد پتاسیم نسبت به شاهد K_1 افزایش یافت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بر اثر کاربرد پتاسیم، وزن خشک از ۶/۴ گرم در تیمار شاهد K_1به ۱۰/۲۴ و ۱۲/۱۸ گرم در هر گیاه به ترتیب در تیمارهای K_2 و K_3 افزایش یافت که اختلاف بین تیمارهای K_2 و K_3 معنی‌دار بود (شکل ۳). با توجه به شکل ۴، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بر اثر کاربرد کادمیم، وزن خشک از ۱۲/۳۴گرم در تیمار شاهد (Cd_1) به ۷/۰۴ و ۵/۲ گرم در هر گیاه به ترتیب در تیمارهایCd_2 و Cd_3 کاهش یافت که اختلاف بین تیمارهای Cd_2 و Cd_3 معنی‌دار بود. میانگین کاهش وزن تر میوه در تیمارهای Cd_2 و Cd_3 نسبت به تیمار Cd_1 برابر ۴۹ و ۴۹/۴۸ درصد بود (شکل ۲).



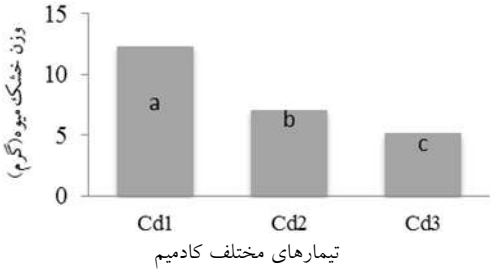
شکل ۱. اثر سطوح مختلف پتاسیم بر وزن تر میوه گوجه‌فرنگی.



شکل ۲. اثر سطوح مختلف کادمیم بر وزن تر میوه گوجه‌فرنگی.



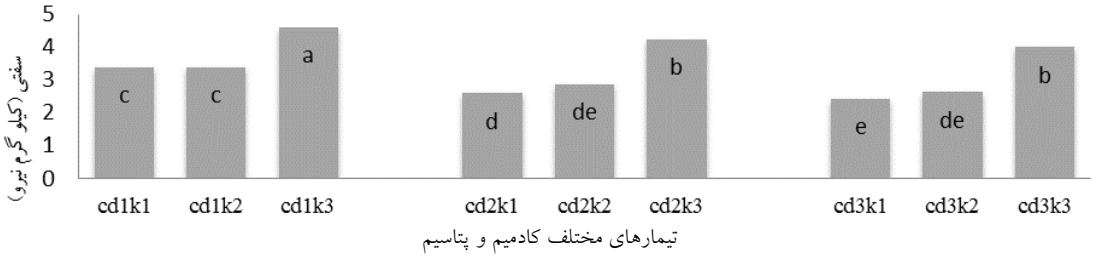
شکل ۳. اثرسطوح مختلف پتاسیم بر وزن خشک میوه گوجه‌فرنگی.



شکل ۴. اثر سطوح مختلف کادمیم بر وزن خشک میوه گوجه‌فرنگی.

کادمیم به شدت از رشد گیاه جلوگیری نموده و حتی از طریق اختلال در جذب سایر عناصر، باعث مرگ گیاهان می‌شود (۲۵) قاسمی و شهابی (۴) ثابت کردند که کاربرد پتاسیم و وجود غلظت زیاد آن در محیط ریشه در حضور کادمیم سبب افزایش نسبت سطح برگ و سطح ویژه برگی و نیز وزن خشک شده و به این ترتیب با کادمیم برهمکنش منفی (آنتاگونیستی) دارد. همچنین، آنها بیان کردند که از بین دو عنصر پتاسیم و روی، تنها پتاسیم می‌تواند سبب کاهش اثرهای سمی کادمیم از نظر جذب و انتقال آن به اندام‌های هوایی گیاه فوق باشد. چوداری و چوداری (۱۵) گزارش کردند که کدوی تابستانه به کود پتاسیم به خوبی پاسخ داده و وزن تر و خشک میوه همراه با افزایش پتاسیم افزایش می‌یابد. چنین به نظر می‌رسد که پتاسیم با افزایش فعالیت فتوسنتزی باعث افزایش عملکرد محصول می شود. لیو و همکاران (۳۱) نیز در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که پتاسیم برای رشد بهینه گیاه وکیفیت مرغوب میوه ضروری است. این عنصر با بار مثبت خود، نقش عمده‌ای در خنثی‌سازی بارهای منفی اسیدهای آلی تولید شده در سلول و آنیون‌هایی مثل سولفات‌ها، کلریدها و نیترات‌ها بر عهده داشته و گوجه‌فرنگی از جمله گیاهانی است که به پتاسیم نیاز زیادی دارد (۴۹).

نتایج حاصل از مقایسات میانگین نشان داد که بیشترین سفتی میوه‌ها (۴/۶ کیلوگرم نیرو) در تیمار Cd_1K_3 می‌باشد، که پتاسیم در بیشترین سطح و کادمیم در کمترین حد (صفر میلی‌گرم در لیتر) بود. کمترین مقدار سفتی (۲/۴۳ کیلوگرم نیرو) در تیمار Cd_3K_1 می‌باشد، که دارای بیشترین حد کادمیم (۴ میلی‌گرم در لیتر) و کمترین حد پتاسیم (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش پتاسیم در محلول غذایی، سفتی میوه از ۳/۴ کیلوگرم نیرو در تیمار شاهد (Cd_1K_1) به ۳/۹۳ و ۴/۶ کیلوگرم نیرو به ترتیب در تیمارهای Cd_1K_2 و Cd_1K_3 افزایش یافته که اختلاف بین این تیمارها نیز معنی‌دار بود. همین روند صعودی در سایر سطوح به‌کار برده شده کادمیم نیز با افزودن پتاسیم به محلول غذایی مشاهده شد (شکل ۵). به‌طوری که میانگین درصد افزایش سفتی میوه در تیمار Cd_2K_3 نسبت به تیمار Cd_2K_2 برابر ۴۷٪ و در تیمار Cd_3K_3 نسبت به تیمار Cd_3K_2 برابر ۵۲٪ بود. از طرفی، با افزایش کاربرد کادمیم در محلول غذایی، سفتی میوه از ۳/۴ در



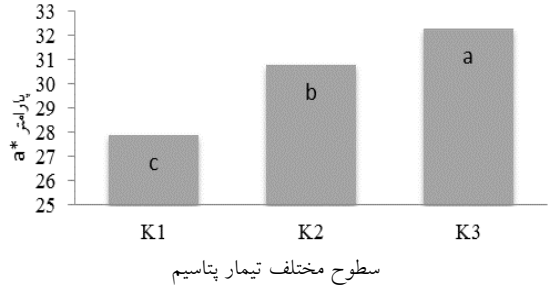
شکل ۵. اثر متقابل سطوح مختلف کادمیم و پتاسیم برسفتی.

تیمار شاهد به ۲/۶ و۲/۴۳ کیلوگرم نیرو به ترتیب در تیمارهای Cd_2K_1 و Cd_3K_1 کاهش یافت، که اختلاف بین تیمارهای Cd_2K_1 و Cd_3K_1 معنی‌دار بود. میانگین درصد کاهش سفتی میوه برای تیمارهای Cd_2K_1 و Cd_3K_1 به ترتیب ۲۳/۵۲ و ۲۸/۵۲ درصد نسبت به شاهد بود و همچنین میانگین درصد کاهش سفتی میوه در تیمار Cd_3K_1 نسبت به Cd_2K_1، ۶/۵ درصد بود. آلمیلبی و همکاران (۱۰) اثر فلزات سنگین موجود در آب و خاک را برمیوه‌های مرکبات بررسی کردند و نتیجه گرفتند که وجود فلزات سنگین باعث کاهش سفتی میوه می‌شود. کاشی و حکمتی (۵) گزارش کردند که سفتی میوه توت‌فرنگی و در نتیجه قابلیت نگهداری آن با تغذیه پتاس بهبود می‌یابد. پتاسیم در درشتی میوه و افزایش عملکرد نیز نقش دارد (۵). نتایج تحقیق حاضر در ارتباط با اثر مثبت مقادیر پتاسیم در افزایش سفتی میوه با بسیاری از تحقیقات دیگر مانند توت‌فرنگی (۱۷) و گوجه‌فرنگی (۲۰) مطابقت داشت. چنین به نظر می‌رسد که افزایش سفتی میوه در هنگام کاربرد پتاسیم به دلیل تأثیر پتاسیم در حفظ تعادل آب گیاه است. کادمیم به راحتی توسط گیاه جذب شده و باعث آسیب‌های ساختاری و بافتی می‌شود. اطلاعات در دسترس بیانگر این است که کادمیم ممکن است در آوند چوبی همراه با مولکول‌های کوچک مانند اسیدهای آلی بوده و در جذب آب اختلال ایجاد کند و از این رو باعث کاهش سفتی میوه شود. گرانت (۲۳) نیز اثبات کرد که کاربرد پتاسیم بر محتوای کادمیم گیاه تأثیر گذاشته و باعث کاهش اثرهای آن می‌شود، که مطابق با نتایج تحقیق حاضر می‌باشد.

میوه گوجه‌فرنگی

کاربرد پتاسیم تأثیر معنی‌داری در افزایش میزان مواد جامد محلول میوه در گیاه گوجه‌فرنگی داشت. به‌طوری‌که مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در اثر کاربرد پتاسیم میزان مواد جامد محلول میوه از ۵/۱۰ در تیمار شاهد (K_1) به ۵/۸۵ و ۶/۸۵ به ترتیب در تیمارهای حاوی ۲۰۰ و۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر پتاسیم افزایش یافت. بیشترین میزان مواد جامد محلول در میوه‌ها زمانی به‌دست آمد که تیمار پتاسیم در بیشترین حد (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۶). نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج حاصل از تحقیقات جهان‌بین و همکاران (۳) و شعبانی و همکاران (۴۰) به ترتیب در پرتقال و گوجه گیلاسی مطابقت دارد. احتمالاً به دلیل نقش کلیدی پتاسیم در گیاه و دخالت آن در سنتز پروتئین‌ها، فعال‌سازی آنزیم‌ها و نیز فرایندهای حمل و نقل غشایی است که مقدار مواد جامد محلول در میوه افزایش می‌یابد. همچنین، تجمع زیاد قند را می‌توان به دلیل افزایش فعالیت آنزیم متابولیزه کننده ساکارز و تجمع ATP در حضور پتاسیم ربط داد، هرچند فعالیت این آنزیم مورد اندازه‌گیری قرار نگرفت. مظفریان و همکاران (۳۴) نیز ثابت کردند که میزان مواد جامد محلول در فلفل تحت تأثیر تنش کادمیم قرار نمی‌گیرد که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد.

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) اثر متقابل کادمیم و پتاسیم و نیز اثر ساده کادمیم و پتاسیم بر مؤلفه‌های *L و *b رنگ معنی‌دار نبود. همچنین، اثر متقابل کادمیم و پتاسیم و اثر ساده کادمیم بر مؤلفه *a رنگ معنی‌دار نبود. ولی کاربرد

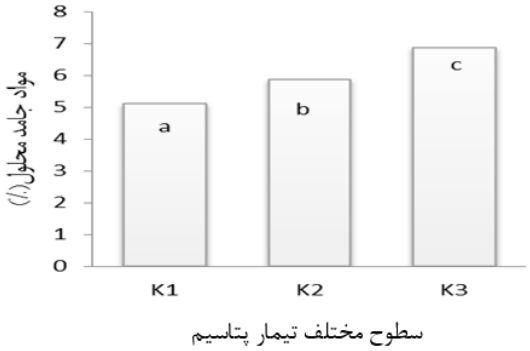


شکل ۶. تأثیرسطوح مختلف پتاسیم بر مقدار مواد جامد محلول در میوه گوجه‌فرنگی.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثرهای Cd و K بر رنگ میوه گوجه‌فرنگی.

منابع تغییرات	درجه آزادی	پارامتر رنگی a*	پارامتر رنگی b*	پارامتر رنگی L*
کادمیم	۲	۰/۰۳۰ns	۵/۶۷ns	۰/۸۹ns
پتاسیم	۲	۴۲/۱۹**	۱/۷۲ns	۵/۱۰ns
کادمیم در پتاسیم	۴	۱/۸۵ns	۳/ ۷۱ns	۳/۲۹ns
اشتباه آزمایشی	۱۸	۱/۰۶	۲/۷۹	۳/۸۰
ضریب تغییرات		۳/۴	۶/۲۲	۴/۹۵

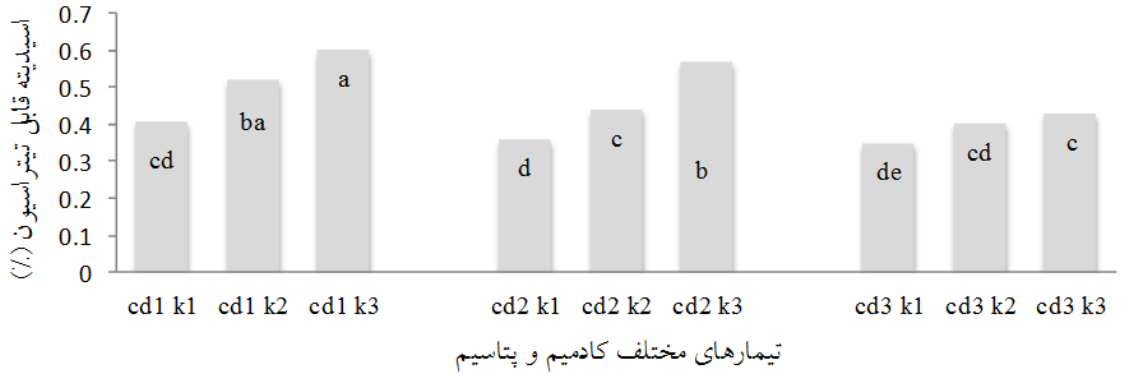
**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار



شکل ۷. تأثیر سطوح مختلف پتاسیم بر مولفه a* رنگ میوه گوجه‌فرنگی.

پتاسیم در سطح احتمال ۱٪ تأثیر معنی‌داری بر مولفه a* رنگ گوجه‌فرنگی داشت. در اثر کاربرد پتاسیم، میانگین a* رنگ از ۲۷/۹۰ در تیمار شاهد K_1 به ۳۰/۸۱ و ۳۲/۱۳ به ترتیب در تیمارهای K_2 و K_3 افزایش یافته بود (شکل ۷).

میانگین درصد افزایش مؤلفه a* رنگ برای تیمارهای K_2 و K_3 به‌ترتیب ۱۴ و ۱۵/۱۶ درصد نسبت به شاهد (K_1) بود. رنگ پوست و سفتی مهم‌ترین فاکتور تأثیرگذار بر کیفیت گوجه‌فرنگی است که مصرف کننده آن را به عنوان شاخص بلوغ درک می‌کند. گوجه‌فرنگی منبع مهم لیکوپن در تغذیه است و لیکوپن کارتنوئیدی با زنجیره‌ای غیراشباع است که گویای رنگ قرمز در گوجه‌فرنگی می‌باشد (۲۱ و ۲۲). افزایش سطح پتاسیم باعث بهبود رنگ میوه در مرکبات می‌شود و کیفیت بسیاری از میوه‌ها به سطح پتاسیم در دسترس وابسته است (۳۵). آلدانا (۹) نشان داد که استفاده سنتی از ۳۲۰ کیلوگرم پتاسیم اثر معنی‌داری بر بسیاری از پارامترهای کیفی میوه گوجه‌فرنگی مانند مواد جامد محلول داشته و رنگ‌گیری



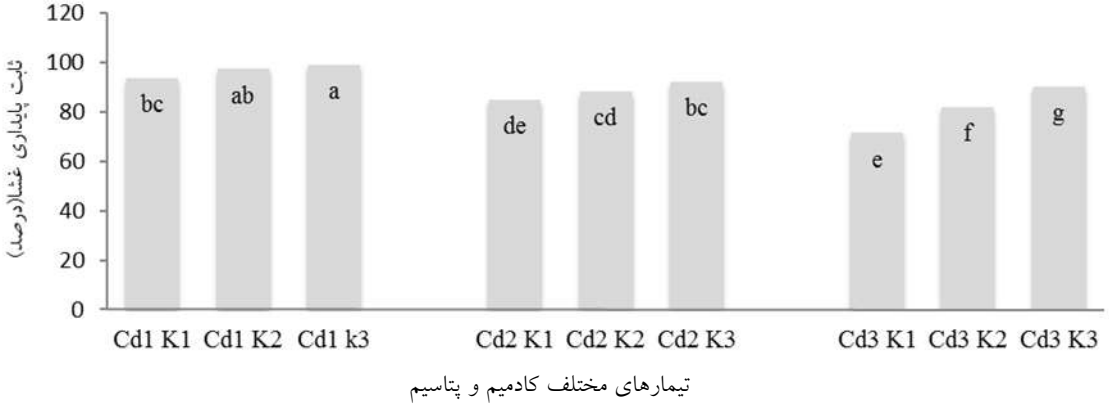
شکل ۸. اثر متقابل سطوح مختلف پتاسیم وکادمیم بر میزان اسیدیته قابل تیتراسیون میوه گوجه‌فرنگی.

(۲۷) را نیز بهتر می‌کند. تغذیه پتاسیم باعث افزایش کیفیت و بهبود رنگ میوه می‌شود. به‌طوری که بیشترین میزان لیکوپن در پریکارپ گوجه‌فرنگی بوده و در شرایط کمبود پتاسیم، میوه‌ها کوچک و فاقد رنگ خواهند بود (۴۶) که نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نیز کاملاً گویای این مطلب می‌باشد.

بیشترین میزان اسیدیته قابل تیتراسیون میوه‌ها در تیمار Cd_1K_3 که پتاسیم در سطح ۳۰۰میلی‌گرم در لیتر و کادمیم در سطح صفر میلی‌گرم در لیتر می‌باشد، به‌دست آمد و کمترین مقدار اسیدیته قابل تیتراسیون در تیمار Cd_3K_1 که کادمیم در سطح ۴ میلی‌گرم در لیتر و پتاسیم در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود، دیده می‌شود (شکل ۸). بیشترین اسیدیته قابل تیتراسیون زمانی به‌دست می‌آید که میوه‌ها در تیمار بدون کادمیم باشند.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش پتاسیم در محلول غذایی، اسیدیته قابل تیتراسیون از ۰/۴۱ در تیمار شاهد (Cd_1K_1) به ۰/۵۲ و ۰/۶۰ درصد به ترتیب در تیمارهای Cd_1K_2 و Cd_1K_3 افزایش یافت. همین روند افزایش در سایر سطوح کادمیم نیز همرا با افزایش پتاسیم مشاهده شد. برعکس، با افزایش کاربرد کادمیم در محلول غذایی، اسیدیته قابل تیتراسیون میوه‌ها از ۰/۴۱ در تیمار Cd_1K_1 شاهد به ۰/۳۶ و ۰/۳۵ درصد به‌ترتیب در تیمارهای Cd_2k_1 و Cd_3k_1 کاهش یافته است. نتایج حاصل از پژوهش‌های پیوست و همکاران (۳۶) بیانگر این بود که افزایش پتاسیم در محلول غذایی، اسیدیته قابل تیتراسیون گوجه‌فرنگی را افزایش می‌دهد که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. مورال و همکاران (۳۳) نیز اثبات کردند که میزان اسیدیته قابل تیتراسیون میوه گوجه‌فرنگی تحت تأثیر تنش کادمیم کاهش می‌یابد، که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. همچنین، به‌نظر می‌رسد که در دسترس بودن مواد مغذی که باعث بهبود سنتز اسیداسکوربیک و در نتیجه اسیدیته قابل تیتراسیون می‌شود و از طرفی رابطه مثبتی که بین سطح پتاسیم واسیدیته وجود دارد، لذا افزایش مقدار اسیدیته در میوه احتمالاً به دلیل تأثیر مثبت پتاسیم بر سوخت و ساز کربوهیدرات‌ها است. همچنین، اطلاعات در دسترس نشان می‌دهد که کادمیم از طریق اختلال در جذب و تجمع پروتئین‌ها و اسید نوکلئیک و نیز آسیب به غشا، باعث کاهش اسیدیته میوه می‌گردد.

بیشترین ثابت پایداری غشای میوه ۹۹/۰۵ درصد در تیمار Cd_1K_3 که دارای بیشترین سطح پتاسیم و کمترین حد کادمیم است، به‌دست می‌آید و کمترین ثابت پایداری غشای میوه (۷۱/۵۶ درصد) در تیمار Cd_3K_1 که دارای کمترین حد پتاسیم و بیشترین حد کادمیم است، دیده می‌شود (شکل ۹). نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش کاربرد کادمیم در محلول غذایی، ثابت پایداری غشا از ۹۳/۶۶ درصد در تیمار شاهد به ۸۴/۸۹ و ۷۱/۵۶ درصد به‌ترتیب در تیمارهای Cd_2K_1 و Cd_3K_1 کاهش یافته است. همچنین، در صورت کاربرد توأم پتاسیم با کادمیم در محلول غذایی، ثابت پایداری غشا افزایش یافت. دیندسا و همکاران (۱۶) گزارش کردند که تنش کادمیم منجر به کاهش قابل توجهی در ثابت پایداری غشا



شکل ۹. اثر متقابل سطوح مختلف پتاسیم و کادمیم برثابت پایداری غشای میوه گوجه‌فرنگی.

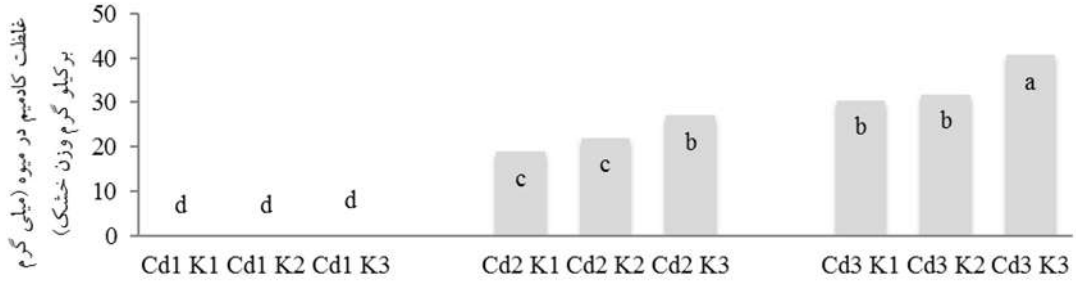
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثرهای Cd و K بر غلظت عنصر کادمیم در برگ و میوه گوجه‌فرنگی.

منابع تغییرات	درجه آزادی	کادمیم برگ (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک)	کادمیم میوه (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک)
کادمیم	۲	۲۷۳۳/۷۸**	۴۰۴۸۱/۷۱**
پتاسیم	۲	۹۱/۹۰**	۱۲۱۱/۵۵**
کادمیم × پتاسیم	۴	۲۵/۶۸*	۳۴۱/۷۳*
اشتباه آزمایشی	۱۸	۷/۰۱	۸۳/۱۹
ضریب تغییرات		۱۳/۹۶	۱۳/۳۳

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

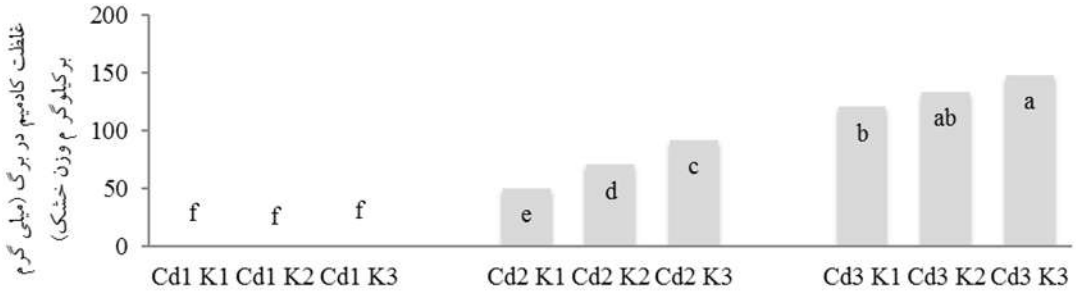
(MSI) می‌شود که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. همچنین، گزارش‌های مشابهی در مورد افزایش نشت الکترولیتی و کاهش قابل توجهی در ثابت پایداری غشای ریشه گیاه *Arabis paniculata*، وقتی تحت تیمار روی قرار می‌گیرد، وجود دارد (۱۲) که احتمال داده می‌شود کاهش در پایداری غشا به علت پراکسیداسیون لیپدهای غشاست که ناشی از فعالیت رادیکال‌های آزاد می‌باشد.

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که سطوح مختلف پتاسیم و کادمیم تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر غلظت کادمیم میوه و برگ داشت. همچنین، اثر متقابل کادمیم و پتاسیم بر غلظت کادمیم در میوه و برگ گوجه‌فرنگی نیز در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود. مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱۰) نشان داد که بر اثر افزایش مصرف پتاسیم در محلول غذایی، غلظت کادمیم میوه از۱۸/۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_2K_1، به ۲۲/۰۵ و۲۷/۰۶ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_2K_2 و Cd_2K_3 افزایش یافت که اختلاف میانگین بین تیمارهای Cd_2K_2 و Cd_2K_1 معنی‌دار نبود. درصد افزایش غلظت کادمیم میوه در تیمار Cd_2K_3 نسبت به تیمار Cd_2K_1 ۴۳/۵۵ درصد بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بر اثر افزایش مصرف پتاسیم در محلول غذایی، غلظت کادمیم میوه از ۳۰/۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_3K_1 ۳۱/۷۹ و ۴۰/۶۱ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_3K_2 و Cd_3K_3 افزایش یافت. میانگین درصد افزایش غلظت کادمیم برگ در تیمار Cd_3K_3 نسبت به تیمار Cd_3K_1 ۳۳/۵۸ درصد بود. مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱۱) نشان داد که در اثر کاربرد کادمیم، میانگین غلظت کادمیم در میوه از صفر



تیمارهای مختلف کادمیم و پتاسیم

شکل ۱۰. اثر متقابل کادمیم و پتاسیم بر غلظت کادمیم در میوه گوجه‌فرنگی.



تیمارهای مختلف کادمیم و پتاسیم

شکل ۱۱. اثر متقابل کادمیم و پتاسیم بر غلظت کادمیم در برگ گوجه‌فرنگی.

میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار شاهد (Cd_1K_1) به ۱۸/۸۵ و ۴۰/ ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک به ترتیب در تیمارهای Cd_2K_1 و Cd_3K_1 افزایش یافته که اختلاف بین تیمارهای Cd_2K_1 و Cd_3K_1 معنی‌دار بود. میانگین درصد افزایش غلظت کادمیم در تیمار Cd_2K_1 نسبت به تیمار Cd_3K_1 ۶۱/۲۷ درصد بود (شکل۱۰). با توجه به شکل (۱۱)، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بر اثر افزایش مصرف پتاسیم در محلول غذایی، غلظت کادمیم برگ از ۵۰/۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_2K_1، به ۷۰/۸۷ و ۹۲/۳۳ میلی‌گرم برکیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_2K_2 و Cd_2K_3 افزایش یافت. میانگین درصد افزایش غلظت کادمیم برگ در تیمارهای Cd_2K_3 و Cd_2K_2 نسبت به تیمار Cd_2K_1، به‌ترتیب ۴۰/۷۸ و ۸۳/۴۱ درصد بود که اختلاف غلظت کادمیم بین تیمارهای Cd_3K_1 و Cd_3K_2 و Cd_2K_1 معنی‌دار بود. نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها بیانگر این بود که بر اثر افزایش مصرف پتاسیم در محلول غذایی، غلظت کادمیم برگ از ۱۲۰/۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_3K_1 به ۱۳۳/۳۶ و ۱۴۸/۱۹۲ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_3K_2 و Cd_3K_3 افزایش یافت. میانگین درصد افزایش غلظت کادمیم برگ در تیمار Cd_3K_3 نسبت به تیمار Cd_3K_1 ۲۳٪ بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در اثر کاربرد کادمیم، میانگین غلظت کادمیم در برگ از صفر میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در تیمار شاهد Cd_1K_1 به ۵۰/۳۴ و ۱۲۰/۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک به ترتیب در تیمارهای Cd_2K_1 و Cd_3K_1 افزایش یافته که اختلاف بین تیمارهای Cd_2K_1 و Cd_3K_1 معنی‌دار بود. میانگین افزایش غلظت کادمیم در تیمار Cd_2K_1 نسبت به تیمار Cd_3K_1 ۲۳ /۹۳ درصد بود. پتاسیم در فیزیولوژی و متابولیسم گیاه نه تنها از نظر میزان موجود در بافت‌های گیاهی، بلکه از نظر وظایف

فیزیولوژیک و شیمیایی و فعال کردن آنزیم‌های گیاهی، مهم‌ترین کاتیون می‌باشد. پتاسیم به صورت کاتیون و به مقدار زیاد و به طور سریع توسط گیاه جذب شده و انتقال آن در داخل گیاه نیز متوسط می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که برهمکنش پتاسیم و کادمیم می‌تواند در خاک و گیاه روی دهد (۲). محققین، اثر کادمیم و منبع کودی پتاسیم را بر غلظت کادمیم در سیب‌زمین بررسی و گزارش نمودند که غلظت این فلز در غده و دمبرگ در تیمار سولفات پتاسیم ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از تیمار کلرید پتاسیم بود (۳۸). در آزمایشی، تأثیر نیتروژن، فسفر و کلرید پتاسیم بر غلظت کادمیم در آفتابگردان و جو بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با مصرف نیتروژن و کلرید پتاسیم، غلظت کادمیم در گیاه افزایش یافت که این افزایش در آفتابگردان بیشتر از جو بود. بررسی تأثیر نیتروژن به اثر مثبت آن در رشد گیاه و تأثیر کلرید به تشکیل کمپلکس‌های محلول کادمیم و افزایش زیست‌فراهمی آن برای جذب توسط گیاه، نسبت داده شد (۵۰). پژوهشگران گزارش کرده‌اند که با مصرف کلرید پتاسیم، آزادسازی کادمیم تجمع یافته در خاک افزایش یافته است. همچنین، غلظت کادمیم در برگ‌های فوقانی گیاه تالاسپی در خاک‌های دارای پتاسیم زیادتر، بیشتر بود (۳۲). در این مورد، نتایج پژوهش‌های دیگر نیز نشان داد که غلظت کادمیم در برگ‌های فوقانی گیاه تالاسپی در خاک‌های دارای پتاسیم بیشتر، افزایش یافته است (۴۴). با مصرف کود سولفات پتاسیم، آلودگی خاک با سرب و کادمیم کاهش و جذب کادمیم در اندام هوایی افزایش نشان داد (۴۳). افزایش مقدار جذب کادمیم بر اثر مصرف کود سولفات پتاسیم هم گزارش شده است (۲). نتایج نشان داد که آلودگی خاک با فلز سنگین فراهمی پتاسیم خاک را از طریق تغییر سینتیک جذب سطحی پتاسیم، ظرفیت بافری و توزیع این عنصر تحت تأثیر قرار می‌دهد. کادمیم در گیاه معمولاً جذب ریشه گردیده و به کندی وارد ساقه و برگ‌ها می‌گردد و انتقال آن از برگ‌ها به میوه بسیار ناچیز می‌باشد. مقدار کادمیمی که از ریشه به ساقه، برگ و اندام‌های مصرفی حرکت می‌کند، بستگی به عوامل متعددی از جمله گونه، رقم، نوع خاک و غلظت اولیه کادمیم در خاک دارد. جذب کادمیم توسط ریشه گیاهان بستگی به شکل‌های شیمیایی کادمیم در محلول خاک ریزوسفر دارد. گیاهان از نظر تجمع کادمیم در ریشه و اندام‌های ریشه متفاوت هستند. به‌طوری که گیاهان خانواده Brassicaceae، Solanaceae ، Asteracea و Apiaceae بیشترین مقدار کادمیم را در اندام‌های هوایی تجمع می‌دهند و خانواده‌های Poacea و Leguminosae به ترتیب بیشترین مقدار کادمیم را در ریشه تجمع می‌دهند (۳۰). در پژوهش حاضر بالاترین غلظت کادمیم در شاخساره در بیشترین تیمار کادمیم و بیشترین غلظت پتاسیم به‌دست می‌آید و این مقدار نسبت به تیمار مشابه در میوه بسیار بیشتر می‌باشد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). در خصوص تأثیر کودهای پتاسیمی بر میزان کادمیم گیاهان، پژوهشگران این تأثیر را بیشتر به آنیون همراه نسبت می‌دهند. به‌طوری که در حضور کودهای پتاسیمی، کادمیم بسته به توانایی آنیون همرا با پتاسیم، با آنیون مربوطه کمپلکس ایجاد کرده و میزان جذب آن در گیاه افزایش می‌یابد (۶) که همانند نتایج بیشترین میزان جذب کادمیم در حضور بیشترین مقادیر کود پتاسیم در میوه و برگ تجمع یافته است که از همین ویژگی در افزایش قدرت گیاه پالایی برخی از گیاهان می‌توان بهره برد.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان از تأثیر به‌سزای پتاسیم در کاهش اثرهای سمی کادمیم دارد. به‌طوری که حتی در حضور کادمیم، صفاتی مانند اسیدیته، سفتی، مواد جامد محلول و رنگ میوه با توجه به افزایش پتاسیم در محلول غذایی بهبود یافت. اما باید این نکته را در نظر گرفت که در حضور مقادیر بیشتر کادمیم، از جذب پتاسیم جلوگیری می‌شود و لذا اثر اصلاحی آن قابل لمس نخواهد بود. همچنین، بیشترین مقدار تجمع کادمیم در برگ گوجه‌فرنگی بود. به‌طوری که با مقایسه تیمارهای Cd_3K_3 در برگ و میوه، مقدار تجمع کادمیم در برگ نسبت به میوه حدود ۳/۵ برابر بیشتر می‌باشد. اما نقش آنیون‌های همراه پتاسیم

در افزایش غلظت کادمیم را نیز در گیاهان نباید نادیده گرفت و نیاز به پـژوهش‌هـای بیشـتر در ایـن زمینـه مـی‌باشـد. در کـل گوجه‌فرنگی به عنوان یک سبزی مغذی در رژیم غذایی انسـان مطرح بوده و نتایج این تحقیق نشان داد که حتی کاشـت آن در خاک آلوده، کیفیت میوه را به‌طور معنی‌داری تحـت تـأثیر قـرار نمی‌دهد.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تقدیر و تشکر خـود را از دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه بـه خـاطر حمایـت مـالی پایان‌نامه و نیز گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشگاه تهران بـه خاطر مساعدت در انجام پاره‌ای از آزمایش‌هـای ایـن پـژوهش اعلام دارند.

منابع مورد استفاده

۱. بهتاش، ف.، س. طباطبایی، م. ملکوتی، م. سرورالدین و ش. اوستان. ۱۳۸۹. اثر کادمیم و سیلیسیم بر رشد و برخـی ویژگـی‌هـای فیزیولوژیکی چغندر لبویی. دانش کشاورزی پایدار ۲(۱): ۵۶-۶۷.

۲. ثواقبی، غ. ر. و م. ج. ملکوتی. ۱۳۷۹. اثرات برهمکنش کادمیوم و پتاسیم بر تولید ماده خشک، غلظت و جذب کادمیوم و پتاسـیم در گندم. مجله خاک و آب ۱۲(۹): ۴۴-۵۳.

۳. جهانبین، ر.، س. یاوری، س. عشقی و ع. تفضلی. ۱۳۸۷. اثر توفوردی و سولفات پتاسیم بر ویژگی‌های کمی و کیفی میوه پرتقـال نافی. مجله علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۲(۱): ۳۱-۳۹.

۴. قاسمی، ز. و ع. شهابی. ۱۳۸۹. تأثیر کادمیم بر شـاخص‌هـای فیزیولوژیـک، صـفات رویشـی و غلظـت عناصـر غـذایی در گیـاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) در کشت بدون خاک. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۱(۲): ۵۵-۶۵.

۵. کاشی، ع. و ج. حکمتی. ۱۳۷۰. پرورش توت فرنگی. ناشر مهندس سیاه تیری، تهران.

۶. محمدیان، ز.، ا. غلامعلی زاده آهنگر، م. قربانی و ز. محکمی. ۱۳۹۵. تأثیر کودهای پتاسیمی بر گیاه‌پالایی سرب و کـادمیم در یـک خاک آلوده توسط اسطوخودوس (*Lavendula Officnalis* L.). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۲۳(۳): ۲۷۳-۲۸۷.

۷. ملکوتی، م.، ا. بایبوردی و س. طباطبایی. ۱۳۸۳. مصرف بهینه کود گـامی مـؤثر در افـزایش عملکـرد و بهبـود کیفیـت و کـاهش آلاینده‌ها در محصولات سبزی و صیفی و ارتقاء سطح سلامت جامعه. نشر علوم کشاورزی کاربردی، تهران.

۸. ملکوتی، م. ج. ۱۳۷۷. دستاوردهای مؤسسه تحقیقات خاک و آب در مورد ساخت کود در داخل کشور. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، وزارت کشاورزی.

9. Aldana, M.E. 2005. Effect of phosphorus and potassium fertility on fruit quality and growth of Tabasco pepper (*Capsicum frutescens*) in hydroponic culture. MSc. Thesis, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, pp. 1-60.
10. Almeelbi, T., I. Ismail, J.M. Basahi, H.A. Qari and I.A. Hassan. 2014. Hazardous of waste water irrigation on quality attributes and contamination of citrus fruits. Biosci. Biotech. Res. Asia 11(1): 89-97.
11. Arias, R., T.C. Lee, L. Logendra and H. Janes. 2000. Correlation of lycopene measured by HPLC with the L*, a*, b* color readings of a hydroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content. J. Agric. Food Chem. 48(5): 1697-1702.
12. Azooz, M.M., M.M. Youssef and M.A. Al-Omair. 2011. Comparative evaluation of zinc and lead and their synergistic effects on growth and some physiological responses of Hassawi Okra (*Hibiscus esculentus*) seedlings. Am. J. Plant Physiol. 6: 269-282.
13. Balestrasse, K.B., M.P. Benavides, S.M. Gallego and M.L. Tomaro. 2003. Effect of cadmium stress on nitrogen metabolism in nodules and roots of soybean plants. Func. Plant Biol. 30(1): 57-64.
14. Benarides, M.P., S.M. Gallego and M.L. Tomaro. 2005. Cadmium toxicity in plants. Braz. J. Plant Physiol. 17(1): 21-34.

15. Choudhary, R.K. and D.N. Choudhary. 2005. Effect of different levels of nitrogen and phosphorus on growth, yield and quality of hybrid cabbage. Hort. Sci. 34: 145-146.
16. Dhindsa, R.A., P. Plumb-Dhindsa and P.A. Thorpe. 1981. Leaf senescence correlated with increased permeability and lipid peroxidation, and decreases levels of superoxide dismutase and catalase. J. Exp. Bot. 126: 93-101.
17. Dodman, .M. and M.E. Amiri. 2011. Effect of N, K and Mg on yield and fruit quality of strawberry (*Fragaria×ananasa* cv. Sun Rise) in hydroponic culture conditions. Technol. Greenhouse Culture 4(4): 111-118.
18. Dong, J., F. Wu and G. Zhang. 2006. Influence of cadmium antioxidant capacity and four microelement concentration in tomato seeding (*Lycopersicon esculentuom*). Chemosphere 64: 1659-1666.
19. Etminan, M., B. Takkouche and F. Caamano-Isorna. 2004. The role of tomato products and lycopene in the prevention of prostate cancer: A meta-analysis of observational studies. Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev. 13: 340-345.
20. Fisher, E.G., K.G. Parker, N.S. Luepschen and H. Towing. 1959. The influence of phosphorus, potassium, mulch and soil drainage on fruit size, yield and firmness of the Bartlett pear and on development of the fireblight disease. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 73: 78-90.
21. Franceshi, S., E. Bidoli, C. LaVecchia, R. D. Talamini, B. Avanzo and E. Negri. 1994. Tomatoes and risk of digestive-tract cancers. Int. J. Cancer 59: 181-184.
22. Giovanucci, E., A. Ascherio, E.B. Rimm, M.M. Stampfer, G.A. Colditz and W.C. Willett. 1995. Intake of carotenoids and retinal in relationship to risk of prostate cancer. J. Nat. Cancer Inst. 87(23): 1767-1776.
23. Grant, C.A. and L.D. Bailey. 1997. Effects of phosphorus and zinc fertilizer management on cadmium accumulation in flax seed. J. Sci. Food Agric. 73(3): 307-314.
24. Gülser, F. and F. Sönmez. 2012. Cadmium effects on potassium content and pepper seedling growth in different peat ratios. Eurasian J. Soil Sci. 1(2): 110-115.
25. Gussarson, M.A., S.H. Adalsteinsson and P. Jansen. 1996. Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of birch (*Betula pendula*) by buthionine sulphoximine (BSO). J. Exp. Bot. 47(2): 211-215.
26. Hartz, T.K., G. Miyao, T.J. Mullen, M.D. Cahn, J. Valencia, J. and K.L. Brittan. 1999. Potassium requirements for maximum yield and fruit quality of processing tomato. J. Am. Soc. Hort. Sci. 124(2): 199-204.
27. Javaria, S., M.Q. Khan and I. Bakhsh. 2012. Effect of potassium on chemical and sensory attributes of tomato fruit. J. Anim. Plant Sci. 22(4): 1081-1085.
28. Kaila, A. 1967. Potassium status in different size fraction of some Finish soils. J. Sci. Agric. Soc. Finland 39: 45-56.
29. Koleli, N., S.R. Eke and I. Cakmak. 2004. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat in zinc-deficient soil. Environ. Pollut. 131(3): 453-459.
30. Kuboi, T., A. Noguchi and J. Yazaki. 1986. Family-dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants. Plant Soil 92(3): 405-415.
31. Liu, Z.H., L.H. Jiangi, R. Hardter, W.J. Zhang, Y.L. Zhang and D.F. Zheng. 2008. Effect of N and K fertilizers on yield and quality of greenhouse vegetable crops. Pedosphere 18(4): 496-502.
32. Ma, J., F. Hiradate and S.P. Norvell. 2000. Form of cadmium for uptake and translocation in durum wheat under salty condition. Biol. Plant. 211: 355-360.
33. Moral, R., A.J. Navarro Pedreno, I. Gomez, G. Palacios and J. Mataix. 1996. Tomato fruit yield and quality are affected by organic and inorganic fertilization and cadmium pollution. J. Plant Nutr. 19(12): 1493-1498.
34. Mozafariyan, M., L. Shekari, B. Hawrylak-Nowak and M.M. Kamelmanesh. 2014. Protective role of selenium on pepper exposed to cadmium stress during reproductive stage. Biol. Trace Elem. Res. 160(1): 97-107.
35. Ngyuen, M.L. and S.J. Schwartz. 1999. Lycopene: Chemical and biological properties. Food Technol. 53: 38-45.
36. Peyvast, G., J.A. Olfati, P. Ramezani-Kharazi and S. Kamari- Shahmaleki, 2009. Uptake of calcium nitrate and potassium phosphate from foliar fertilization by tomato. J. Hort. Forest. 1(1): 7-13.
37. Sairam, R.K., D.S. Shukla and D.C. Saxena. 1998. Stress induced injury and antioxidant enzymes in relation to drought tolerance in wheat genotypes. Biol. Plant. 40(3): 357-364.
38. Salardini, A.A., L.A. Sparrow and R.J. Holloway. 1993. Effects of potassium and zinc fertilizers, gypsum and leaching on cadmium in the seed of poppies (*Papaver somniferum* L.). PP. 795-798. *In*: Plant Nutrition: From Genetic Engineering to Field Practice, Springer, Dordrecht.
39. Sarker, M.A.Z., S. Murayama, H. Akamine and I. Nakamura. 2002. Effect of nitrogen fertilization on photosynthetic characteristics and dry matter production in F1 hybrids of rice (*Oryza sativa* L.). Plant Prod. Sci. 5(2): 131-138.
40. Shabani Sangtarashani, E., S.J. Tabatabaei and S. Bolandnazar. 2013. Yield, photosynthetic efficiency and quality parameters of cherry tomato as affected by Ca2+ and K+ under NaCl salinity. Int. J. Agric. Crop Sci. 5(12): 1280.
41. Sharma, R.K., M. Agrawal and S.B. Agrawal. 2008. Interactive effects of cadmium and zinc on carrots: Growth and biomass accumulation. J. Plant Nutr. 31: 19-34.
42. Song, A., Z. Li, J. Zhang, G. Xue, F. Fan and Y. Liang. 2009. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant

defense capacity. J. Hazard. Mater. 172: 74-83.
43. Su, C.H.L., T. Sun, L.C.H. Heng Sun and G. Guo. 2007. Interaction between cadmium, lead and potassium sulfate in a soil-plant system. J. Environ. Geochem. Health 29: 435-446.
44. Ueno, D., J.F. Ma, T. Iwashita, F.J. Zhao and S.P. McGrath. 2005. Identification of the form of Cd in the leaves of a superior Cd-accumulating ecotype of Thlaspi caerulescens using ^{113}Cd-NMR. Planta 221: 928-936.
45. Wagner, G.J. 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and consequences to human health. Adv. Agron. 51: 173-212.
46. Widders, I.E. and O.A. Lorenz. 1979. Tomato root development as related to potassium nutrition. J. Am. Soc. Hort. Sci. 104: 216-220.
47. Yadav, S.K. 2010. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. S. Afr. J. Bot. 76(2): 167-179.
48. Zhao, Y. 2011. Cadmium accumulation and antioxidative defenses in leaves of *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L. Afr. J. Biotech. 10: 2936-2943.
49. Zhao-Hui, L.I.U., L.H. Jiang, L.I. Xiao-Lin, R. Härdter, W.J. Zhang, Y.L. Zhang and D.F. Zheng. 2008. Effect of N and K fertilizers on yield and quality of greenhouse vegetable crops. Pedosphere 18(4): 496-502.
50. Zhao, Z.Q., Y.G. Zhu, S.E. Smithand and F.A. Smith. 2004. Effects of forms and rates of potassium fertilizers on cadmium uptake by spring canola (*Brassica napus* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* L.). Environ. Int. 29(7): 973-978.