Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 13
No. 4 (52)

Received:
2023-09-17

Accepted:
2023-12-01

Pages: 27-39

Evaluation of the Inhibiting Effect of Copper Oxideon Root Growth and Density in the Vicinity of Subsurface Irrigation Nozzles

Adel Aminpour[1], Hossein Ali Bahrami[2] and Hojjat Ghorbani Vaghei[3*]

1) Masters Candidate, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Iran.
2) Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Iran.
3) Assistant Professor, Department of Natural Resources, Gonbad Kavous University, Iran.
*Corresponding author email: ghorbani169@yahoo.com

Abstract:

Background and Aim: Due to the population growth and the increase in global demand for food security, the correct use of water and soil resources, especially in arid and semi-arid regions, is necessary and inevitable. Providing water sources in agricultural and garden lands by clay irrigation method has been customary in arid and semi-arid regions of Iran for a long time. However, the development of this method has not received much attention due to the invasion of the roots into the clay nozzles and the clogging of the pores caused by the growth of algae, fungi, and bacteria. One of the main goals of this article is to provide a practical solution to combat root invasion towards the wall of clay subsurface irrigation nozzles (porous clay capsules). This research seeks to investigate the effect of copper oxide added to the porous clay capsule wall in inhibiting root invasion.

Method: This research aims to reduce the density and distribution of roots in the vicinity of porous clay capsules, by investigating the effect of copper oxide on the wall of the clay nozzle as an inhibitor of root movement in the form of a completely randomized design with 4 treatments with zero concentrations (control). 1000ppm, 5000ppm and 10000ppm copper) in 3 replications in the research greenhouse of Tarbiat Modares University in 1401 on sweet pepper variety 302. In this experiment, the volume, length and dry weight of root, fresh weight of leaf and stem, dry weight of leaf and stem and ratio of dry weight of leaf/root were measured at the end of vegetative growth stage of the bell pepper plant.

Results: The results showed that copper levels did not have a significant effect on the volume and length of the bell pepper plant's root, but it had a significant effect on the dry weight of the root. The highest root dry weight (3.27 grams) was obtained at the probability level of 5% corresponding to the level of 10000 ppm of copper sulfate. Also, the results of the investigation of the root distribution system showed that the distribution of the root distribution in the control treatment was the same in all directions, while in the 10000 ppm copper sulfate treatment, this distribution was severely limited around the wall of the clay nozzles, so that the most the root accumulation around the nozzles was related to the control treatment and the lowest root accumulation was visible in the 10000 ppm treatment. The results showed that the highest development of the root system around the nozzles was related to the control treatment and the lowest was observed in the 10000 ppm treatment in the control treatment, the porous clay capsule were heavily invaded by plant roots and the roots completely surrounded the porous clay capsules. Therefore, adding copper sulfate to the wall of the porous clay capsule and fixing it in its pores as copper oxide has had positive effects in inhibiting the invasion of plant roots into clay nozzles.

Conclusion: Results indicated that, increasing the concentration of copper oxide in the ceramic wall of the porous clay capsule was able to reduce the adhesion of the root to the wall. In the cross-sectional shear of pots, invasion and density of the root on the porous clay capsule walls could be tangibly observed in the control treatment (zero concentrations). While the lowest root density around the porous clay capsules was observed in the 10000 ppm treatment.

Keywords: Bell pepper, clogging of nozzles, mineral oxidizers, porous clay capsule, soil moisture

10.30495/WSRCJ.2023.75291.11404

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثر بازدارندگی اکسید مس بر رشد و تراکم ریشه درمجاورت گسیلنده در آبیاری زیرسطحی

عادل امین‌پور[1]، حسین علی بهرامی[2] و حجت قربانی واقعی[3]*

۱) دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲) استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳) استادیار گروه منابع طبیعی دانشگاه گنبد کاووس، گنبد، گلستان، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: ghorbani169@yahoo.com

چکیده:

زمینه و هدف: با توجه به رشد جمعیت و افزایش تقاضای جهانی به مواد غذایی، استفاده صحیح از منابع آب و خاک به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. تامین منابع آب در اراضی زراعی و باغی به روش آبیاری سفالی از دیرباز در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مرسوم بوده است. با این وجود یکی از موانع توسعه این روش گرفتگی نازل‌های سفالی در اثر هجوم ریشه‌ها و مسدود شدن منافذ ناشی از رشد جلبک ها، قارچ ها و باکتری ها می‌باشد. ارائه راه‌حل کاربردی در مبارزه با هجوم ریشه به سمت دیواره نازل های آبیاری زیرسطحی سفالی (کپسول رسی متخلخل) از اهداف اصلی مقاله حاضر است. این تحقیق به دنبال بررسی اثر اکسید مس افزوده شده به دیواره کپسول‌های رسی متخلخل در مهار هجوم ریشه است.

روش پژوهش: این پژوهش با هدف کاهش تراکم و توزیع ریشه‌ها در مجاورت کپسول‌های رسی متخلخل، با بررسی اثر اکسید مس در دیواره نازل سفالی به عنوان یک ماده بازدارنده حرکت ریشه در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تیمار با غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱۰۰۰ ppm، ۵۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰۰ ppm مس) در ۳ تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۴۰۱ بر روی گیاه فلفل دلمه‌ای رقم ۳۰۲ انجام شد. در این آزمایش اندازه‌گیری حجم، طول و وزن خشک ریشه، وزن تر برگ و ساقه، وزن خشک برگ و ساقه و نسبت وزن خشک برگ/ریشه در پایان مرحله رشد رویشی گیاه فلفل دلمه‌ای انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که سطوح مس بر حجم و طول ریشه گیاه فلفل دلمه‌ای تاثیر معنی‌داری نداشته است، اما بر وزن خشک ریشه تاثیر معنی‌داری داشت. بیشترین وزن خشک ریشه (۳/۲۷ گرم) در سطح احتمال ۵ درصد مربوط به سطح ppm ۱۰۰۰۰ سولفات مس بدست آمد. همچنین نتایج بررسی سیستم توزیع ریشه نشان داد که پراکنش توزیع ریشه در تیمار شاهد در همه جهت یکسان بوده است در حالی که در تیمار ppm ۱۰۰۰۰ سولفات مس این پراکنش در اطراف دیواره کپسول رسی متخلخل به شدت محدود شده بود به طوری که بیشترین تجمع ریشه به دور گسیلنده‌ها مربوط به تیمار شاهد و کمترین تجمع ریشه در تیمار ppm ۱۰۰۰۰ قابل مشاهده بود. نتایج نشان داد، کپسول‌های رسی متخلخل در تیمار شاهد به شدت مورد هجوم ریشه گیاه قرار گرفته بودند و ریشه‌ها بطور کامل دور کپسول‌های رسی متخلخل را احاطه کرده بودند. بنابراین افزودن سولفات مس به دیواره کپسول رسی متخلخل و تثبیت آن در منافذ آن به صورت اکسید مس، اثرات مثبتی در مهار هجوم ریشه گیاه به نازل‌های سفالی به همراه داشته است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که افزایش غلظت اکسید مس در دیواره سرامیکی کپسول رسی متخلخل، توانسته بود از چسبانندگی ریشه به دیواره بکاهد. در برش عرضی گلدان‌ها هجوم و تراکم ریشه روی سطح کپسول رسی متخلخل شاهد بصورت ملموسی قابل رویت و مشاهده بود. در حالی که کمترین تراکم ریشه اطراف کپسول‌های رسی متخلخل مربوط به تیمار ppm ۱۰۰۰۰ مشاهده شد.

کلید واژه‌ها: اکسید کننده‌های معدنی، رطوبت خاک، فلفل دلمه‌ای، کپسول رسی متخلخل، گرفتگی نازل‌ها

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال سیزدهم
شماره ٤ (٥٢)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۹/۱۰

صفحات: ۳۹-۲۷

10.30495/WSRCJ.2023.75291.11404

مقدمه

روش آبیاری سفالی یکی از موثرترین روش‌ها برای آبیاری در اراضی کوچک مقیاس است. در این روش به دلیل رهاسازی تدریجی آب در جوار ریشه گیاهان و جلوگیری از اتلاف آب به صورت تبخیر، از کارایی بالایی نسبت به سایر سیستم‌های آبیاری سطحی تحت فشار برخوردار است (Vahabi mashhor et al., 2020). استفاده از این روش در خاک‌های سبک بافت با نفوذپذیری بالا و نیز اراضی شور، با محدودیت مواجه است (Bhatt et l., 2013). افزایش کارایی آب، کاهش تبخیر از سطح و جلوگیری از تلفات نفوذ عمقی در منطقه توسعه ریشه گیاه از مزیت‌های بکارگیری این روش در تامین نیاز آبی گیاهان می‌باشد (Siyal and Skaggs, 2009). از گذشته، این روش‌ها به شیوه‌های مختلفی مانند آبیاری با لوله‌های سفالی رسی متخلخل (Ashrafi et al., 2002; Qiaosheng et al., 2007) و آبیاری سفالی (Bainbridge, 2001; Siyal et al., 2009; ShamsAli et al.,2018) به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطالعه و اجرا شده است.

بگارگیری روش تأمین رطوبت خاک با قطعات سفالی کوچک (کپسول‌های رسی متخلخل) در مزارع کوچک و متوسط مقیاس مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به طور محدود صورت گرفته است (Bastani, 2018; ShamsAli et al., 2018; Vahabi Mashhor et al., 2020). در بهینه سازی مصرف آب برای گیاه ریحان به دو روش آبیاری زیر سطحی و سطحی نشان داد که بیشترین مقدار بهره‌وری آب در سیستم آبیاری زیرسطحی گلدانی برابر ۱۰/۳۳ گرم بر لیتر بود در حالی که کم‌ترین مقدار آن برای سیستم آبیاری سطحی و برابر ۱/۷۹گرم بر لیتر گزارش شده است. نازل‌های سفالی از نوع کپسول‌های رسی، قادر به تامین رطوبت زیرسطحی خاک در محدوده ظرفیت زراعی خاک است و هدر رفت آب را چه به صورت سطحی (تبخیر) و چه به صورت نفوذ عمقی به حداقل می‌رساند. استفاده از کپسول های رسی متخلخل تاثیر قابل توجهی در کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری بارانی دارد (Rashidi et al., 2018).

کپسول‌های رسی به عنوان یک روش کاربردی و با اهمیت در افزایش کارایی مصرف آب برای بسیاری از اراضی کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در کانون توجه محققان قرار دارد (Ghorbani et al., 2023). اما گرفتگی نازل‌های آبیاری زیرسطحی ناشی از فعالیت‌های میکروبی و نیز حمله ریشه‌های موبین دو مشکل عمده استفاده از آنهاست که میل و رغبت عمومی به استفاده از این سامانه آبیاری را تحت تاثیر قرار داده است. راه‌حل‌های مختلفی برای پاک‌سازی و گرفتگی نازل‌ها نظیر استفاده از مواد اکسیدکننده قوی همچون پرمنگنات پتاسیم، اسیدنیتریک، اسیدفسفریک و اسیدسولفوریک وجود دارد. برخی از این مواد به صورت دوره‌ای در آب آبیاری به صورت کود محلول در آب به سیستم آبیاری تزریق می‌شوند (Sefid Kouhi and Barzegar, 2014). در صنایع غیرکشاورزی استفاده از کلر، کلرآمین، دی‌اکسیدکلر، آهک، برمید ید، دی‌اکسیدتیتانیوم و اکسید نقره نیز گزارش شده است (Massoudinejad et al., 2014). البته استفاده از اشعه ماورای بنفش، ازن‌زنی و هیدروژن پروکساید نیز متداول است که مورد توجه کاربران قرار دارد (Shakohi et al., 2007). اما این روش‌ها با خطرات خاص نگهداری، حمل و همچنین خطرات حین مصرف همچون تولید محصولات جانبی سمی همراه هستند. لذا تا حد امکان در سامانه های آبیاری باید به دنبال روش‌های با مضرات جانبی کمتر بود. قربانی و بهرامی (۲۰۲۱)، برای رفع مشکل حمله ریشه به نازل‌ها، عمق کارگذاری آنها را از ۳۰ به ۶۰ سانتی-متری سطح خاک انتقال دادند(Ghorbani and Bahrami, 2021). اما همیشه و همه جا نمی‌توان از این روش برای فرار از هجوم ریشه‌ها استفاده کرد زیرا در مناطق با عمق کم خاک، در عمل کارگذاری عمقی این قطعات مقدور نیست. از طرفی کارگذاری قطعات در عمق بیشتر با هزینه بیشتر همراه است و همین امر هزینه اجرای این نوع سامانه آبیاری زیرسطحی را افزایش می‌دهد. به نظر می‌رسد استفاده از یکسری ترکیبات شیمیایی تثبیت شده در دیواره نازل‌های سفالی که قدرت تخریبی بالایی در از بین بردن سلول‌های تارکشنده ریشه دارند راه‌حل پیشنهادی برای گذر از این مشکل باشد.

مس یک فلز ضروری برای گیاهان است و نقش اصلی در فتوسنتز، تنفس، زنجیر انتقال الکترون، در سنجش اتیلن، متابولیسم دیواره سلولی و محافظت از استرس اکسیداتیو دارد. اما اگر غلظت مس از حد سمیت بگذرد باعث آسیب‌هایی به گیاهان می‌شود. تولید گونه‌های فعال اکسیژن یکی از پیامدهای عمده تجمع مس در سلول‌های گیاهان است (Saglam et al., 2016). اجزای سلولی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها یا اسیدهای نوکلئیک به دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن آسیب می‌بینند زیرا گیاهان در معرض یون‌های مس اضافی آزاد قرار می‌گیرند (Halliwell and Gutteridge, 1984). به نظر می‌رسد اولین اثر ظاهری مس روی گیاه محدود نمودن رشد ریشه است که این کاهش، از طریق کاهش تقسیم سلولی و در نتیجه کاهش رشد طولی ریشه اتفاق می‌افتد (Verma et al., 2011; Thounaojam et al., 2012). غلظت بحرانی مس با کاهش زیست توده گیاه، جلوگیری از رشد ریشه، برنز شدن و نکروز شدن درگیاهان مشخص می‌شود. تاثیر ملموس مسمومیت مس تا حد زیادی بر کاهش رشد ریشه نمایان است (Saglam et al., 2016). غلظت بالای مس در سلولها (بیش از حد بحرانی)

باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند رادیکال سوپر اکسید، اکسیژن تک اتمی و رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود (Liu et al., 2015 ;Tie et al., 2012). افزایش اکسیداسیون اجزای بافت می‌تواند باعث آسیب به غشاها، اسیدهای نوکلئیک پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها شود که در نهایت مرگ سلول را همراه دارد (Shahid et al., 2014). همچنین گزارش شده است که در غلظت‌های بالای مس، ساختار ریشه‌ها تغییر می‌کند. به طوری که رشد ریشه‌های اولیه مهار شده و تراکم ریشه‌های جانبی افزایش می‌یابد (Raldugina et al., 2016). اثرات سمیت مس به توانایی آنها برای تغییر ظرفیت از حالت احیا به حالت اکسید بستگی دارد و اکسیداتیو ناشی از تجمع یون‌های مس آزاد شده ممکن است رشد را به تاخیر بیاندازد (Raldugina et al., *2016*). اثر سمی مس بر مهار جوانه‌زنی بذر، می‌تواند ناشی از مهار کاتابولیسم (ABA) و استرس اکسیداتیو باشد (Viehweger, 2014; Ye et al., 2016).

در پژوهشی اثر محلول سولفات مس در پنج غلظت صفر، ۱، ۳، ۴ و ۷ میلی‌گرم در لیتر بر صفات جوانه‌زنی مثل درصد و سرعت جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه، طول ساقه‌چه و ریشه‌چه شبدر انجام گرفت (Habibvash et al., 2017). نتایج نشان داد که کمترین درصد جوانه‌زنی مربوط به تیمار ۷ میلی‌گرم در لیتر سولفات مس بود. همچنین وزن تر و خشک ریشه‌چه با افزایش غلظت سولفات مس کاهش یافت به طوری که بیشترین وزن تر و خشک ریشه‌چه مربوط به تیمار شاهد و ۱ میلی‌گرم در لیتر سولفات مس بود. در آزمایش دیگری اثر تیمار نیترات سرب و سولفات مس با غلظت‌های ۲ تا چند برابر غلظت مجاز هر یک از عناصر سرب و مس خاک (به ترتیب ۲۰ و ۱۰۰) بر بذر گونه چاودار کوهی (*Secale montanum*) در غلظت‌های صفر (شاهد)، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر در سه تکرار انجام شد (Tatian et al., 2012). در این تحقیق طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و طول گیاهچه تا آخرین روز آزمایش اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که حداکثر طول ریشه‌چه در تیمارهای شاهد و حداقل رشد طولی آن در تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر سولفات مس رخ داده است.

Elleuch و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی اثر غلظت‌های مختلف سولفات مس را بر جوانه‌زنی و رشد شنبلیله به مدت ۸ روز مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد میزان جوانه‌زنی در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار مس به طور قابل توجهی کاهش یافت. درصد جوانه‌زنی با غلظت ۲۰ میلی مولار مس نسبت به شاهد ۵۰٪ کاهش یافته بود. هم چنین حداکثر رشد طولی ریشه‌چه در تیمار ۰/۱ میلی‌مولار سولفات مس مشاهده شد.

در پژوهشی برای بررسی میزان حذف سیپرو فلوکساسین از روی سطوح سرامیکی نانو کامپوزیتی از اکسید مس استفاده شد (Bhattacharya et al., 2019). نتایج آنها نشان داد که نانوذرات اکسید مس تولید شده در جسم سرامیکی قادر به حذف ماده شیمیایی سیپرو فلوکساسین از روی پوشش سرامیک نانو کامپوزیت بود. آنها برای تبدیل سولفات مس به اکسید مس از روش حرارت دهی در کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده کردند. بر اساس مستندات علمی، طبق منحنی TGA، سولفات مس در دمای حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به اکسید مس تبدیل می‌شود (Nafees et al., 2015). با توجه به اثرات اکسید مس در اکسید کردن مواد آلی زیستی (نسبت کربن به نیتروژن کم) به نظر می‌رسد که اگر این میزان از غلظت مس به تناسب در سطح خارجی نازل سفالی یکسان توزیع شود می‌توان انتظار داشت که در اثر تماس ریشه گیاهان با دیواره قطعه سفالی از چسبیدن ریشه به نازل سفالی ممانعت به عمل آورد.

فلفل دلمه‌ای با نام علمی (*Capsicum annuum L.*) متعلق به خانواده بادمجانیان (*Solanaceae*) بوده و در بین سبزی‌ها به لحاظ ارزش غذایی و خواص دارویی از ارزش بالایی برخوردار می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که کاپسایسین (*Capsaicin*) موجود در این گیاه، باعث کاهش بروز زخم معده می‌شود. به‌علاوه، این سبزی سرشار از ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شامل ترکیبات فنولی، کاروتنوئیدها و ویتامین ث است. در آزمایش مارکوئس و همکاران (Marques et al., 2018)، مورفولوژی ریشه گیاه (*Hymenaea courbaril L*) تحت تاثیر تیمارهای مختلف غلظت مس پنج آبه (۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) با چهار تکرار در قالب بلوک‌های تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی آنالیز مورفولوژی ریشه، پارامترهای طول ریشه (cm)، سطح ریشه (cm^2)، قطر متوسط ریشه (mm) و حجم ریشه (cm^3) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت مس بالای ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر تمام پارامترهای مورد مطالعه مورفولوژی سیستم ریشه اثر منفی داشت. البته در غلظت بالاتر از ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، کاهش طول ریشه همچنان مشهود بود. هم چنین در سه پارامتر دیگر مثل حجم، مساحت سطح و قطر متوسط ریشه‌ها نیز اثر مهارکننده مس مشهود بود.

در مورد نحوه مبارزه با تهاجم ریشه به نازل‌های زیرسطحی سفالی تحقیقات چندانی انجام نشده است و به استناد گزارش‌ها عمدتا راه‌های مبارزه راه‌حل‌هایی چون افزایش عمق کارگذاری، تامین دائمی آب در نازل و بکارگیری سم ترفلان بوده است که همه پسند و در بسیاری از مواقع پیاده‌سازی آن مقدور نخواهد بود (Stephen *et* al., 2012; Stokstad, 2016). لذا این تحقیق به دنبال آن است تا نوعی نازل سفالی ریشه گریز تولید کند که در صورت تماس ریشه با آن کلاهک و نوک مریستم ریشه اکسید شده و پیشروی نکند. در صورت مشاهده اثرات مثبت این تحقیق در مهار ریشه، گام بزرگی در توسعه آبیاری زیر سطحی برداشته خواهد شد و مقدمات مطالعات گسترده برای بررسی اثرات انواع

اکسید کننده‌های معدنی در مهار رشد ریشه برای نیل به یک یا چند محصول تجاری برداشته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ۳۶ نازل سفالی به طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۳/۵ سانتی‌متر برای مس اندود شدن استفاده شد. قطعات سفالی با نام GB2 از شرکت اندیشه ورزان آب نما گستر (اندیشاب) تهیه و کد گذاری شدند. در گام اول، نازل‌های سفالی به مدت ۲۴ ساعت در محلول سولفات مس ($CuSO_4.5H_2O$) با غلظت‌های صفر (شاهد)، غلظت‌های ۱۰۰۰ ppm ، ۵۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰۰ ppm غوطه‌ور شدند. پس از هواخشک شدن، مجددا در کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد پخت شدند. در گام بعدی آزمایش گلدانی کاشت گیاه به صورت طرح کاملاً تصادفی با ۴ تیمار در ۳ تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه تربیت مدرس بر روی گیاه فلفل دلمه‌ای انجام شد.

به‌منظور بررسی اثر اکسید مس بر توان آبدهی نازل‌های سفالی، به روش بار افتان آبدهی نازل‌های مس اندود شده اندازه-گیری شد. به منظور بررسی اثر اکسید مس بر توان آبدهی کپسولهای رسی متخلخل، کپسول‌های رسی متخلخل مس اندود شده با غلظت‌های ۱۰۰۰ ppm ، ۵۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰۰ ppm سولفات مس و یک شاهد در سه تکرار، به مدت ۳۰ دقیقه ابتدا درون آب غوطه‌ور شدند تا اشباع شوند. سپس کپسولهای متخلخل به بطری‌های نوشابه ته زنی شده متصل و تا ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری ستون آب در آن ایجاد شد. بعد از ۳۰ دقیقه حجم آب خروجی از کپسولهای رسی متخلخل با استفاده از استوانه مدرج ۱۰۰ میلی‌لیتری برای محاسبه آبدهی قطعات اندازه‌گیری شد.

برای آزمون ریشه‌گریزی قطعات، ، در ۱۵ آذرماه ۱۴۰۱ تعداد ۳۶ گلدان انتخاب و در هر گلدان ۱۰ کیلوگرم خاک ریخته شد. نشاء فلفل دلمه‌ای رقم ۳۰۲ در وسط گلدان در عمق ۱۰ سانتی‌متری کاشته و به مدت دو هفته دور ساقه گیاه آبیاری انجام شد. ۳ نوع سفال مس اندود شده در غلظت‌های ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام ، ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام و ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام سولفات مس؛ یک سفال شاهد در سه تکرار درون خاک کار گذاشته و سرشیلنگی کپسولهای رسی متخاخل بیرون از خاک قرار گرفتند. بعد از کارگذاری کپسولهای رسی متخاخل در خاک یک بطری پلاستیکی که ته آن بریده شده بود (برای ریختن آب)، از طریق سرشیلنگی به کپسولهای رسی متخاخل به منظور آبیاری وصل شدند. هر ۷ روز یکبار حجم‌های مختلف آب (۲۰۰ml، ۳۰۰ml و ۵۰۰ml) آب به گلدان‌ها داده شد. سپس، مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره داشت در گلخانه تا پایان مرحله رشد رویشی گیاه صورت گرفت، پس از حدود ۷۰ روز تا قبل از میوه‌دهی فلفل دلمه‌ای، گلدان‌ها بریده شدند و با احتیاط عملیات ریشه‌شویی از خاک انجام شد. مطالعه نمای کلی ریشه به روش نیم‌رخ‌هاي بريده شده (Trench profile) که در مطالعات کلاسیک به‌وسیله (ویور) در سال ۱۹۲۶ معرفي شده است با تغییراتي هنوز هم مورد استفاده است. این روش شامل حفر یک برش است که به‌طور عمودي در داخل رديف و یا کنار یک بوته منفرد حفر مي‌شود و سطح قابل مشاهده○ آن ترسیم و یا عکس‌برداري مي‌گردد. در این تحیق برای بررسی روند کلی تجمع و تراکم ریشه از روش نیمرخ بریده شده استفاده شد. سپس ریشه‌ها از محل طوقه قطع و به همراه ساقه و برگ به آزمایشگاه منتقل شدند سپس وزن تر شاخساره (ساقه و برگ) در هر گلدان توسط ترازوی رقومی اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه-گیری وزن خشک ریشه و شاخساره (برگ و ساقه) پس از شستشو توسط آب معمولی و آب مقطر به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند سپس با ترازو وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حجم ریشه، از استوانه مدرج یک لیتری استفاده شد و طول ریشه از محل برش بوته تا کنار بلندترین ریشه در هر بوته با استفاده از خط‌کش استاندارد از نوع استیل با دقت ۰/۵ میلی‌متر انجام شد. بعد از جمع‌آوری داده‌های پژوهش، به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS و میزان آبدهی کپسول‌های رسی متخلخل با استفاده از آزمون T-test انجام شد.

نتایج و بحث

آنالیز خاک و آب آبیاری

جدول (۱) و (۲) بیانگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی (عمق نمونه برداری ۳۰ سانتی متر) و آب آبیاری برای کشت فلفل دلمه‌ای در گلدان است. با توجه به جدول (۱)، pH و EC خاک به ترتیب ۸/۱۲ و **(dS/m)** ۲/۳۶ است که این مقدار بیانگر آهکی بودن خاک می‌باشد. شوری خاک در حد مطلوب است و مقدار عددی آن به حضور یون کلسیم و منزیم خاک مربوط است و ربطی به سدیم محلول خاک ندارد. نوع بافت خاک لوم است. بافت خاک لومی از تهویه مطلوبی برخوردار است و ریشه برای تنفس و رشد طولی درصورت مهیا بودن رطوبت و مواد غذایی بهترین حالت را برای گسترش خواهد داشت لذا برای رشد گیاه فلفل دلمه‌ای مناسب است. ظرفیت تبادل کاتیونی ۱۱/۵۰ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم می-باشد این عدد به درصد پایین رس خاک مربوط است. آنالیز درصد توزیع ذرات خاک نشان داد که درصد رس، سیلت و شن این خاک به ترتیب ۱۵، ۴۳/۶۰ و ۴۱/۴۰ است. این خاک به علت درصد رس کم خاک قابلیت نگهداری مواد غذایی مطلوبی ندارد و برای کشتهای متراکم و پیوسته مقدار ماده آلی آن باید به ۲ درصد ارتقا داده شود. مقدار ماده آلی خاک کمتر از یک

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی

خاک	عناصر میکرو (mg/kg)					عناصر ماکرو (mg/kg)			رطوبت اشباع ٪	٪OC	٪OM	EC(dS/m)	pH	CEC(cmol/kg)
	Fe	Zn	Cu	Mn	N	P	K							
لوم	۱۰/۴۶	۲/۳۷	۱/۲۳	۱۱/۹۱	۰/۳	۱۷/۰۲	۳۰۳/۹		۲۴/۷۲	۰/۵۶	۰/۹۷	۲/۳۶	۸/۱۴	۱۱/۵۰

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، EC: هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع، OC: کربن آلی، OM: ماده آلی

جدول ۲. ویژگی‌های آب آبیاری

NO_3	P	SO_4	B	Mg	Ca	EC(dS/m)	pH	Cl
۲۷/۱۲	-	۷۰۰	۱۷/۷۲	۲۴۵	۹۸۰	۰/۶۸	۸/۲۵	۱۰۴۵

-واحد اندازه گیری عناصر میلی گرم بر لیتر است. pH بدون بعد و واحد است.

درصد است. برای بهبود وضعیت مواد غذایی خاک بعد از انتقال نشاء مواد مغذی ماکرو به خاک داده شد. از آنجا که رشد رویشی گیاه بعد از انتقال نشاء کمتر از ۳۰ روز و بافت خاک نیز سبک بود از افزودن ماده آلی به خاک صرفه نظر شد اما برای کمک به توسعه ریشه دوانی ارتوفسفات محلول در آب به گیاه همراه آب آبیاری با غلظت یک در هزار داده شد.

جدول (۲) بیانگر وضعیت آب آبیاری است که منبع تامین آن از چاه کشاورزی است. به دلیل آهکی بودن خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، آب چاه قلیایی است. وضعیت هدایت الکتریکی آب مطلوب است. این آب از نیترات نسبتا قابل توجه برخوردار است با توجه به آنالیز آب، گیاهانی که از این آب تغذیه میکنند نیاز به عناصر کلسیم و منیزیم ندارند. آب حاوی یون کلر بود که برای رفع آلودگی میکروبی به آب تزریق شده است. در این تحقیق، برای جلوگیری از اثرات مضر کلر برای گیاهان، آب آبیاری در بشکه ۲۰ لیتری درب باز به مدت دو ساعت نگهداری و سپس برای آبیاری از آن آب استفاده می‌شد.

بررسی عوامل شکل شناسی و رویشی گیاه

۱) بررسی تاثیرتیمارها بر طول، حجم و جرم خشک ریشه

جدول (۳) نتایج حاصل از تجزیه واریانس صفات مختلف ریشه را در تیمارهای سولفات مس در پایان فصل رشد گیاه نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که سطوح مختلف سولفات مس بر حجم و طول ریشه تاثیر معنی‌داری نشان نداد. همچنین با توجه به جدول (۴) سطوح سولفات مس بر میزان جرم خشک ریشه تاثیر معنی‌داری داشت. علاوه بر این مقایسه میانگین صفات معنی‌دار هر یک از تیمارها بر اساس آزمون دانکن و مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار آبیاری با سولفات مس بر صفات مختلف ریشه مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه به تفکیک ارایه شده است.

جدول ۳. تجزیه واریانس صفات مختلف ریشه تحت تاثیر تیمار سولفات مس

منابع تغییر	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات		
		حجم ریشه	طول ریشه	جرم خشک ریشه
سولفات مس	۳	۳۶/۳^{ns}	۳۰/۶۲^{ns}	۱/۱۲$^{\times}$
خطا	۲۴	۵۰/۰۱	۳۵/۲۵	۰/۲۷۹
CV (٪)	-	۱۵/۴۷	۱۴/۰۱	۱۹/۱۴

** معنی دار در سطح احتمال یک درصد، $^{\times}$ معنی دار در سطح احتمال پنج درصد، ^{ns} غیر معنی دار

جدول ۴. تجزیه واریانس صفات مختلف ساقه و برگ تحت تاثیر تیمار سولفات مس

منابع تغییر	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات					
		وزن خشک برگ	وزن خشک ساقه	وزن خشک کل	نسبت وزن خشک برگ/ریشه	وزن تر برگ	وزن تر ساقه
مس	۳	۰/۹۰۱^{ns}	۱/۴۲۹$^{\times}$	۰/۴۵۹^{ns}	۱/۴۸۱$^{\times\times}$	۱۱۸/۷$^{\times}$	۲۱/۱۹^{ns}
خطا	۲۴	۰/۴۵	۰/۴۵۶	۱/۱۴۱	۰/۲۳	۴۹/۰۴	۲۰/۵۲
CV (٪)	-	۱۷/۸۹	۱۳/۸	۱۲/۳۶	۱۴/۶۷	۲۶/۸۲	۱۵/۰۶

** معنی دار در سطح احتمال یک درصد، $^{\times}$ معنی دار در سطح احتمال پنج درصد، ^{ns} غیر معنی دار

۲) بررسی تاثیر تیمارها بر صفات ساقه و برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس صفات مختلف ساقه و برگ در تیمارهای سولفات مس در پایان فصل رشد رویشی گیاه فلفل دلمه‌ای در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج حاصل از جدول ۴ نشان داد که اثر سطوح سولفات مس بر وزن تر برگ، وزن خشک ساقه و نسبت وزن خشک برگ/ ریشه به ترتیب در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد معنی‌دار بود.

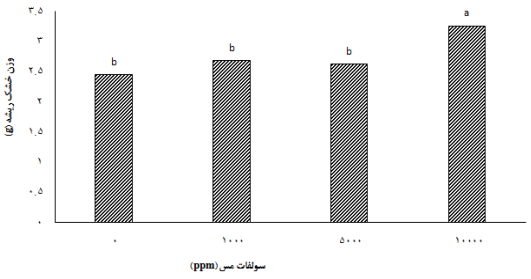
همانطوری‌که از شکل (۱) قابل مشاهده است، بیشترین وزن خشک ریشه (۳/۲۷ گرم) در سطح احتمال ۵ درصد مربوط به سطح ۱۰۰۰۰ppm سولفات مس بدست آمده است. سطوح ۱۰۰۰ ppm و ۵۰۰۰ ppm سولفات مس، بدون تفاوت معنی‌دار نسبت به شاهد موجب افزایش وزن خشک ریشه شد. بنابراین تیمار ۱۰۰۰۰ppm سولفات مس شاخص مذکور را (حدود ۳۳ درصد) نسبت به سایر غلظت‌ها و شاهد افزایش داده است. براساس گزارشات علمی، در غلظت‌های بالای مس، کاهش تقسیم سلولی موجب کاهش رشد طولی ریشه و حتی مهار رشد طولی ریشه‌های اولیه می‌شود اما تراکم ریشه‌های جانبی افزایش می‌یابد (Raldugina et al., 2016). بنابراین افزایش وزن خشک ریشه در غلظت‌های بالای سولفات مس را می‌توان ناشی از افزایش ریشه‌های جانبی گیاه قلمداد کرد. از سوی دیگر مشاهدات میدانی این تحقیق نشان داد که شکل مورفولوژیکی ریشه‌های اصلی در تماس با دیواره کپسول رسی متخلخل حاوی غلظت‌های بالای مس از حالت عادی خارج و قطر آنها به مراتب کلفت‌تر شده بود به طوری که قدرت نفوذ و چسبندگی آنها در این حالت به مراتب کمتر از حالتی بود که ریشه نازک است. مقایسه تراکم و قطر طولی ریشه فلفل دلمه در شکل ۵ (شاهد) با شکل ۸ (تیمار ۱۰۰۰۰ پی پی ام) موید این مطلب است.

شکل (۲) اثر سطوح مختلف سولفات مس بر وزن تر برگ در گیاه فلفل دلمه‌ای را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار بیشترین (۲۹/۶۱) و کمترین (۲۲/۷۳) مقدار این شاخص به ترتیب مربوط به بالاترین و پایین‌ترین غلظت سولفات مس است. با این وجود، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح ۵ درصد بین هیچ یک از تیمارها مشاهده نشد. با افزایش سطح سولفات مس در دیواره کپسول رسی متخلخل کاهش وزن تر برگ نسبت به تیمار شاهد مشاهده شده بود اما این تفاوت با رابطه آماری معنی‌داری به همراه نبود. سطح سولفات مس ۱۰۰۰۰ppm میزان وزن تر برگ را نسبت به تیمار ۱۰۰۰ppm حدود ۲۳ درصد کاهش داده بود.

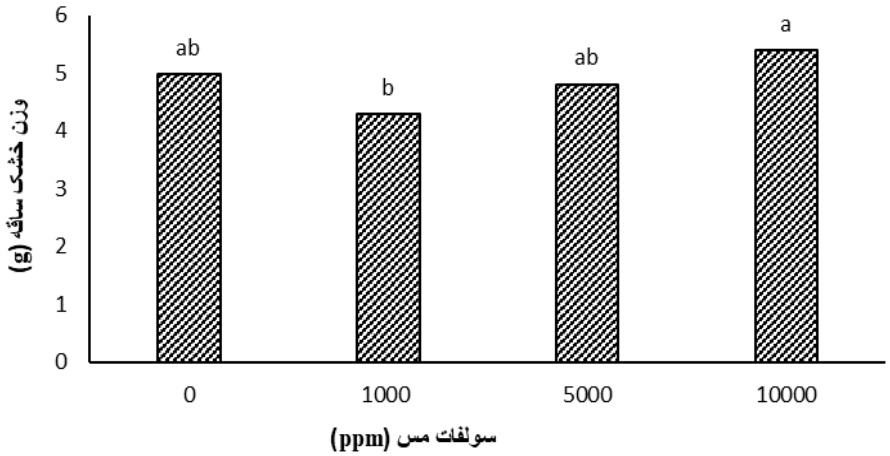
با توجه به شکل (۳) بیشترین (۵/۳۹۶ گرم) و کمترین (۴/۴۲۹ گرم) وزن خشک ساقه به ترتیب مربوط به سطوح سولفات مس۱۰۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰ppm بود. وزن خشک ساقه در سطوح مختلف سولفات مس (۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm) تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت، درحالی که سولفات مس در غلظت ۱۰۰۰۰ppm تفاوت معنی‌داری با وزن این شاخص در تیمار ۱۰۰۰ppm داشت و غلظت ۱۰۰۰۰ppm میزان وزن خشک ساقه را حدود ۲۲ درصد نسبت به تیمار ۱۰۰۰ppm کاهش داد.

با توجه به شکل (۴)، کاربرد غلظت‌های ۱۰۰۰ppm و ۱۰۰۰۰ppm سولفات مس، تفاوت معنی‌داری در وزن خشک برگ/ریشه نسبت به تیمار شاهد ایجاد کردند. غلظت سولفات مس ۵۰۰۰ppm تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت. به عبارتی افزایش چشم‌گیر غلظت سولفات مس در دیواره‌های نازل‌های سفالی میزان وزن خشک برگ/ریشه را کاهش داد و منجربه کاهش معنی‌دار شاخص مذکور (تا حدود ۲۶ درصد) نسبت به شاهد شد. پیش از این، کاهش وزن خشک بخش هوایی و ریشه تحت تنش بالای مس در سایر گونه‌های گیاهی گزارش شده است (El-Tayeb et al., 2006; Gorecka et al., 2007). غلظت زیاد مس در محلول غذایی موجب کاهش وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی ذرت (Chaffair et al., 2005)، آفتابگردان (El-Tayeb et al., 2006)، برنج (Xu et al., 2006)، بامبو (Chen et al., 2015) و همچنین کاهش رشد ریشه و ساقه در گیاه علفی (Chloris gayana) شده است (Sheldon and Menzies, 2004).

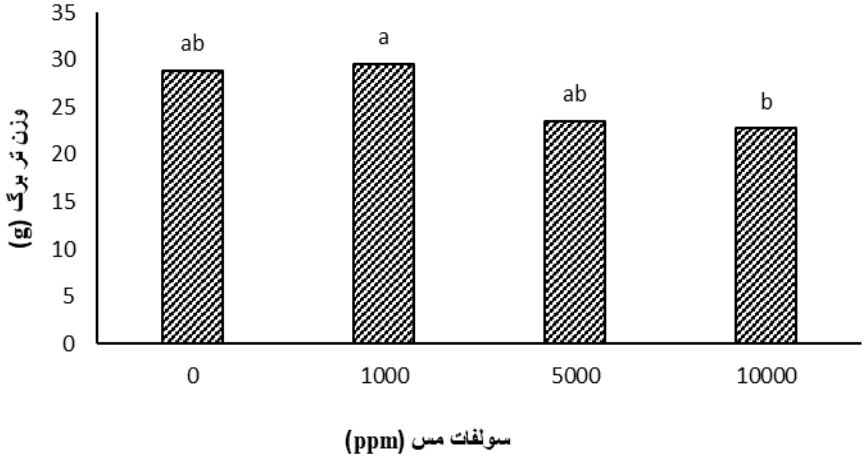
مهار رشد گیاهان در حضور مس به اختلال در وضعیت آب سلول، میتوز، چرخه سلولی، سخت شدن دیواره سلولی به علت تشکیل اتصالات عرضی پلیمرهای دیواره در اثر فعالیت پراکسیدازهای وابسته به H_2O_2 (El-Tayeb et al., 2006) به هم خوردگی تعادل هورمونی (Gorecka et al., 2007)، کاهش محتوای پتاسیم و نرخ فتوسنتز (Guo et al., 2006) و انباشتگی اسیدهای فنولی آزاد (Gorecka et al., 2007) نسبت داده شده است.



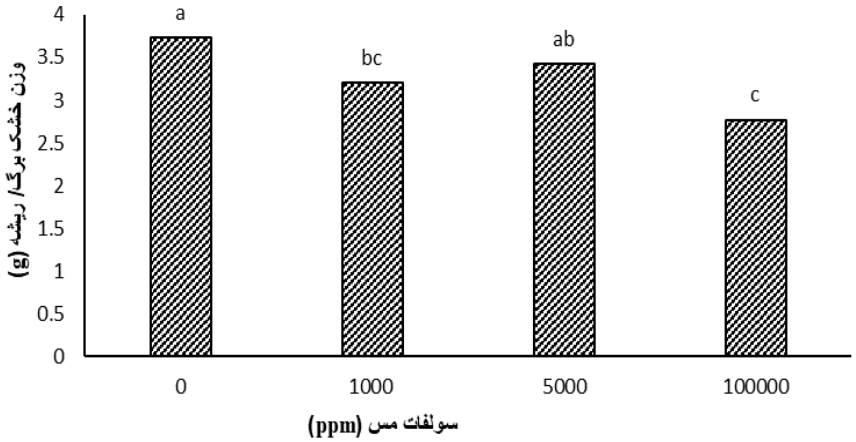
شکل ۱. تاثیر غلظت‌های مختلف سولفات مس بر وزن خشک ریشه در گیاه. حروف مشترک بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن می‌باشد ($p\leq0.05$)



شکل ۳. تاثیر غلظت‌های مختلف سولفات مس بر وزن خشک ساقه در گیاه. حروف مشترک بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن می‌باشد ($p\leq0.05$)



شکل۲. تاثیر غلظت‌های مختلف سولفات مس بر وزن تر برگ در گیاه. حروف مشترک بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن می‌باشد ($p\leq0.05$)



شکل ۴. تاثیر غلظت‌های مختلف سولفات مس بر وزن خشک برگ/ ریشه در گیاه. حروف مشترک بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن می‌باشد ($p\leq0.05$).

۳) *سیستم ریشه در تیمارهای مختلف*

نمای تراکم و تجمع ریشه به دور کپسولهای رسی متخلخل در تیمارهای مختلف در پایان مرحله رشد رویشی فلفل دلمه ای در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. تصاویر گرفته شده از سیستم ریشه به منظور بیان وضعیت سیستم ریشه در تیمارهای مختلف نشان داد که بیشترین سیستم ریشه به دور کپسول‌ها مربوط به تیمار شاهد و کمترین هجوم ریشه در تیمار ppm ۱۰۰۰۰ قابل مشاهده بود. در تیمار شاهد دیواره کپسول رسی متخلخل به شدت مورد هجوم ریشه گیاه فلفل دلمه‌ای قرار گرفته بود و ریشه‌ها بطور کامل دور کپسول‌های رسی متخلخل را احاطه کرده بودند. در تیمار ppm ۱۰۰۰ نیز هجوم ریشه‌ها به سطح نازل‌های سفالی قابل رویت بود. اما در تیمارهای ppm ۵۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ سولفات مس میزان هجوم ریشه به سطح کپسول‌های رسی بسیار محدود شده بود. در برش عرضی گلدان‌ها عدم هجوم ریشه به دیواره کپسول رسی متخلخل مس اندود شده به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ سولفات مس بصورت ملموسی قابل رویت و مشاهده بود. لازم به ذکر است این مطالعه اولین بار در دنیا برای ریشه گریز کردن نازلهای سرامیکی با سولفات مس انجام شده است و نویسندگان ادعایی بر کامل بودن روش مشاهدات میدانی برای نتیجه گیری ندارند اما یکی از روش های بررسی موضوع مورد نظر در فاز اول مطالعاتی مشاهدات میدانی است که در این پژوهش از این روش استفاده به عمل آمده است. سعی شده است در حین کار گلدانها با دقت برش داده شوند و شستشوی خاک و عدم پارگی ریشه با دقت بالایی انجام شود. به طوری که حجم، طول و قطر ریشه ها با دقت بالایی اندازه گیری شده است. بررسی میدانی ریشه‌ها نشان داد که سطوح بالای سولفات مس بر مهار ریشه‌ی گیاه فلفل دلمه‌ای موثر بوده است. در غلظت‌های بالای مس، ساختار ریشه‌ها تغییر می‌کند، رشد ریشه‌های اولیه مهار می‌شود و تراکم توزیع ریشه‌های جانبی افزایش می‌یابد (Raldugina et al., 2016). در تحقیقی (Thounaojam et al., 2011) برای بررسی اثرات مس، گیاه برنج با غلظت‌های مختلف مس (۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) به مدت ۵ روز در شرایط هیدروپونیک تیمار شد. نتایج حاکی از مهار ریشه در غلظت ۱۰۰ میکرومولار مس بود. بررسی آزمایشگاهی با دستگاه اسیلوسکوپ نشان داد که نوک مریستم ریشه‌های مجاور با کپسولهای رسی متخلخل مس اندود شده تیره و غیرفعال شده بودند.

شکل ۵. نمایش تجمع ریشه به دیواره کپسول رسی متخلخل در تیمار شاهد در پایان دوره رشد رویشی گیاه فلفل دلمه‌ای.

شکل ۷. نمایش تجمع ریشه به دیواره کپسول رسی متخلخل در تیمار ppm ۵۰۰۰ سولفات مس در پایان دوره رشد رویشی گیاه فلفل دلمه‌ای.

شکل ۸. نمایش تجمع ریشه به دیواره کپسول رسی متخلخل در تیمار ppm ۱۰۰۰۰ سولفات مس در پایان دوره رشد رویشی گیاه فلفل دلمه‌ای

شکل ۶. . نمایش تجمع ریشه به دیواره کپسول رسی متخلخل در تیمار ppm ۱۰۰۰ سولفات مس در پایان دوره رشد رویشی گیاه فلفل دلمه‌ای.

جدول ۵. آنالیز آبدهی کپسول رسی متخلخل در غلظت‌های مختلف سولفات مس با استفاده از آزمون T-test

منابع تغییر	F	Sig.	t	درجه آزادی (df)	Sig. (2-tailed)	انحراف معیار	خطای استاندارد	پایین‌ترین	بالاترین
دبی	۰/۶۷۱	۰/۴۱۸	۳/۰۰۷*	۳۴	۰/۰۰۵	۰/۰۳۲	۰/۰۱۱	۰/۰۱	۰/۰۵۴

بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف سولفات مس بر آبدهی کپسول رسی متخلخل

نتایج حاصل از بررسی اثر غلظت‌های سولفات مس بر دبی نازل‌های سفالی در جدول ۵ نشان داد که، غلظت‌های سولفات مس اثر معنی‌داری بر دبی خروجی نازل‌های سفالی داشته است.

عوامل زیادی همچون نوع رس، ضخامت دیواره قطعات، درصد رس و شن، درجه حرارت پخت، میزان آهک و زمان پخت در قطر خلل و فرج و تراوایی گسیلنده‌های سرامیکی موثر هستند (Ghorbani et al., 2016; Cai et al., 2021). در پژوهش حاضر با ثابت بودن عوامل موثر بر تراوایی کپسول‌های رسی میزان اثر غلظت‌های مختلف سولفات مس بر دبی خروجی نازل‌ها اندازه‌گیری شد. جدول (۶) مقایسه میانگین دبی خروجی کپسول رسی متخلخل را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سولفات مس میزان شاخص مورد نظر کاهش یافته است. همچنین اختلاف منفی و معنی‌داری بین غلظت‌های ppm ۱۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ سولفات مس نسبت به تیمار شاهد در دبی خروجی اندازه‌گیری شده وجود داشت. بیشترین میزان دبی خروجی در تیمار شاهد (ppm ۰) و کمترین دبی خروجی مربوط به غلظت ppm ۱۰۰۰۰ بود. به عبارتی دیگر افزایش غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ سولفات مس میزان آبدهی نازل‌ها را به ترتیب ۲۳، ۴۵و ۵۳ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داده است. به عبارت دیگر با افزایش غلظت اکسید مس بر روی دیواره‌ی نازل‌های سفالی میزان توان آبدهی نازل‌ها به علت مسدود شدن منافذ کاهش یافته بود.

جدول ۶. مقایسه میانگین آبدهی کپسول رسی متخلخل در غلظت‌های مختلف سولفات مس

سولفات مس (ppm)	میانگین (میلی لیتر)
۰ (شاهد)	۰/۰۸a
۱۰۰۰	۰/۰۴۴b
۵۰۰۰	۰/۰۶۲ab
۱۰۰۰۰	۰/۰۳۸b

حروف مشابه دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر برای جلوگیری از تماس مستقیم ریشه گیاه با دیواره کپسول‌های رسی متخلخل مس اندود شده در سامانه آبیاری زیرسطحی به مرحله اجرا درآمد. چسبیدن ریشه به گسیلنده مانع از رهاسازی آب و موجب کاهش توان آبدهی نازل سرامیکی خواهد شد. شایان ذکر است این مطالعه اولین بار در دنیا برای ریشه گریز کردن نازلهای سرامیکی با سولفات مس انجام شده است. برای ریشه گریز شدن کپسول رسی متخلخل، دیواره آن آغشته به نوعی ماده اکسیداتیو از جنس مس به نام اکسید مس شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت اکسید مس در دیواره سرامیکی کپسول رسی متخلخل، توانسته بود از چسبانندگی ریشه به دیواره بکاهد. در برش عرضی گلدان‌ها عدم هجوم و تراکم ریشه روی سطح کپسول رسی متخلخل بصورت ملموسی قابل رویت و مشاهده بود. بررسی تراکم ریشه اطراف کپسول‌های رسی متخلخل نشان داد بیشترین توسعه سیستم ریشه به دور گسیلنده‌ها مربوط به تیمار شاهد و کمترین تراکم و تجمع ریشه به دور گسیلنده در تیمار ppm ۱۰۰۰۰ بود. در تیمار شاهد قطعات گسیلنده به طور کامل توسط ریشه گیاه احاطه شده بودند این احاطه به شکلی بود که ریشه کاملا به دیواره گسیلنده چسبیده بود. همچنین بررسی میزان اثر غلظت‌های مختلف سولفات مس بر دبی خروجی کپسول‌های رسی متخلخل نشان داد که با افزایش غلظت سولفات مس میزان دبی خروجی کپسول‌های رسی متخلخل کاهش یافته بود. همچنین اختلاف معنی‌داری در آبدهی کپسولهای رسی متخلخل بین غلظت‌های ppm ۱۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰۰ سولفات مس نسبت به تیمار شاهد وجود داشت به گونه‌ای که در غلظت ppm ۱۰۰۰۰ سولفات مس، میزان دبی خروجی کپسول‌های رسی حدود ۵۳ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. شایان ذکر است بررسی دقیق تر این که چه میزان آبدهی گسیلنده‌ها کم شده است و ضریب تغییرات چقدر بوده است به یک کار مطالعاتی با جامعه آماری بسیار وسیع تری نیاز دارد و پیشنهاد می‌شود این موضوع در تحقیقات مورد توجه قرار گیرد. همچنین توصیه می‌شود عملکرد سیستم ریشه گریز بودن گسیلنده ها و نحوهٔ آبدهی نازل‌های سرامیکی زیرسطحی در یک بازه زمانی چند ساله مورد ارزیابی قرار گیرد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از کمک‌های بی وقفه، حمایت‌ها و زحمات استادان بزرگوار و کارشناس محترم گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تربیت مدرس تشکر و قدردانی می‌گردد.

Reference:

Ashrafi, S., Gupta A., Singh, M.B., Izumi N., and Loof, N. (2002). Simulation of infiltration from porous clay pipe in subsurface irrigation. Hydrological Sciences Journal, 47(2): 253-268.

Bainbridge, D. A. (2001). Buried clay pot irrigation a little known but a very efficient traditional method of irrigation. Agriculture Water Management, 48: 79-88.

Bastani, S. 2018. A Historical Review of Innovations and Developments of Subsurface Irrigation Systems. Journal of Water and Sustainable Development, 4(2), 69-80. [In Persian]

Bhatt, N., Kanzariya, B., Motiani, A. and Pandit, B. (2013). An experimental investigation on pitcher irrigation technique on alkaline soil with saline irrigation water. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) 2 (6): 206–212.

Bhattacharya, P., Mukherjee, D., Dey,S., Ghosh,S., Banerjee,S. (2019). Development and Performance evaluation of a novel Cuo/TiO2 ceramic ultrafiltration membrane for ciprofloxacin removal. materials chemistry and physics 229:106-116.

Cai, Y., Yao, C., Wu, P., Zhang, L., Zhu, D., Chen, J., Du, Y. (2021). Effectiveness of a subsurface irrigation system with ceramic emitters under low-pressure conditions. Agric. Water Manag. 243: 1-9.

Chaffai, R., Tekitek, A., and El-Ferjani, E. (2005). Comparative effects of Copperand Cadmium on growth and lipd content in maize seedlings (*Zea mays* L.). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 8: 649-655.

Chen, J., Peng, D., Shafi, M., Li, S., Wu, J., Ye, Z., Yan, W., Lu, K., Liu, D. (2015). Effect of Copper Toxicity on Root Morphology, Ultrastructure and Copper Accumulation in Moso Bamboo (Phyllostachys pubescens). Journal of Zeitschrift für Naturforschung C, 52: 231–239.

Habibvash F, Daneshgar M, Sadeghi A. (2017). Investigating the effects of copper sulfate on the germination characteristics and anatomical structures of Melilotus officinalis L.. Journal of Rangeland, 11(3): 389-404. [in Persian]

Elleuch, A., Chaâbene, Z., Grubb, D., Drira, N., Mejdoub, H., Khemakhem, B. (2013). Morphological and biochemical behavior of fenugreek (Trigonella foenum-graecum) under copper stress. Ecotoxicol Environ Saf., 98:46-53. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.09.028.

El-Tayeb, M.A., El-Enany, A.E., and Ahmed, N.L. (2006). Salicylic acidinducedadaptive response to Copper stress in Sunflower (Helianthus annuusL.). Plant Growth Regulation, 50: 191-199.

Guo, Y., Sun, X. Z., Song, X. L., Wang, Q. C., Li, Y. J. and Chen, S. Y. (2006). Effects of Potassium nutrition on growth and leaf physiologicalcharacteristics at seedling stage of cotton. Plant Nutrition and FertilizerScience, 12:363-368.

Gholami Sefid Kohi, M.A., Barzegar Akhte-khane, A. (2014). Impact of irrigation management and emitters type on clogging in Sari district. *Journal of Water Research in Agriculture*, *28*(2), 385-394. [in Persian]

Ghorbani Vaghei, H., Bahrami, H.A., Nasiri Saleh, F. (2016). Dimensional analysis of soil wetting pattern from porous clay capsules, Iran Water Res. J., 10(1): 77-85. [in Persian]

Ghorbani Vaghei, H., Bahrami, H.A., Mazhari, R., & Heshmatpour, A. (2015). The effect of subsurface irrigation with porous clay capsules on quantitative and qualitative characteristics of grape plant. Soil and Water 29(1): 58-66. [in Persian]

Ghorbani Vaghei, H., & Bahrami, H.A. (2021). Application of porous clay capsule technique in optimizing water consumption of citrus orchard. *Water and Soil Management and Modelling*, *1*(3), 15-24. [in Persian]

Ghorbani vaghei, H., Bahrami, H.A., Nasiri saleh, F. (2023). Optimizing soil moisture in subsurface irrigation system Based on porous clay capsule thechnique water Resour. Manage, 37: 3037-3051.

Gorecka, K., Cvikrova, M., Kowalska, U., Eder, J., Ska, K., Gorecki, R. andJanas, K. M. (2007). The impact of Cu treatment on phenolic and polyamine levels in plant material regenerated from embryos obtained in anther cultureof carrot. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45: 54-61.

Halliwell, B., Gutteridge, J.M. (1984). Lipid peroxidation, oxygen radicals, cell damage, and antioxidant therapy.Lancet 1, 1396–1397.

Liu, Q., Zheng, L., He, F., Zhao, F.J., Shen, Z., Zheng, L. (2015). Transcriptional and physiological analyses identify a regulatory role for hydrogen peroxide in the lignin biosynthesis of copper-stressed rice roots. Plant and Soil, 387(1-2) 323–336.

Marques D.M., Júnior V.V., Silva A.B., Mantovani J.R., Magalhães P.C. Souza T.C. (2018). Copper Toxicity on Photosynthetic Responses and Root Morphology of Hymenaea courbaril L. (Caesalpinioideae). Water Air Soil Pollut. 229(5): 138.

Massoudinejad, M. R., Mazaheri Tehrani, A., Ghanbari, F, Mirshafian, S. (2014). Evaluation of the Efficiency of Electrolysis Process with Continuous Flow in the Disinfection of Water Contaminated with Fecal Coliform . J Arak Uni Med Sci, 17 (3):56-64 [in Persian]

Nafees, M., Ikram, M., Ali S. (2015). Thermal behavior and decomposition of copper sulfide nanomaterial synthesized by aqueous sol method. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures 10 (2): 635 – 641.

Raldugina, G.N., Krasavina, M.S., Lunkava, N.F., Burmistava, N.A. (2016). Resistance of Plants to Cu Stress: Transgenesis. Plant Metal Interaction, CHAPTER 4: 69-114.

Qiaosheng, S., Zouxin, L. Zhenying, W. & Hijung, L. 2007. Simulation of the soil wetting shape porous pipe sub-irrigation using dimensional analysis. Irrig. And Drain, 56: 389-398.

Saglam, A., Yeti¸ F., Demiralay, M., Terzi, R. (2016). Copper effects at seed germination of Secale cereale L. Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology, 19(4): 84- 88.

ShamsAli, L., Biabani, B., Ghorbani Vaghei, H., & Taliei, F. (2018). Investigating the effects of cultivation dates and irrigation systems on some agronomic properties of rice in Gonbad Kavous. Journal of Water and Irrigation Management 8(1):27-38. [In Persian]

Rashidi Joshaghan, M., Bahrami, H.A., Ghorbani Vaghei, H. (2018). Investigating the effect of subsurface irrigation system, rain and superabsorbent polymers on the quantitative and qualitative characteristics of grass plants. Journal of Water and Soil Resources Conservation,7(4): 71-85.[in Persian]

Shahid, M., Pourrut, B., Dumat, C., Nadeem, M., Aslam, M., Pinelli, E. (2014). Heavy-metal-induced reactiveoxygen species: phytotoxicity and physicochemical changes in plants. Rev. Environ. Contam.Toxicol. 232: 1–44.

Shakohi, R., Ebrahimzadeh, L., Rahmani, A., Samarkandi, M., Ebrahimi, J. (2007). Comparing the effectiveness of ultraviolet radiation and advanced oxidation methods with the use of ozone in the removal of phenol from wastewater treatment plant effluents. 11th National Environmental Health Conference, p.8.[in Persian]

Sheldon, A., and Menzies, N.W. (2004). The effect of Copper toxicity on thegrowth and morphology of Rhodes grass (Chloris gayana) in solution culture. Journal of American Science, Vol. 8, pp. 1-8.

Siyal A. A. and Skaggs T. H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. Agricultural Water Management, doi:10.1016/j.agwat.11.013.

Siyal A. A., Van-Genuchten M. T. and Skaggs T. H. (2009).Performance of pitcher irrigation system. Soil Science 174(6): 312-320.

Stephen, G., Wu, L. H., Head, J., Chen, D.R., Kong I.C., and Tang, Y.J. (2012). Phytotoxicity of Metal Oxide Nanoparticles is Related to Both Dissolved Metals Ions and Adsorption of Particles on Seed Surfaces, Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology 3:126.

Stokstad, E. 2016. Effects of chemicals on root intrusion into subsurface drip emitters. irrigation and drainage, 55(5) :501-509.

Tatian, M., Tamertash, R., Hashmati, S., Saidi Garaghani, H. (2012).Studying the reaction of mountain rye pasture species to the stress caused by lead and copper polluting elements.Journal of Natural Environment, Journal of Natural Resources of Iran, 66(4): 389-397.[in Persian]

Thounaojam, T.C., Panda, P., Mazumdar, P., Kumar, D., Sharma, G.D., Sahoo, L., Panda, S.K. (2012). Excess copper induced oxidative stress and response of antioxidants in rice, Plant Physiology and Biochemestry 53: 33-39.

Tie, S.G., Tang, Z.J., Zhao, Y.M., Li, W. (2012). Oxidative damage and antioxidant response caused by excess copper in leaves of maize. Afr. J. Biotechnol. 11: 4378–4384.

Verma, J.P., Singh, V., and Yadav, J. (2011).Effect of copper sulphate on seed germination, plant growth and peroxidase activity of Mung Bean (Vigna radiate). In. J. Bot., 7(2):200-204.

Viehweger, K. (2014). How plants cope with heavy metals? Bot. Stud. 55, 35–47.

Vahabi Mashhor, M., Mashal, M., Hashmi-Gramdareh, A., Vavipour, M., Ebrahimian, H. (2020). Investigation of water efficiency in subsurface irrigation of pots with different levels of water salinity (basil plant case study). Journal of Water and Soil Protection Research, 5: 247-233.[in Persian]

Xu, J., Yang, L., Wang, Z., Dong, G., Huang, J., and Wang,Y. (2006). Toxicityof Copper on rice growth and accumulation of Copper in rice grain in Coppercontaminated soil. Hemosphere, 62:. 602–607.

Ye, N., Li, H., Zhu, G., Liu, Y., Liu, R., Xu, W., Jing, Y., Peng, X., Zhang, J. (2014). Copper suppresses abscisic acid catabolism and catalase activity, and inhibits seed germination of rice. Plant Cell Physiol., 55: 1–9.