Journal of Horticultural Plants Nutrition
Vol.4, No.1, Spring & Summer 2021
Research Paper

DOI: 10.22070/HPN.2021.5319.1086

Effect of using *Piriformospora indica* and cadmium on some morphophysiological traits and concentration of nutrients of tomato in aeroponic system

Sharifeh Golestani Kiyan [1] ***, Zahra Movahedi*** [2*] ***, Mehdi Ghabooli*** [3] ***, Ehsan Mohseni Fard*** [4]

1- M.Sc. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Malayer University, Hamadan, Iran.
sh.golestani.k@gmail.com
2- Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Malayer University, Hamadan, Iran.
Zahra_movahedi_312@yahoo.com
3- Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Malayer University, Zanjan, Iran.
mehdi.ghabooli@gmail.com
4- Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran.
mohsenifard.ehsan@znu.ac.ir

Received Date: 2019/10/30 Accepted Date: 2020/11/25

Abstract

Introduction: Heavy metal stress is one of the most important limiting factors for plant growth and yield in many parts of the world. Cadmium is a heavy metal of special importance (Alloway, 1990). The differences in plant response and toxicity are due to the differences in the cadmium content of the rhizosphere, continuity of treatments, and, especially, plant types and cultivars (Hassan *et al*., 2006). Application of biological methods is effective in increasing plant resistance to environmental stress; one such method is to use the potential of beneficial soil organisms such as mycorrhizal fungi.Endophytic mycorrhizal fungi include the endophytic fungus *Piriformospora indica*. Due to the importance of symbiotic relationship between the fungus *P. indica*and various plants for growth stimulation and, as a result, yield enhancement and also for increasing plant tolerance to different stresses, researchers have been studying the potentials of this fungus for achieving the objectives of sustainable agriculture (Qiang *et al.*, 2011). An appropriate cultivation system for studying the effects of *Piriformospora indica* on plants under cadmium stress is the aeroponic system. The aeroponic method is a special hydroponic system in which plant roots are placed in a closed container and nutrient solution is sprayed on them at intervals by a pump and a timer(Hayden *et al*., 2004). Because of the advantages of the aeroponic system for investigating the effects of heavy metals on plants, and especially vegetables, it was used in this study to examine the effects of the fungus *Piriformospora indica*on some morphophysiological traits of the tomato plant under cadmium stress.

Material and methods: This experiment was conducted in completely randomized design with three replications. The treatments were the control, 3 mgL-1 concentration of cadmium nitrate with inoculated plants,3 mgL-1 concentration of cadmium nitrate with un-inoculated plants, 6 mgl-1 concentration of cadmium nitrate with inoculated plants, 6 mgL-1 concentration of cadmium nitrate with un-inoculated plants. Then, the morphological traits such as wet and dry weights of aerial organs, wet and dry weights of roots, plant height, root height, and the number of leaves were measured for the plants. In addition, the physiological traits such as photosynthetic pigments, ion leakage, phenolic compounds, proteins, carbohydrates, peroxide lipids and the absorption of the elements phosphorous, zinc, iron, manganese, and cadmium were also assessed.

Results and discussion: The results of variance analysis showed that there is a significant difference at the 5-percent level between different treatments for the traits wet and dry weights of aerial organs, wet and dry weights of roots, plant height, root height, number of leaves,photosynthetic pigments, ion leakage, phenolic compounds, proteins, carbohydrates, peroxide lipids and the absorption of the elements phosphorous, zinc, iron, manganese, and cadmium.

Conclusions: The results of the investigation were indicative of negative effects of cadmium on most of the traits studied. Using the fungus *P. indica*was relatively effective in the reduction of the negative effects of cadmium toxicity. Furthermore, the results showed that the aeroponic system can be well used to study the effects of heavy metals, especially on roots, because all the stages of root growth and the direct effects of heavy metals on them can be easily monitored in a controlled environment.

Keywords: Abiotic stress, Endophytic fungi, Heavy metal, Soilless culture.

نشریه علمی تغذیه گیاهان باغی
دوره ۴، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۰، (ص ۶۰- ۴۷)
مقاله پژوهشی

DOI: 10.22070/HPN.2021.5319.1086

اثر استفاده از قارچ *Piriformospora indica* و کادمیوم بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیک و غلظت عناصر غذایی در گیاه گوجه فرنگی در سیستم هواکشت

شریفه گلستانی کیان [۱]، زهرا موحدی [۲*]، مهدی قبولی [۳]، احسان محسنی فرد [۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، همدان، ایران.
sh.golestani.k@gmail.com
۲- نویسنده مسئول و استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، همدان، ایران.
Zahra_movahedi_312@yahoo.com
۳- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، همدان، ایران.
mehdi.ghabooli@gmail.com
۴- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
mohsenifard.ehsan@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸ **تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵**

چکیده

تنش فلزات سنگین یکی از مهمترین عوامل محدود کنندهٔ رشد و عملکرد گیاهان در بسیاری از مناطق دنیا است. قارچ *Piriformospora indica* به عنوان یک قارچ اندوفیت شبه میکوریزی باعث تحریک رشد بسیاری از گونه‌های گیاهی گردیده و همچنین مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی را افزایش می‌دهد. هدف از اجرای این پژوهش بررسی تاثیر قارچ اندوفیت *P. indica* بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش نیترات کادمیم در سیستم هواکشت بود. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل شاهد، گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* و ۳mg L^{-1} نیترات کادمیم، عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* و ۳ mg L^{-1} نیترات کادمیم، گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* و ۶mg L^{-1} نیترات کادمیم، عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* و ۶mg L^{-1} نیترات کادمیم بود. نتایج بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم، تعداد برگ، طول ریشه، ارتفاع کل، وزن تر و خشک ریشه و کل و رنگیزه‌های فتوسنتزی کاهش یافت، بطوریکه کمترین تعداد برگ (۴۵/۶۱)، طول ریشه (۳۵/۷۴ سانتی‌متر)، ارتفاع کل (۱۱۳/۵۰ سانتی‌متر)، وزن تر و خشک ریشه (به ترتیب، ۲۰/۷۲ و ۳/۱۳ گرم)، وزن تر و خشک کل (به ترتیب، ۶۳/۴۴ و ۱۷/۷۳ گرم)، کلروفیل a (۱/۳۲ میلی‌گرم بر گرم)، کلروفیل b (۱/۱۰ میلی‌گرم بر گرم) و کاروتنوئید (۱/۳۵ میلی‌گرم بر گرم) در غلظت $mg\ L^{-1}$ ۶ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بدست آمد. همچنین گیاهان تلقیح شده با قارچ در مقایسه با گیاهان شاهد از رشد و عملکرد بیشتری در شرایط تنش برخوردار بودند که این موضوع بر نقش مؤثر این قارچ در بهبود خصوصیات گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش فلزات سنگین دلالت داشت.

کلمات کلیدی: قارچ اندوفیت، تنش غیر زیستی، فلزات سنگین، کشت بدون خاک.

مقدمه

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) گیاه بومی آمریکای جنوبی و مرکزی است. امروزه انواع مختلف این گیاه در سراسر جهان پرورش داده می‌شود و کشت گلخانه‌ای آن نیز در برخی نواحی مرسوم است. گونه‌های وحشی این گیاه را می‌توان به‌ویژه در مرکز پیدایش آن یافت که این‌گونه‌ها منبع ژنتیکی بسیار مهمی برای اصلاح گوجه‌فرنگی برای بسیاری از صفات می‌باشد (Lorenz and Maynard, 1988).

هر عاملی که مراحل متابولیسم طبیعی یک گیاه را به تاخیر اندازد، محدود نماید یا به طور زیان‌آوری تسریع کند و از این طریق اثرات سوء بر رشد و نمو گیاه به جا بگذارد، تنش نامیده می‌شود. از جمله تنش‌های غیر زیستی می‌توان به تنش با فلزات سنگین، اشاره نمود (Figueras *et al.*, 2004).

فعالیت‌های صنعتی باعث افزودن مقدار زیادی ترکیب‌های سمی و فلزات سنگین به زمین‌های کشاورزی شده است.کادمیم یکی از این فلزات سنگین بوده که دارای اهمیت ویژه‌ای است زیرا توسط ریشه گیاهان جذب می‌شود و سمیت آن ۲۰برابر سایر فلزات است (Alloway, 1990). کادمیم برای گیاهان سمی بوده و با تشکیل کمپلکس‌های پیچیده با پروتئین‌ها در بسیاری اعمال یاخته‌ای دخالت کرده و تغییرات زیادی از جمله تغییر در فعالیت‌های ژنتیکی و بیوشیمیایی را در گیاه ایجاد می‌نماید (Metwally *et al.*, 2003). مقادیر بالای کادمیم با ایجاد اختلالات متابولیسمی، تولید انواع اکسیژن فعال را در سلول افزایش داده و منجر به وقوع تنش اکسیداتیو در گیاه می‌گردد (Goncalvez *et al.*, 2007).

واکنش گیاهان به فلزات سنگین از جمله کادمیم به میزان کادمیم محیط ریشه، مدت زمان تماس با این فلز، نوع گیاه و رقم بستگی دارد (Hassan *et al.*, 2006). مطالعات نشان داده است که تیمارگیاه گوجه‌فرنگی با ۱۰ میکرومولار کادمیم سبب کاهش وزن خشک برگ (۶۹/۸ درصد)، ساقه (۶۷/۲ درصد) و ریشه (۸۶/۳ درصد) شد (Dong and Zhang, 2005).

کاربرد روش‌های زیستی نقش موثری در افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی دارند. یکی از این روش‌ها، استفاده از پتانسیل موجودات مفید خاکزی از جمله قارچ‌های میکوریزا می‌باشد. قارچ‌های میکوریزی با مکانیسم های مختلفی، سبب بهبود رشد، افزایش مقاومت گیاه به عوامل بیماری زا و کمک به کاهش اثرات سوء تنش‌های محیطی می‌گردند. قارچ اندوفیت *Piriformospora indica* یک اندوفیت شبه میکوریزی است که در سال ۱۹۹۸ توسط وارما و همکاران از خاک ریزوسفری گیاهان خشکی‌پسند کنار (*Prosopis juliflora*) و گز (*Zizyphus nummularia*) از صحرای Thar ایالت راجستان کشور هندوستان جداسازی شد (Varma *et al.*, 1999).

اهمیت برقراری ارتباط همزیستی قارچ *P. indica* باگیاهان مختلف در تحریک رشد گیاه و در نتیجه افزایش عملکرد آن و نیز افزایش توان تحمل گیاه به تنش‌های مختلف محققان را برآن داشته است تا پتانسیل‌های بالقوه قارچ مذکور را در جهت رسیدن به اهداف کشاورزی پایدار مورد توجه قرار دهند. همچنین شناسایی ژنوم این قارچ امکان دستورزی ژنتیکی آنرا برای اهداف بیوتکنولوژی فراهم آورده است (Qiang *et al.*, 2011). اثر مثبت قارچ *P. indica* بر کاهش اثرات سمی فلزات سنگین در گیاهان مختلف گزارش شده است. در تحقیقی *P. indica* منجر به تفکیک کادمیم در ریشه‌های گیاه توتون شده و به این صورت مانع انتقال فلز سنگین به اندام‌هوایی و در نهایت باعث افزایش تحمل گیاه به تنش فلز سنگین کادمیم شده است (Hui *et al.*, 2015).

یکی از سیستم‌های کاشت مناسب برای مطالعه اثر قارچ *Piriformospora indica* در گیاهان تحت تنش کادمیم، هواکشت می‌باشد. هواکشت (Aeroponic) نوع خاصی از سیستم‌های هیدروپونیک است که ریشه‌های

گیاهان در یک محفظه بسته قرار دارد و به طور متناوب با یک محلول غذایی به کمک پمپ وزمان سنج محلول‌پاشی می‌شود (Hayden *et al*., 2004).

با توجه به مزایای سیستم هواکشت جهت بررسی اثرات فلزات سنگین توسط گیاهان و به خصوص سبزیجات، هدف از این تحقیق، اثر قارچ *Piriformospora indica* بر برخی صفات مرفوفیزیولوژیک گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تهیه مایع تلقیح قارچ *Piriformospora indica*

جدایه قارچ *P. indica* از دانشگاه گیسن آلمان تهیه و سپس باتهیه تعداد کافی پتری دیش محتوی محیط کشت پیچیده ،مطابق با روش قبولی (Ghabooli *et al*., 2013) کشت داده شد و پس ازجمع‌آوری اسپورهای قارچ، تعداد آن‌ها با استفاده از لام اسپور شمار، شمارش شد. برای تهیه میسلیوم، دیسک‌های فعال قارچ از محیط کشت ذخیره برداشته و در ارلن‌های حاوی محیط کشت مایع قرار داده شدند و سپس در انکوباتور شیکردار در دمای ۲±۲۸ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰-۷ روز قرار داده شد. درمرحله بعد با استفاده از کاغذ صافی شماره یک (whatman filter paper No.1)، میسلیوم‌ها از محیط کشت جدا و چندین بار با آب مقطر شستشو داده شد.

اعمال تیمار و انجام آزمایش

تیمارهای آزمایش شامل شاهد، گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* و۳mg L^{-1} نیترات کادمیم، عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* و۳ mg L^{-1} نیترات کادمیم، گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* و۶mg L^{-1} نیترات کادمیم، عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* و۶ mg L^{-1} نیترات کادمیم بود. بذرهای جوانه‌دار شده گوجه‌فرنگی رقم پی اس اوریانا (PS Urbana) با مقداری مایه تلقیح قارچ حاوی اسپور (۵×۱۰^{۵} اسپور در میلی‌لیتر) و به مدت یک ساعت روی شیکر با دور آرام قرار داده شدند تا امکان اتصال اسپورهای قارچ به سطح ریشه‌چه فراهم شود، سپس گیاهچه‌های تلقیح شده در سیستم هواکشت قرار داده شدند. برای اعمال تیمار نیترات کادمیم به ازای مخازن سیستم هواکشت که هرکدام ظرفیت نگهداری صد لیتر آب را داشتند، مقدار کادمیم مورد نظر به ازای صد لیتر آب اضافه شد و یک مخزن به‌عنوان شاهد فقط حاوی آب و کود کامل بود. محلول غذایی مورد استفاده هوگلند بود. محلول‌پاشی محلول غذایی هر ۳۰ دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه صورت گرفت. سیستم هواکشت مورد استفاده از مخزن قرار گرفتن بذرها در سیستم هواکشت، نازل‌ها، مخزن محلول غذایی، پمپ‌های اسپری کننده محلول غذایی و سیستم کنترل تشکیل شده بود. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. سیستم هواکشت در داخل گلخانه‌ای با دمای روز و شب۲۵ و۱۸ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵٪ قرارداده شدند.

بررسی صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک

در این پژوهش صفات مورفولوژیکی مانند وزن‌تر و خشک اندام‌های هوایی، وزن‌تر و خشک ریشه، ارتفاع بوته، طولریشه و تعداد برگ گیاه اندازه‌گیری شد. همچنین صفات فیزیولوژیکی مانند رنگیزه‌های فتوسنتزی، نشت یونی، ترکیبات فنل، پروتئین، کربوهیدرات‌ها، پراکسید لیپیدهاو جذب عناصر فسفر، روی، آهن، منیزیوم و کادمیم نیز اندازه‌گیری شد.

پس از تعیین وزن تر نمونه‌های گیاهی برداشت شده، نمونه‌های مذکور به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و وزن خشک آنها نیز محاسبه گردید.

رنگیزه‌های برگ با استفاده از استون ۸۰ درصد (v/v) عصاره‌گیری و سنجش آن با روش آرنون (Arnon, 1949) انجام شد. غلظت کلروفیل a با استفاده از اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۶۳ نانومتر، کلروفیل b در طول موج ۶۴۵ نانومتر و کاروتنوئید در طول موج ۴۷۰ نانومتر تعیین گردید.

$$\mathbf{Chla}\left(^{mg}/_{g}\right) = \frac{[(12.7 \times A663) - (2.6 \times A645)]}{10}$$

$$\mathbf{Chlb}\left(^{mg}/_{g}\right) = \frac{[(22.9 \times A645) - (4.68 \times A663)]}{10}$$

$$\mathbf{Cx + c}\left(^{mg}/_{g}\right) = \frac{(1000 \times A470) - (1.90 \times \mathbf{Chla}) - (63.14 \times \mathbf{Chlb})}{214}$$

نشت یونی مطابق روش Valentovic و با استفاده از دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد (Valentovic *et al.*, 2006). اندازه‌گیری پروتئین کل با روش کالریمتری (Bradford, 1987) انجام و میزان جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر درطول موج ۵۹۵ نانومتر و با استفاده از سرم آلبومین گاوی به عنوان استاندارد خوانده شد. استخراج کربوهیدرات محلول از بافت تر به روش Irigoyen با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۰ نانومتر قرائت و با استفاده از منحنی بدست آمده از غلظت‌های مختلف گلوکز بیان گردید (Irigoyen*et al.*, 1992). اندازه‌گیری پرولین نیز با روش بیتس و در طول موج ۵۲۰ نانومتر و با دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد (Bates*et al.*, 1973). استخراج فنول کل به روش کالریمتری بوسیله معرف فولین سیو کالتیو صورت گرفت و در طول موج ۷۶۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد (Singleton, 1965). مقدار فنول کل با استفاده از منحنی کالیبراسیون استانداردی که برای اسید گالیک در غلظت‌های مختلف تهیه شده بود، محاسبه شد.

میزان پراکسیداسیون لیپیدیبراساس روش استوارت و بولی اندازه گیری شد (Stewart and Bewley, 1980). میزان جذب نمونه‌ها در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر ثبت گردید. از اختلاف بین طول موج‌های جذبی و ضریب خاموشی $۱۵۵cm^{-1}mmol^{-1}$ برای محاسبه میزان پراکسیداسیون لیپیدی براساس نانومول بر گرم وزن تر برگ استفاده شد.اندازه‌گیری آهن، منیزیم، روی، فسفر و کادمیوم استفاده از دستگاه جذب اتمی انجام شد.

محاسبات آماری براساس طرح کاملاً تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. به‌منظور بیان تفاوت‌های آماری در بین صفات اندازه‌گیری شده در صورت معنی‌دار شدن آزمونF،از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.

نتایج و بحث

شاخص‌های ریختی گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای مختلف برای صفات ارتفاع کل، طول ریشه، تعداد برگ، وزن تر و خشک کل گیاه و وزن تر و خشک ریشه در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری وجود داشت. وجود کادمیم باعث کاهش ارتفاع کل و طول ریشه در گیاه گوجه‌فرنگی شد، و با افزایش غلظت نیترات کادمیم ارتفاع کل و طول ریشه گیاه کاهش پیدا کرد، از طرفی گیاهان تلقیح شده با قارچ *Piriformospora indica* روند کاهشی کمتری نشان دادند. بر اساس جدول مقایسه میانگین بیشترین ارتفاع کل (۱۴۸/۲۵ سانتی‌متر) و طول ریشه (۸۴/۲۳ سانتی‌متر) در تیمار شاهد و کمترین ارتفاع کل (۱۱۳/۵ سانتی‌متر) و طول ریشه (۳۵/۷۴ سانتی‌متر) در غلظت $۶mg\ L^{-1}$ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* مشاهده شد (جدول ۱).

یکی از صفاتی که تحت تنش فلزات سنگین در این مطالعه کاهش پیدا کرده است، ارتفاع کل گیاه و طول ریشه می‌باشد. در گیاهانی همچون جعفری (Khatib et al., 2008)، جو و برنج (Yang *et al.*, 1996) نیز کاهش ارتفاع و طول ریشه در تیمار با تنش فلزات سنگین گزارش شده

است. آسیب‌های ریشه‌ای ناشی از فلزات سنگین و کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فتوسیستم I یکی از دلایل این کاهش رشد گزارش شده است (Arduini *et al*., 1994; Fuentes, *et al*., 2006).

در این مطالعه با وجود اثر منفی کادمیم بر ویژگی‌های رشدی در گیاه گوجه‌فرنگی، تلقیح گیاهان با قارچ *Piriformospora indica* این اثرات منفی را تا حدی کاهش داده است. نتایج مطالعه‌ای روی واریته‌های مختلف زنبق نتایج نشان داد تلقیح قارچ میکروریزا باعث افزایش رشد در مراحل اولیه رشدی شد (Javaid and Riaz, 2008). مکانیسم‌های مختلفی در ارتباط با تأثیر میکوریزا بر رشد رویشی گیاهان ذکر شده است. قارچ‌های میکوریزا قادرند با استفاده از گسترش ریسه‌های خارجی و تغییر مورفولوژی ریشه گیاهان، سطح جذب ریشه و انتقال مواد غذایی به ریشه را افزایش دهند (James *etal*., 2008). در مطالعه‌ای گیاهان برنج تیمار شده با قارچ *P. indica* طول، وزن‌تر و وزن خشک شاخه بیشتری نسبت به گیاهان شاهد داشتند (Bagheri *et al*., 2013). نتایج تحقیقی در گیاه مرزه نیز نشان داد که قارچ میکوریزا ارتفاع بوته را افزایش داده است (Esmaielpour *et al*., 2013). همزیستی قارچ میکوریزا با ریشه از طریق جذب بیشتر آب و عناصر غذایی، سبب افزایش فتوسنتز شده و این امر موجب تولید فرآورده بیشتر و بهبود رشد، نظیر ارتفاع گیاه می‌گردد (Khalvati *et al*., 2005).

طبق نتایج مقایسه میانگین شاهد بیشترین تعداد برگ در بوته (۸۶/۶۲ برگ)را دارا بود و کمترین تعداد برگ در بوته نیز در غلظت ۶mg L^{-1} نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* با ۴۵/۶۱ برگ در بوته بود (جدول ۱). نتایج به‌دست آمده نشان داد که غلظت بالای کادمیم باعث کاهش پارامتر فوق در مقایسه با تیمار شاهد گردید، اگرچه حضور قارچ *Piriformospora indica* این روند کاهشی را تعدیل کرده است.

با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه میانگین، تیمار شاهد بیشترین وزن‌تر اندام هوایی (۱۴۱/۷۸ گرم) و وزن خشک اندام هوایی (۳۰/۷۲ گرم) را داشته و کمترین وزن‌تر اندام هوایی (۶۳/۴۴ گرم) و وزن خشک اندام هوایی (۱۷/۷۳ گرم) مربوط به تیمار ۶mg L^{-1} نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بود (جدول۱ و شکل ۱). با بررسی نتایج به‌دست‌آمده، قارچ *Piriformospora indica* باعث کاهش روند نزولی کاهش وزن تر و خشک کل گیاه شده و اثرات سمی نیترات کادمیم را تا حد زیادی کاهش داده است.

نتایج این پژوهش نشان داد که کادمیم اکثر صفات مورد مطالعه را تحت تاثیر قرارمی‌دهد. وزن تر و خشک اندام‌هوایی و ریشه تحت تاثیر کادمیم کاهش پیدا کرده بود که این کاهش در وزن بطور مستقیم متاثر از کاهش رشد در گیاه بوده است. ریشه‌ها که وظیفه جذب آب و موادغذایی را دارند، تاثیر بسیار زیادی در جذب آب و املاح گوناگون دارند و عوامل مختلف محیطی می‌توانند ازطریق تاثیر بر ریشه، رشد گیاه را تحت تاثیر خود قرار دهند. یکی از این تنش‌ها، تنش فلزات سنگین است که رشد ریشه را محدود کرده و از طریق آن فعالیت‌های رشدی گیاه تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، اختلال در رشد ریشه باعث کاهش سطح جذب کننده مواد غذایی، تغییر در ساختار غشای یاخته‌ای و کاهش جذب محتوای آب شده که این مساله بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند تعرق، تنفس و فتوسنتز اثر گذاشته و در نهایت موجب کاهش رشد در سایر قسمت‌های گیاه و از جمله کاهش وزن تر و خشک گیاه خواهد شد (Verma and Dubey, 2001).

با توجه به نتایج، قارچ *Piriformospora indica* باعث کاهش روند نزولی کاهش وزن تر و خشک ریشه گیاه شده است. نتایج نشان داد که تیمار شاهد بیشترین وزن‌تر (۵۳/۲۲ گرم) و وزن خشک (۷/۵۲ گرم) را داشته و کمترین وزن‌تر (۲۰/۷۲ گرم) و وزن خشک (۳/۱۳ گرم) مربوط به تیمار ۶mg L^{-1} نیترات کادمیم در عدم تلقیح

گیاهان با قارچ *P. indica* بود (جدول ۱ و شکل ۲).

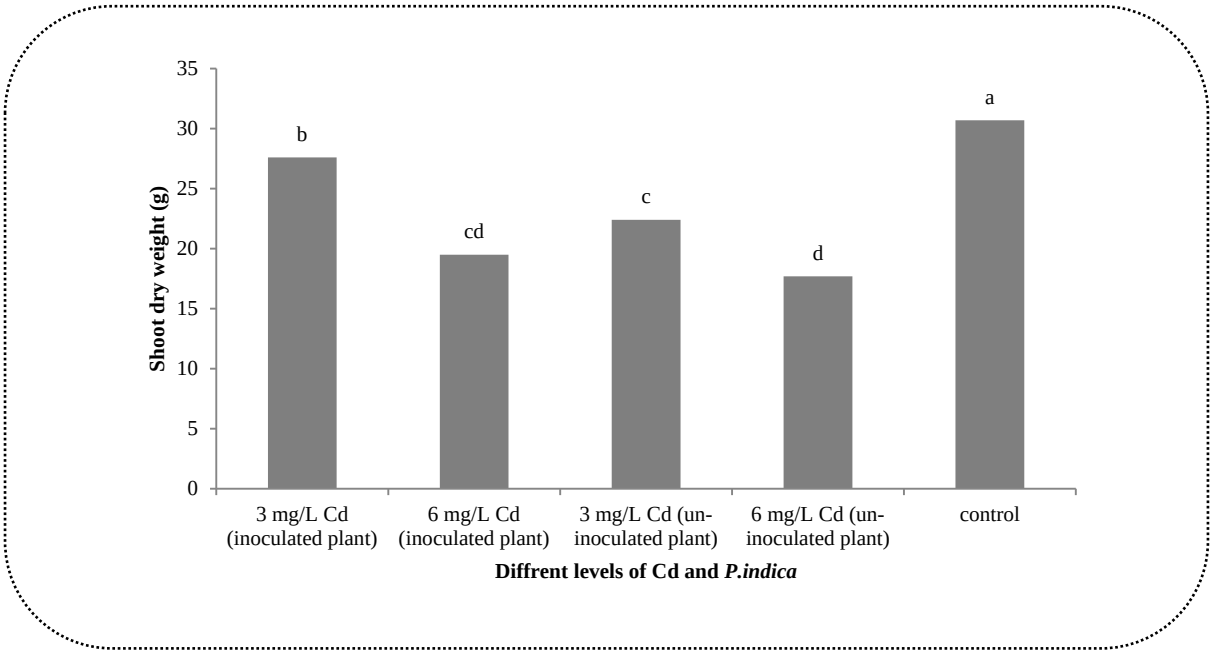
فلزات سنگین با تغییر در مورفولوژی ریشه، جذب مواد غذایی را کاهش داده و از این طریق تاثیر خود را بر وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی می‌گذارد (Fuentes *et al*., 2006). نتایج گزارشات مختلف در گیاهان مختلف مانند گشنیز (Tagharobiyan et al., 2016)، همیشه بهار (Yadegari *et al*., 2017) و ماش (Kehstegar *et al*., 2014) نیز کاهش در وزن بیوماس نشان داده که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

جدول ۱. مقایسه میانگین اثر استفاده ازقارچ Piriformospora indica بر برخی صفات مورفولوژیک گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت

Table 1. Mean comparison for the effect of using *Piriformospora indica* on some morphological traits of tomato under cadmium stress in aeroponic system

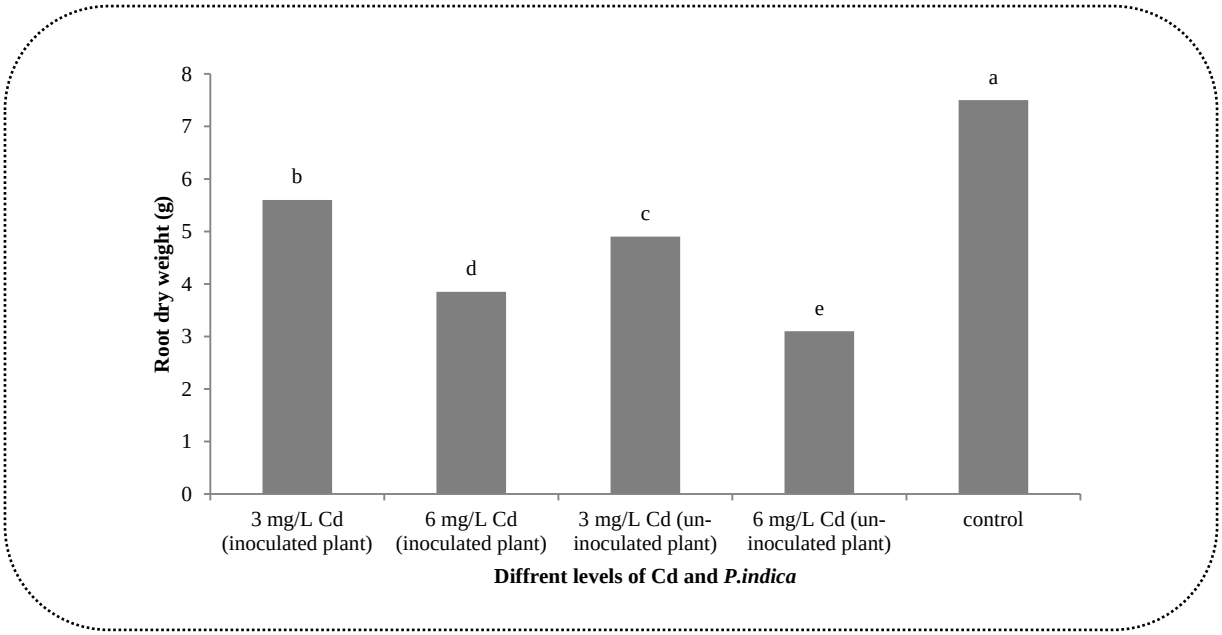
Treatment	Root fresh weight (g)	Shoot fresh weight (g)	Leaf number	Plant height (cm)	Root length (cm)
Control	53.22 a	141.78 a	86.62 a	148.25 a	84.23 a
plant inoculated with *P. indica* + Cd (3 mg L^{-1})	42.43 b	125.74 b	72.34 b	142.33 b	70.21 b
plant inoculated with *P. indica* + Cd (6 mg L^{-1})	27.51d	84.63 d	52.12 c	127.54 d	45.32 d
Cd (3 mg L^{-1})	36.34 c	100.21 c	55.44 c	132.81 c	60.51 c
Cd (6 mg L^{-1})	20.72 e	63.44 e	45.61 d	113.50 e	35.74 e

Means followed by the same letter(s) are not significantly different at 0.05 level of probability



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر استفاده ازقارچ *Piriformospora indica* بر وزن خشک اندام هوایی گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت

Figure 1.Mean comparison for the effect of using *Piriformospora indica* on shoot dry weight of tomato under cadmium stress in aeroponic system



شکل۲. مقایسه میانگین اثر استفاده ازقارچ *Piriformospora indica* بر وزن خشک ریشه گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت

Figure 1. Mean comparison for the effect of using *Piriformospora indica*on root dry weight of tomato under cadmium stress in aeroponic system

صفات فیزیولوژیک گیاه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، قند محلول و نامحلول، فنول، میزان پروتئین، لیپید پروکسید و نشت یونی گیاه گوجه‌فرنگی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. طبق نتایج مقایسه میانگین، تیمار شاهد بیشترین کلروفیل a (۲/۱۱ میلی‌گرم بر گرم) (شکل ۳)، کلروفیل b (۲/۰۸میلی‌گرم بر گرم) (شکل ۴) و کاروتنوئید (۲/۰۴ میلی‌گرم بر گرم) را داشته و کمترین کلروفیل a (۱/۳۲میلی‌گرم بر گرم) (شکل ۳)، کلروفیل b (۱/۱۰میلی‌گرم بر گرم) (شکل ۴) و کاروتنوئید (۱/۳۵میلی‌گرم بر گرم) مربوط به تیمار $6mg\ L^{-1}$ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بود (جدول۲). گیاهان تلقیح شده با قارچ *Piriformospora indica* روند نزولی کمتری از خود نشان دادند.

رنگیزه‌های فتوسنتزی یکی دیگر از صفاتی است که تحت تاثیر کادمیم کاهش داشته است. ایجاد اختلال در مراحل مختلف سنتز کلروفیل بوسیله فلزات سنگین از دلایل اصلی کاهش محتوای کلروفیل در گیاهان تحت تیمار عناصر سنگین است (Manio *et al*., 2003). در تحقیقیکه روی گیاه دارویی *Coleus forskohlii* انجام شد، تعامل *P. indica* با ریشه گیاه منجر به افزایش کلی زیست‌توده اندام هوایی، محتوای کلروفیل‌های a، b و مجموع آن‌ها در میلی‌گرم/گرم وزن‌تر بیشتر شد (Das, 2012).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تیمار $6mg\ L^{-1}$ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بیشترین قند محلول (۰/۲۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و قند نامحلول (۱/۱۹میلی‌گرم بر گرم وزن تر) را داشته و کمترین قند محلول (۰/۱۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و قند نامحلول (۰/۶۹میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مربوط به تیمار شاهد بود (جدول۲).

در رابطه همزیستی، قارچ مواد کربوهیدراتی را به‌طور عمده به شکل ساکاروز از گیاه دریافت می‌کند و عناصرغذایی (به‌طور عمده فسفر) را در اختیار گیاه قرار می‌دهد. به‌این‌ترتیب که عناصر غذایی از غشاء آربوسکول قارچ و از طریق حامل‌های غشایی که با شیب پروتون عمل

می‌کنند، جذب شده و سپس قارچ این عناصر را به‌صورت فعال در اختیارگیاه قرار می‌گیرد. مواد کربوهیدراتی موجود در آوند آبکش گیاه نیز ابتداتوسط قارچ به گلوکز و فروکتوز تبدیل شده و سپس توسط حامل‌ها جذب می‌گردد (Smith and Read, 1997).

بررسی‌ها نشان داد که در هلو زعفرانی میزان قند کل و ساکاروز در تیمار شاهد و تیمارهای دارای قارچ تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد دارد به‌طوری‌که میزان گلوکز در مقایسه با شاهد افزایش داشت (Ghasemnejhad and Rbagherifard, 2014). در مطالعه‌ای تلقیح گیاه با قارچ *Piriformospora indica* منجر به افزایش میزان کربوهیدرات‌های محلول شد (Baltruschat *et al*., 2008). تلقیح گیاه با میکروارگانیسم‌های اندوفیت موجب افزایش معنی‌دار میزان کربوهیدرات محلول برگ گیاه گندم در مقایسه با تیمار شاهد گردید. گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* بیشترین مقدارکربوهیدرات محلول را دارا بودند. میانگین کربوهیدرات محلول در برگ گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* در مقایسه با گیاهان شاهد ۱۴/۵۹درصد افزایش را نشان داد (Hajinia et al.,2011).

داده‌ها نشان داد که تیمار $6mg\ L^{-1}$ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بیشترین میزان فنول (۰/۱۱ میکروگرم در گرم وزن تر) و تیمار شاهد، کمترین فنول (۰/۰۶ میکروگرم در گرم وزن تر) را داشته است (جدول۲). گیاهان قادرند با تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نظیر ترکیبات فنلی از ساختارهای سلولی خود در برابر رادیکال‌های فعال تولیدشده در شرایط تنش محافظت کنند (Bettaieb *et al*., 2010).

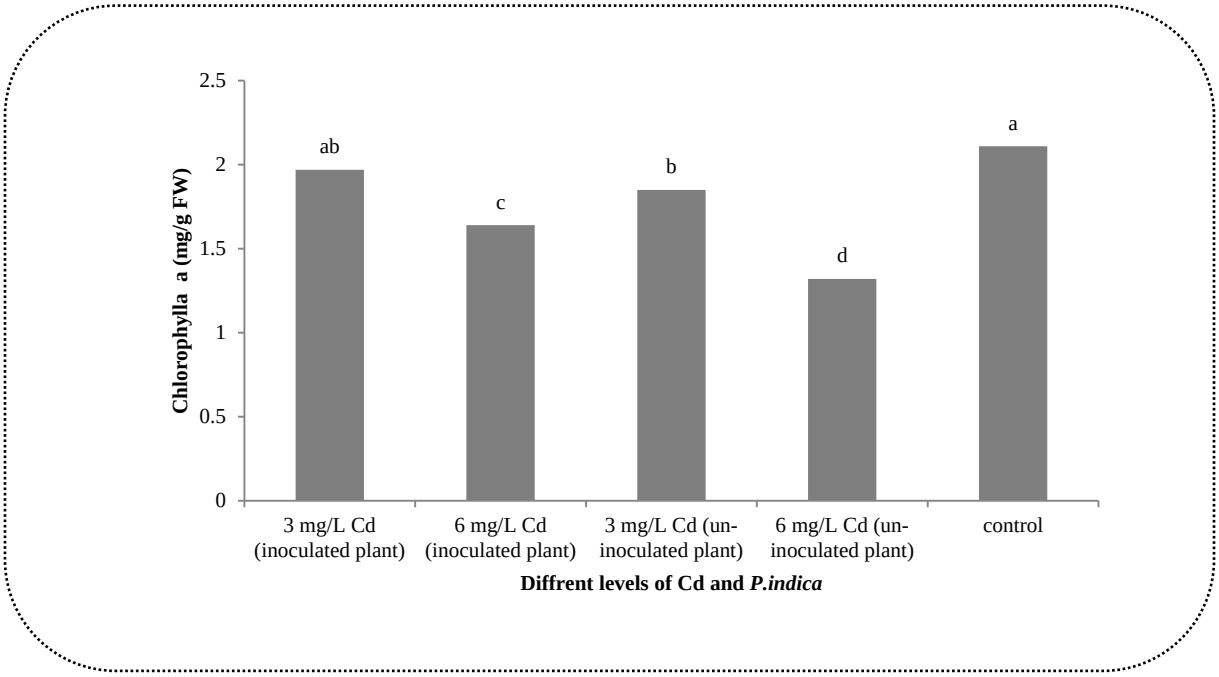
بر اساس نتایج، تیمار $6mg\ L^{-1}$ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بیشترین میزان لیپید پروکسید (۰/۳۸ میکرومول بر گرم) را داشته و کمترین لیپید پروکسید (۰/۱۹ میکرومول بر گرم) مربوط به تیمار شاهد بود (جدول۲).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین با افزایش فلزات سنگین، میزان پروتئین در گیاه گوجه‌فرنگی کاهش یافت، بطوریکه تیمار شاهد بیشترین میزان پروتئین (۰/۲۴ میلی‌گرم بر گرم) را داشته و کمترین میزان (۰/۱۴ میلی‌گرم بر گرم) مربوط به تیمار $6mg\ L^{-1}$ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بود (جدول ۲). یکی از دلایل کاهش پروتئین می‌تواند به دلیل تنش اکسیداتیو ایجاد شده توسط فلزات سنگین باشد که موجب ایجاد تغییر در غشای سلولی و تاثیر ناشی از آن بر متابولیسم پروتئین و قند در متابولیسم گیاه باشد که خود می‌تواند توجیهی برای کاهش رشد مشاهده شده در گیاه باشد (Bafeel, 2010).

بررسی نتایج بیانگر این است که تیمار $6mg\ L^{-1}$ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بیشترین میزان نشت یونی (۳۲/۵۴ درصد) را داشته و کمترین نشت یونی (۱۷/۰۴ درصد) مربوط به تیمار شاهد بود (جدول۲).

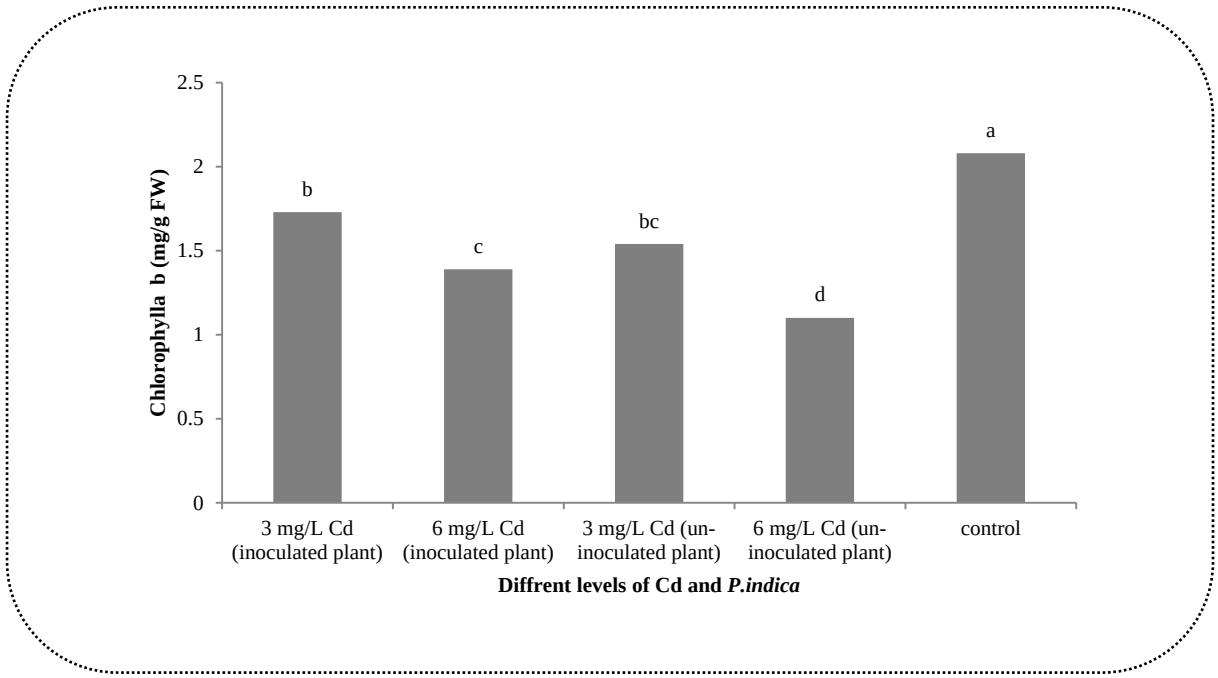
عوارض ناشی از عوامل تنش‌زای محیطی نظیر گرما، سرما، خشکی، شوری و بسیاری از عوامل تنش‌زای محیطی در مرحله اول روی غشاهای سلولی قابل‌مشاهده است. در اثر اعمال تنش، نفوذپذیری غشا نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. افزایش نشت الکترولیتی مواد نشانه‌ای از آسیب غشاها و کاهش پایداری غشاها می‌باشد که احتمالاً نتیجه تنش اکسیداتیو است (Oraei *et al*., 2010).

به نظر می‌رسد قارچ با کمک به پایداری غشاء و جلوگیری از نشت یونی در شرایط تنش به بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه کمک شایانی می‌نماید. تغییراتی که در ساختار غشای سلول در اثر تغییر فاز چربی‌ها و تغییرات دیگر ایجاد می‌شود، سبب افزایش نفوذپذیری غشا نسبت به یون‌ها و ماکرو- مولکول‌ها می‌گردد. با افزایش شدت تنش، محتویات بیشتری از سلول‌ها در اثر تخریب غشا به بیرون تراوش می‌کند.



شکل۳. مقایسه میانگین اثر استفاده ازقارچ *Piriformospora indica* بر کلروفیل aگیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت

Figure 3.Mean comparison for the effect of using *Piriformospora indica*on Chlorophyll a of tomato under cadmium stress in aeroponic system



شکل۴. مقایسه میانگین اثر استفاده ازقارچ *Piriformospora indica* بر کلروفیل bگیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت

Figure 4.Mean comparison for the effect of using *Piriformospora indica*on Chlorophyll b of tomato under cadmium stress in aeroponic system

جدول ۲. مقایسه میانگیناثر استفاده از قارچ *Piriformospora indica* بر برخی صفات فیزیولوژیک گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت

Table 2. Mean comparison for the effect of using *Piriformospora indica*on some physiological traits of tomato under cadmium stress in aeroponic system

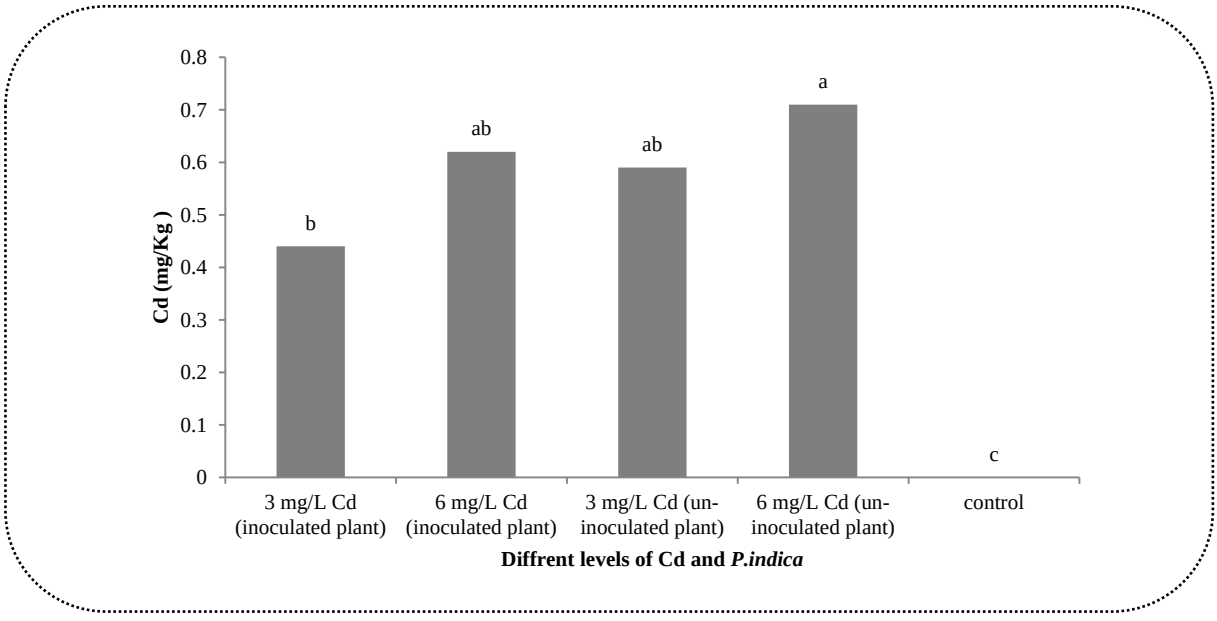
Treatment	Carotenoid (mg/g FW)	Soluble sugar (mg/g)	Insoluble sugar (mg/g)	Phenol (FWµg/g)	Electrolyte leakage (%)	Proxidase (FWµmol/g)	Protein (mg/g)
Control	2.04 a	0.14 c	0.69 c	0.06 cd	17.04 e	0.19 d	0.24 a
plant inoculated with *P. indica* + Cd (3 mg L^{-1})	1.82 b	0.22 b	0.72 c	0.05 d	21.41 d	0.22 d	0.22 b
plant inoculated with *P. indica* + Cd (6 mg L^{-1})	1.44 cd	0.24 a	0.91 b	0.07 c	29.22 b	0.33 b	0.16 d
Cd (3 mg L^{-1})	1.69 bc	0.23 b	0.89 b	0.08 b	25.07 c	0.31 bc	0.19 c
Cd (6 mg L^{-1})	1.35 d	0.25 a	1.19 a	0.11 a	32.54 a	0.38 ab	0.14 e

Means followed by the same letter(s) are not significantly different at 0.05 level of probability

میزان آهن، منیزیم، روی، فسفر و کادمیوم

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر میزان کادمیم توسط گیاه گوجه‌فرنگی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. طبق نتایج مقایسه میانگین، تیمار شاهدکمترین میزان کادمیم را داشته و بیشترین میزان کادمیم (۰/۷۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به تیمار mg L^{-1} ۶ نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بود (شکل ۵).

نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم محلول غذایی، میزان تجمع این عناصر در گیاه افزایش یافته است. نتایج مطالعات سایر پژوهشگران نیز نشان داد که با این افزایش غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی میزان این عناصر نیز افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش غلظت این عنصر در محیط رشد این گیاهان است (Cataldo *et al.*, 1978;Yang *et al.*, 1996).



شکل۵. مقایسه میانگین اثر استفاده ازقارچ *Piriformospora indica* بر میزان کادمیم گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت

Figure 5.Mean comparison for the effect of using *Piriformospora indica*on cadmium of tomato under cadmium stress in aeroponic system

اثر تیمارهای مختلف بر میزان آهن، روی، فسفر و منیزیم گیاه گوجه‌فرنگی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. طبق نتایج مقایسه میانگین تیمار شاهد بیشترین میزان آهن (۲/۲۱ میلی‌گرم بر گرم)، منیزیم (۰/۲۷ میلی‌گرم بر گرم)، روی (۰/۳۸ میلی‌گرم بر گرم) و میزان فسفر (۰/۰۹ میلی‌گرم بر گرم) را داشته و کمترین میزان آهن (۰/۶۲ میلی‌گرم بر گرم)، میزان منیزیم (۰/۱۳ میلی‌گرم بر گرم)، میزان روی (۰/۱۴ میلی‌گرم بر گرم) و میزان فسفر (۰/۰۲ میلی‌گرم بر گرم) مربوط به غلظت ۶mg L^{-1} نیترات کادمیم در عدم تلقیح گیاهان با قارچ *P. indica* بود (جدول ۳).

نتیجه گیری کلی

نتایج حاصل از بررسی انجام شده نشان دهنده تاثیر منفی کادمیم بر اکثر صفات مورد مطالعه بود. استفاده از قارچ *Piriformospora indica* توانست اثرات منفی ناشی از سمیت کادمیم را بر صفات موفولوژیک و فیزیولوژیک مورد مطالعه تا حدی کاهش دهد. همچنین نتایج نشان داد که به دلیل سهولت بررسی تمام مراحل رشد و نمو ریشه‌ها و تاثیر مستقیم فلزات سنگین روی آنها را در یک محیط کنترل شده، از سیستم هواکشت می‌توان بخوبی برای مطالعه اثر فلزات سنگین و بخصوص اثر آن بر ریشه استفاده کرد.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر استفاده از قارچ *Piriformospora indica* بر میزان برخی عناصر گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش کادمیم در سیستم هواکشت

Table 3. Mean comparison for the effect of using *Piriformospora indica* on some concentration of element of tomato under cadmium stress in aeroponic system

Treatment	P (mg/g)	Zn (mg/g)	Mg (mg/g)	Fe (mg/g)
Control	0.09 a	0.38 a	0.27 a	2.21 a
plant inoculated with *P. indica* + Cd (3 mg L^{-1})	0.08 b	0.33 b	0.21 b	1.85 b
plant inoculated with *P. indica* + Cd (6 mg L^{-1})	0.04 c	0.22 d	0.15 cd	0.88 d
Cd (3 mg L^{-1})	0.05 c	0.29 c	0.17 c	1.58 c
Cd (6 mg L^{-1})	0.02 d	0.14 e	0.13 d	0.62 e

Means followed by the same letter(s) are not significantly different at 0.05 level of probability

منابع

Alloway, B.J. 1990. *Soil processes and the Behavior of Metals.* Chap 2 in Alloway, B.J.(ed) Heavy Metals in soils, Blackie Academic and professional. Glasgow. 7-28.

Arduini, I., Godbold, D.L., and Onnis, A. 1994. Cadmium and copper change root growth and morphology of *Pinus pinea* and *Pinus pinaster* seedlings. Physiologia Plantarum. 92:675-680.

Arnon, A. N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. Agronomy Journal. 23:112-121.

Bafeel, S. 2010.Physiological and biochemical aspects of tolerance in *Lepidium sativum*. (Cress) to lead toxicity. Catrina (Egyption Society for Environmental Sciences). 5(1):1-7.

Bagheri, A.A., Saadatmand, S., Niknam, V., Nejadsatari, T.,and Babaeizad, V. 2013. Effect of endophytic fungus, *Piriformosporaindica* on growth and activity of antioxidant enzymes of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity stress. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research. 1(11): 1337-1350

Baltruschat, H., Fodor, J.B.D., Harrach, E., Niemczyk, B., Barna, G., and Skoczowski, A. 2008. Salt tolerance of barley induced by the root endophyte *Piriformospora indica* is associated with a strong increase in antioxidants. New Phytologist. 180: 501-510.

Bathes, V., and Wunderlich, B. 1973. Heat capacity of molten polymers. Journal of Polymer Science, Polymer Physics Edition. 11 (5): 861-873.

Bettaieb, I., Bourgou, S., Wannes, W.A., Hamrouni, I., Limam, F.,and Marzouk, B. 2010. Essential oils, phenolics, and antioxidant activities of different parts of cumin (*Cuminum cyminum* L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 58: 10410-10418.

Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principles of protein-dyebinding.Analytical Biochemistry.72: 248-254.

Cataldo, D.A., Garland, T.R.,and Wildung, R.E. 1978.Nickel in plants. Plant Physiology. 62:566-570.

Das, A., Kamal, S., Shakil, N.A., Sherameti, I., Oelmüller, R., Dua, M., Tuteja, N., Johri, A.K.,and Varma, A. (2012). The root endophyte fungus *Piriformospora indica* leads to early flowering, higher biomass and altered secondary metabolites of the medicinal plant, Coleus forskohlii. Plant signaling & behavior. 7(1):103-112.

Dong, J., Wu,F.,and Zhang, G. 2005. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. Journal of Zhejiang University Science B. 6(10): 974-980.

Esmaielpour, B., Jalilvand, P., and Hadian, J. 2013. Effects of drought stress and arbuscular mycorrhizal fungi on some morphophysiological traits and yield of savory (*Satureja hortensis* L.). Journal of Agroecology. 5(2): 169-177.

Figueras, M., Pujal, J., Saleh, A., Save, R., Pages, M.,and Goday, A. 2004. Maize Rab17 over-expression in Arabidopsis plants promotes osmotic stress tolerance. Annals Applied Biology. 144: 251-7.

Fuentes, D., Disante , K.B., Valdecantos, A., Cortina, J.,and Vallejo, V.R. 2006. Response of *Pinus halepensis* Mill. seedlings to biosolids enriched with Cu, Ni and Zn in three mediterranean forest soils. Environmental Pollution.145 (1): 316-323.

Ghabooli, M., Khatabi, B., Ahmadi, F.S., Sepehri, M., Mirzaei, M., Amirkhani, A.,and Salekdeh, G.H. 2013.Proteomics study reveals the molecular mechanisms underlying water stress tolerance induced by *Piriformospora indica* in barley. Journal of Proteomics. 94: 289-301.

Ghasemnejhad, A., and Rbagherifard, A.A. 2014. Studying the qualitative characteristics of peach (*Prunus persica* (L.) batsch. cv. zaferani) inoculated with symbiotic fungus of *Piriformospora indica*. Journal of Plant Environmental Physiology. 9(3):43-52

Goncalvez, J., Beker, A., cargnelutti, D., Tabaldi, L., Pereira, L., Battisti, V.,and Schetinger, M. 2007. Cadmium toxicity causes oxidative stress and induces response of the antioxidant system in cucumber seedling. Brazilian Journal Plant Physiology. 19:223-232.

Hajinia, S., Zare, M.J., Mohammadi Goltapeh, E., and Rejali, F. 2011. Investigating the efficacy of endophytic fungus *Piriformospora indica* and Azospirillum Strains on alleviation of detrimental effect of salt stress on wheat (*Triticum aestivum* cv. Sardari). Environmental Stresses in Crop Sciences. 4(1):21-31.

Hassan, M. J., Zhu, Z., Amad,B.,and Mahmood, Q. 2006. Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. Caspian Journal of Environmental Science. 4(1): 1-8.

Hayden, A. L., Brigham, L. A.,and Giacomelli, G. A. 2004. Aeroponic cultivation of ginger (*Zingiber officinalis*) rhizomes. Acta Horticulturae. 659: 397-402.

Hui, F., Liu J., GAO, P.,and Lou, B. 2015. *Piriformospora indica* confers cadmium tolerance in *Nicotiana tabacum*. Journal of Environmental Science. 37: 184-191.

Irigoyen J.J., Emerich D.W.,and Sanchez-Diaz M. 1992. Water stress induced changes in concentrations of prolineand total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. Journal of Plant Physiology. 55-60.

James, B., Rodel, D., Lorettu, U., Reynaldo, E.,and Tariq, H. 2008.Effect of vesicular arbuscular mycorrhiza (VAM) fungi inoculation on coppicing ability and drought resistance of Senna Spectabilis.Pakistan Journal of Botany. 40(5):2217-2224.

Javaid, A.,and Riaz T. 2008. Mycorrhizal colonization in different varieties of gladiolus and its relation with plant vegetative and reproductive growth. International Journal of Agriculture and Biology. 10: 278–282.

Kehstegar, M., Afsharand, S.A., and Nematpour, S.F. 2014. Effect of Heavy Metals Cu and Pb on Some Growth Characteristics, Proline Content and Lipid Peroxidation in Two Varieties of Mung Bean (*Vigna radiate*). Journal of Crop Ecophysiology. 8 (3): 374-363

Khalvati, M. A., Mozafar, A.,and Schmidhalter, U. 2005.Quantification of water uptake by arbuscularmycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress. Plant Biology.7(6): 706-712.

Khatib, M., Rashe Mohasel, M.H., Ganjali, A., and Lahooti, M. 2008. The effects of different nickel concentrations on some morpho-physiological characteristics of parsley (*Petroselinum crispum*). Iranian Journal of Field Crops Research. 6(2): 295-302.

Lorenz, O.A.,and Maynard, D.N. 1988. *Knott's handbook for vegetable Growers*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York.

Manio, T., Stentiford, E.I.,and Millner, P.A.2003. The effect of heavy metals accumulation on the chlorophyll concentration of Typha latifolia plants, growing in substrate containing sewage sludge compost and watered with metaliferus water. Ecological Engineering. 20:65-74

Metwally, A., Finkemeier, I., George, M.,and Dietz, K.J. 2003. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedling. Plant physiology. 132:272-281.

Oraei, M., Tabatabaei, S.J., A Imani, A., and Fallahi, E. 2010. Interactive effect of boron toxicity and rootstock on the growth, photosynthetic rate and nutrient concentrations of almond tree. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production. 20(2):49-63

Qiang, X., Weiss, M., Kogel, K. H.,and Schafer, P. 2011. *Piriformospora indica*—a mutualistic basidiomycete with an exceptionally large plant host range. Molecular Plant Pathology. 13(5):508-511.

Singleton, V.L.,and Rossi, A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-posphotungustic acid reagent. American journal of Enology and Viticulture. 16(3): 144-158.

Smith, S.E.,and Read, D.J. 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press, San Diego, CA.p. 769.

Stewart, R.R.C.,and Bewley, J.D. 1980. Lipid peroxidation associated aging of soybean axes. Plant Physiology. 65: 245-248

Tagharobiyan, M., Poozesh, V. and Khorshidi, M. 2016. Influence of nickel on the indices of growth and content of photosynthetic pigments, protein, soluble sugar, proline and nickel accumulation in coriander. Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology. 2 (2): 59-74

Valentovic, P., Luxova, M., Kolarovic, L.,and Gasparikova, O.2006.Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and waterrelations in two maize cultivars. Plant Soil and Environment. 52: 186-191.

Varma A., Verma, S., Sahay, N., Bütehorn, B., and Franken P. 1999. *Piriformospora indica*, a cultivable plant-growth-promoting root endophyte. Applied and Environmental Microbiology. 65(6): 2741-2744.

Varma, A., Abbott, L., Werner, D.,and Hampp, R. 2004. *The state of art. Plant surface microbiology. Plant surface microbiology*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1-11.

Verma, S.,and Dubey, R. 2001. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice. Biologia Plantarum. 44 (1): 117-123.

Yadegari, M., Eskandari, S., and Irani Pour, R. 2017. Study of lead and cadmium accumulation in marigold medicinal plant (*Calendula officinalis*). Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research. 12(47): 76-92

Yang, X., Baligar, V.C., Martens, D.C.,and Clark, R.B. 1996. Plant tolerance to Ni toxicity. I. Influx, transport and accumulation of Ni in four species. Journal of Plant Nutrition. 19:73–85.