



ارزیابی تأثیر کاربرد پساب شهری بر انتشار دی‌اکسیدکربن خاک، غلظت فلزات سنگین و عملکرد فلفل سبز

حسین بهاری پنبه چوله^۱، محمد موسوی بایگی^۲، سعید شیوخ سوغانلو^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

چکیده

به منظور ارزیابی تأثیر پساب شهری بر میزان انتشار دی‌اکسیدکربن خاک، غلظت فلزات سنگین و عملکرد فلفل سبز شیرین، آزمایش بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. تیمار منبع آبیاری شامل پنج سطح؛ ۱۰۰٪ پساب (TWW100)، ترکیب ۷۵٪ پساب + ۲۵٪ آب چاه (TWW75 + WW25)، ترکیب ۵۰٪ پساب + ۵۰٪ آب چاه (TWW50 + WW50)، ترکیب ۲۵٪ پساب + ۷۵٪ آب چاه (TWW25 + WW75) و ۱۰۰٪ آب چاه (WW100)، بود. بر پایه یافته‌ها، تأثیر آبیاری با پساب در مراحل سوم و چهارم سنجش بر انتشار دی‌اکسیدکربن خاک معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). بالاترین میزان انتشار دی‌اکسیدکربن خاک در مرحله چهارم سنجش، مربوط به تیمار آبیاری TWW100 با مقدار ۴۸۴ و پایین‌ترین میزان آن مربوط به تیمارهای آبیاری TWW25-WW75 و WW100 به ترتیب با ۴۷۴/۵ و ۴۷۴/۴ پی‌پی‌ام در دقیقه مشاهده شد. همچنین تأثیر آبیاری با پساب شهری بر صفات مورفولوژیک و عملکرد میوه فلفل بسیار معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). به‌طوریکه بیشترین عملکرد مربوط به تیمار TWW100 با ۱۵۳۶ و کمترین آن مربوط به WW100 با ۱۳۸۴/۸ کیلوگرم در هکتار بود. بر اساس نتایج، بیشترین میزان غلظت سرب خاک و میوه فلفل در تیمارهای آبیاری TWW100 و TWW75+WW25 و کمترین میزان آن، مربوط به تیمار آبیاری WW100 بود. بیشترین میزان غلظت کادمیوم خاک و میوه در تیمارهای آبیاری TWW100، TWW75+WW25، TWW50+WW75 و TWW25+WW75 مشاهده شد. به‌طور کلی، با توجه به بحران کم‌آبی و اهمیت مدیریت منابع آب آبیاری، بهره‌گیری از پساب شهری به‌صورت ترکیب با آب چاه پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آب چاه، شاخص سطح برگ، کادمیوم، کم‌آبی، مورفولوژیک

مقدمه

گازهای گلخانه‌ای و به دنبال آن گرمایش جهانی، باعث بروز تغییرات شدید در آب و هوای کره زمین شده است. این گرمایش نامناسب، منجر به تغییر هرچند کوچک در تمامی الگوهای جوی و بوجود آمدن ناهنجاری‌های اقلیمی شدید شده است (Farmanifard et al., 2017). یکی از عوامل مهم و

با آغاز انقلاب صنعتی و رشد حیرت‌انگیز تحولات بشری، تغییرات متنوعی در زندگی بشر رخ داده است. افزایش سرعت رشد کارخانه‌ها و صنایع، جنگل‌زدایی و تخریب و نابودی محیط زیست، چالش تأمین امنیت غذایی، رشد روزافزون جمعیت، بروز خشکسالی‌ها (Shiukhy-Soqanloo et al.,)

^۳ استادیار هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(*نویسنده مسئول: saeid.shiukhy@gmail.com)

^۱ دانش آموخته هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب-دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
^۲ استاد هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

نحوه ارجاع مقاله:

بهاری پنبه چوله، ح.، موسوی بایگی، م.، شیوخ سوغانلو، س. ۱۴۰۴. ارزیابی تأثیر کاربرد پساب شهری بر انتشار دی‌اکسیدکربن خاک، غلظت فلزات سنگین و عملکرد فلفل سبز. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۳(۱): ۸۲-۹۵.
DOI: 10.22125/agmj.2024.456389.1168
Bahari Panbechooleh, H., Mousavi Baygi, M., Shiukhy Sughanlu, S. 2025. Evaluation of the impact of treated wastewater application on soil Co2 emission, HMs accumulation and green pepper yield. Journal of Agricultural Meteorology, 13(1): 82-95. DOI: 10.22125/agmj.2024.456389.1168

در کمر بند مناطق خشک کره زمین، با کمبود منابع آب تجدیدپذیر، خشکسالی‌های متوالی و از طرف دیگر گسترش شهرنشینی که خود پیامدهایی از جمله تولید پساب‌های خانگی و شهری در حجم وسیع را به دنبال دارد، مواجه می‌باشد (Shiukhy-Soqanloo et al., 2024). لذا لزوم توجه بیشتر به استفاده مطلوب از منابع آب نامتعارف که به وفور در دسترس می‌باشد، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Alizadegan et al., 2022b). از آب مورد استفاده در شهرها حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد آن تبدیل به پساب می‌شود. سنجش میزان آلودگی، رعایت نکات بهداشتی و زیست‌محیطی و استفاده بهینه از پساب، می‌تواند یکی از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین گام‌های مدیریت آب در بخش کشاورزی در راستای دستیابی به تولید پایدار باشد (Naimi et al., 2014). Tabatabaei et al (2020) تخلیه پساب به خاک را یکی از بهترین روش‌های دفع پساب دانستند و رعایت نکات و مسائل بهداشتی در جمع‌آوری، تصفیه و بازگرداندن فاضلاب به چرخه آب در طبیعت را امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر قلمداد نمودند. پساب شهری با تأمین نیاز آبی گیاهان و کاهش فشار بر منابع آب شیرین، افزایش مواد مغذی و آلی خاک، بهبود فعالیت‌های بیولوژیکی خاک و افزایش حاصلخیزی خاک می‌تواند شرایط مطلوبی را برای رشد و نمو گیاه در طول فصل رشد ایجاد نماید (Khawla et al., 2019). با این حال نباید از اثرات نامطلوب استفاده از پساب در بلند مدت بر خاک، گیاه و منابع آب زیرزمینی غافل شد. چرا که فلزاتی مانند روی، کادمیوم، سرب، آهن، مس و نیکل اگر به مقدار زیاد به خاک وارد شوند، ممکن است باعث سمیت خاک و گیاه شود. با توجه به منبع پساب تولیدی (صنعتی، شهری و غیره)، ممکن است سلامتی انسان با مصرف تولیدات کشاورزی به‌طور مستقیم و یا بواسطه تغذیه دام و طیور به‌طور غیر مستقیم تحت تأثیر قرار بگیرد (Gatta et al., 2018). Tripathi et al., (2020) بیان کردند که بهره‌گیری از پساب در بلندمدت در برنامه‌های مدیریت آبیاری، ظرفیت خاک برای نگهداری فلزات سنگین را کاهش داده و خاک این عناصر محلول در آب را در اختیار گیاه قرار می‌دهد. که این امر منجر به آلودگی اندام‌های گیاهی در اثر انباشت

اثرگذار در گرمایش جهانی و تغییر اقلیم، را می‌توان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن به حساب آورد (Vanaee et al., 2016). Chen et al., (2013) دی‌اکسید کربن را فراوان‌ترین گاز گلخانه‌ای در خاک دانستند و در مقایسه با سایر گازهای گلخانه‌ای اثرات آن را تا صد برابر بیشتر از نیتروژن و متان گزارش نمودند. در هر سال نیمی از دی‌اکسیدکربن موجود در جو بوسیله اقیانوس‌ها، گیاهان و خاک جذب می‌شود که می‌توان از آن‌ها به عنوان منابع ذخیره طبیعی کربن نام برد و نیمی دیگر در اتمسفر باعث افزایش میزان دی‌اکسیدکربن جوی می‌شوند (Busse et al., 2009). به‌منظور کاهش اثرات سو تغییر اقلیم روش‌های گوناگون وجود دارد که خاک عنصری کلیدی و مهم محسوب می‌شود و باید از جنبه زیست محیطی توجه ویژه‌ای به آن شود (Kaliappan et al., 2019). اکسیداتیو و فروکافت مواد آلی خاک توسط ریزجانداران موجود در خاک، منجر به رهاسازی گاز دی‌اکسید کربن خاک به اتمسفر، می‌شود. از طرفی، تنفس خاک در سنجش فعالیت‌های میکروبی خاک عامل بسیار مهم تلقی می‌گردد. بنابراین، فروکافت کربن آلی خاک به گازهای دی‌اکسید کربن و متان در پی کنش‌های زیستی قارچ‌ها و دیگر ریزجانداران موجود در خاک است و در گیاهان از راه تنفس ریشه انجام می‌شود (Shiukhy-Soqanloo et al., 2024). بوم‌سامانه‌های زمینی^۱ نقش بسیار مهمی در افزایش و کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای و اثرات آن بر طبیعت دارند. اثراتی که تمامی کشورها را با مشکل تأمین تقاضای آب شرب و آبیاری برای بخش کشاورزی مواجه کرده است (Domashenko and Vasilyev, 2018). در تمامی کشورها نیاز مبرم برای افزایش تولیدات کشاورزی، تبدیل به یکی از پردغدغه‌ترین نیازهای روز شده و فشار زیادی بر منابع آب و خاک وارد کرده است. افزایش سطح زیر کشت اراضی برای افزایش تولید، مناطق بسیاری از دنیا را با کمبود آب آبیاری مواجه کرده است (Alizadegan et al., 2022b). کشت و کار بیش از حد در زمین‌های زراعی، اراضی را تهی از مواد آلی و عناصر غذایی گردانده و بشر برای جبران این مسئله به استفاده از کودهای مختلف روی آورده است (Bahari Panbechooleh et al., 2024). کشور ایران به سبب قرارگیری

¹ Terrestrial ecosystems

تا پایین‌ترین حد ممکن کاهش داد. از آنجا که تا کنون تمرکز بیشتر مطالعات بر پاسخ گیاهان زراعی بوده است و کمتر به گیاهان باغی پرداخته شده، که عمدتاً مصرف تازه‌خوری داشته و مستقیماً سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهند، هدف از این پژوهش ارزیابی تأثیر پساب شهری بر شار دی‌اکسیدکربن خاک، انباشت فلزات سنگین و عملکرد فلفل سبز بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در شهرستان ساری و در مزرعه آزمایشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با طول و عرض جغرافیایی به‌ترتیب با (53° 00' E) و (36° 33' N)، ارتفاع از سطح دریا (۱۴ متر)، میانگین دمای سالانه (۱۷/۹) درجه سلسیوس) و میانگین بارندگی سالانه (۶۵۰ میلی‌متر) واقع شده است (Alizadegan et al., 2022b). شرایط آب و هوایی محل آزمایش براساس طبقه‌بندی اقلیمی گسترش یافته دومارتن، معتدل مرطوب می‌باشد. ویژگی‌های منبع پساب شهری (پساب تصفیه‌شده از تصفیه خانه عالیواک واقع در شهرستان ساری) و آب چاه و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در جدول ۱ و سایر اطلاعات مربوط به شرایط آب و هوایی منطقه در طول فصل رشد و نمو گیاه فلفل سبز در جدول ۲ ارائه گردید.

فلزات سنگین شده و بدین ترتیب وارد زنجیره غذایی می‌شوند. نتایج برخی مطالعات در ارتباط با اثر مثبت آبیاری با پساب مبنی بر افزایش بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین افزایش ویژگی‌های کمی و کیفی گیاهان وجود دارد که می‌توان به نتایج؛ Shiukhy-Soqanloo et al., (2024) در سویا؛ Shiukhy-Soqanloo et al., (2023) در ریحان، Nazario et al., (2022a) در ذرت، Alizadegan et al., (2022a) در نیشکر اشاره کرد. اما نتایج برخی از مطالعات از جمله (Mahfooz et al., 2020; Chaganti et al., 2020; Chen et al., 2013) نیز مؤید اثرات نامطلوب استفاده بی‌رویه و مکرر از پساب بر انباشت فلزات سنگین در خاک و گیاه می‌باشد. افزایش دمای هوا ناشی از انتشار گاز دی‌اکسیدکربن و تغییر در الگو و توزیع بارندگی در طول دوره رشد و نمو گیاهان و مواجهه گیاهان با تنش کم‌آبی، از بارزترین پیامدهای نامطلوب وقوع پدیده تغییر اقلیم می‌باشند. بنابراین با توجه به کمبود منابع آب و چالش کم‌آبی، لزوم استفاده از پساب در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری‌های مدیریت آبیاری برای تأمین نیاز آبی گیاهان بویژه گیاهان باغی، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بایسته است که در هنگام بهره‌گیری از پساب، ریسک وقوع مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی در خاک و گیاه را

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، منبع آبیاری و حداکثر حد مجاز استفاده از پساب برای مصارف کشاورزی

Table 1- Physico-chemical characteristics of soil, source of irrigation and maximum permissible limits for wastewater application in agriculture

Characteristics	pH	NTU	TDS ds.m ⁻¹	TSS	EC	TP	COD	N	Ca	Na	Mg
						mg.l ⁻¹					
UWW	8.1	2.9	663	27	1.06	4.9	17	0.5	100	58	18.1
WW	7.2	9.9	629.3	16	0.78	2.2	11.1	0.5	60	69	16.1
IRNDOE	6-8.5	50	-	100	-	6	200	-	-	-	100
WHO, 1992	6-8.5	-	450	-	0.7	4	-	-	-	-	-
FAO, 2006	6-8.5	-	450	-	0.7	4	-	-	-	-	-
Soil	Depth	Texture	pH	EC (ds.m ⁻¹)		OM (%)	OC (%)	P (ppm)	K (ppm)	N (%)	
	0-30cm	Sand-loam	7.1	0.55		1.72	0.52	4	146	0.1	

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های شرایط آب و هوایی محل اجرای آزمایش (سازمان هواشناسی ایران)

Table 2- Climatic conditions of the test site (IRIMO)

Growth season	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{average} (°C)	P (mm)	E (mm)
July	28.7	37.8	32.7	14.8	178.2
August	22.8	35.1	28.6	2.9	205.8
September	19.3	30.1	23.9	26.1	135.8
October	14.4	26.1	19.5	145	67
Average	21.7	32.5	26.4	49.7	149.3

T_{min}: Minimum temperature, T_{max}: Maximum temperature, T_{average}: Average of temperature, P: Precipitation, E: Evaporation

میوه فلفل در ۴ مرحله با فاصله تقریباً دو هفته‌ای (۴۰، ۵۵، ۷۰ و ۸۵ روز پس از کاشت) با استفاده از ترازو توزین شد.

سنجش ویژگی‌های فتوشیمیایی

برای تعیین میزان کلروفیل و کارتنوئید گیاه ریحان نخست ۵/۰ گرم از برگ جوان بالایی برداشت و هر نمونه با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد درآمیخته شد، پس از آن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی قرار داده شدند. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه با دور ۵۰۰۰ در دقیقه سانتریفیوژ شدند و با دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب در طول موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر ثبت شد (Raeini-Sarjaz and Shiukhy-Soqanloo, 2014). با استفاده از روابط زیر میزان کلروفیل a، b، a*b و میزان کارتنوئید بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تازه نمونه محاسبه شد.

$$\text{Chl a (mg/g.f.w)} = 12.7(A663) - 2.69(A645) \times v/1000 \times w \quad (1)$$

$$\text{Chl b (mg/g.f.w)} = 12.9(A645) - 2.69(A663) \times v/1000 \times w \quad (2)$$

$$\text{Chl a*b (mg/g.f.w)} = 20.2(A645) - 8.02(A663) \times v/1000 \times w \quad (3)$$

$$\text{Cart (mg/g.f.w)} = 7.6(A480) - 1.49(A510) \times v/1000 \times w \quad (4)$$

اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در خاک

مقدار ۱۰ گرم خاک را توزین کرده و در ارلن مایر ۱۲۵ ریخته، سپس ۲۰ میلی‌لیتر از محلول DTPA به آن اضافه کرده و به مدت ۲ ساعت با شیکر دورانی (مدل GFL) با دور ۱۴۵ دور در دقیقه در تکان داده شد. سپس با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف گردید. در این عصاره مقدار جذب کادمیوم و نیکل با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Varian بدست آمد. برای اندازه‌گیری غلظت سرب و کروم از روش عصاره‌گیری با EDTA+AAAC استفاده شد، نسبت خاک به عصاره ۱:۱ و به مدت ۱ ساعت با شیکر دورانی (۱۴۵ دور در دقیقه) سوسپانسیون مخلوط گردید. بعد از صاف کردن نمونه، غلظت عناصر سرب و کروم با دستگاه جذب اتمی مدل Varian مورد سنجش قرار گرفت (Lindsay and Norvell, 1978).

آزمایش بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با فاکتور منبع آبیاری در پنج سطح شامل؛ (۱۰۰٪ پساب (TWW1100)، ترکیب ۷۵٪ پساب + ۲۵٪ آب چاه (TWW75 + WW25)، ترکیب ۵۰٪ پساب + ۵۰٪ آب چاه (TWW50 + WW50)، ترکیب ۲۵٪ پساب + ۷۵٪ آب چاه (TWW25 + WW75) و ۱۰۰٪ آب چاه (WW²100)، با ۳ تکرار در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در مزرعه آزمایشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. نشاء فلفل سبز رقم همدانی، در تاریخ ۱ تیر، در کرت‌های آزمایشی به ابعاد ۳ × ۲ متر (طول و عرض) و در ردیف‌هایی با فاصله ۶۰ سانتی‌متر که در هر ردیف نشاءها به فاصله ۳۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داشتند، کشت شد. فاصله کرت‌ها در داخل هر بلوک ۱۰۰ سانتی‌متر و فاصله بلوک‌ها از یکدیگر ۲ متر در نظر گرفته شد. بلافاصله پس از پایان عملیات کاشت، آبیاری انجام شد. رطوبت خاک با استفاده از تانسیموتر پایش و زمانی که میزان آن به ۷۰ درصد می‌رسید (SWC=70)، آبیاری صورت می‌گرفت. آبیاری بصورت دستی (آبیاری سطحی) انجام شد. برای جلوگیری از بارندگی و ایجاد اختلال احتمالی در ترکیب تیمارهای آبیاری از سرپناه بارش^۳ که بر روی کرت‌های آزمایشی نصب شده بود، استفاده شد.

سنجش ویژگی‌های رویشی و مورفولوژیک

پیش از زمان برداشت میوه، ۶ بوته از خطوط میانی در هر کرت با حذف اثر حاشیه‌ای انتخاب شد و ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه اندازه‌گیری شد. ارتفاع گیاه با استفاده از خط‌کش مدرج از سطح خاک تا بالاترین قسمت ساقه اصلی بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. شاخص سطح برگ با استفاده از نرم افزار Image J و برای یک سطح معین، حاصل از یک کوادرات (۳۰×۶۰) محاسبه شد. وزن تر اندام هوایی، به وسیله ترازو مدل AND MA1000 با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. در ادامه، نمونه‌ها درون آون با دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند و وزن خشک اندام هوایی توزین شد (Shiukhy-Soqanloo et al., 2021). عملکرد

³ Rain shelter

¹ Treated wastewater

² Well water

اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در گیاه

اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در گیاه نیز با استفاده از روش جذب اتمی شعله‌ای A.A.S انجام شد. اندازه‌گیری در عصاره حاصل به روش هضم به طریق سوزاندن خشک و استفاده از اسید کلریدریک و اسید نیتریک انجام گرفت. نمونه‌های استاندارد، شاهد و عصاره را با شعله آبی استیلن- هوا ابری نموده و میزان جذب سرب، کادمیوم، نیکل و کرم به ترتیب در طول موج‌های ۲۱۷، ۲۲۸/۸، ۲۳۲ و ۳۵۷/۹ نانومتر اندازه‌گیری شد و در نهایت غلظت عناصر در نمونه با استفاده از سیستم خوانش غلظت دستگاه بدست آمد (Elmer, 1982). مقدار عناصر در نمونه خشک گیاهی بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم بر اساس معادله ۵ محاسبه می‌شود.

$$Pb = \frac{100 * V * (a-b)}{DM * W} \quad (5)$$

که در آن؛ a غلظت عنصر در نمونه، b غلظت عنصر در شاهد، V حجم عصاره حاصل از هضم بر حسب میلی‌لیتر، W

وزن نمونه گیاه بر حسب گرم و DM درصد ماده خشک گیاه می‌باشد. در پایان داده‌های بدست آمده با بهره‌گیری از نرم‌افزار SASver9.2 تجزیه و تحلیل شدند و آزمون مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

انتشار دی‌اکسید کربن خاک

نتایج تجزیه واریانس تأثیر آبیاری با پساب بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن خاک در جدول ۳ ارائه گردید. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مراحل اول (۳۰ تیر) و دوم (۱۵ مرداد) سنجش میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن خاک، معنی‌دار نبود و تغییرات تقریباً یکسان مشاهده شد. در حالی که سنجش میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن خاک در مراحل سوم (۳۰ مرداد) و چهارم (۱۵ شهریور)، بسیار معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر آبیاری با پساب بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن خاک

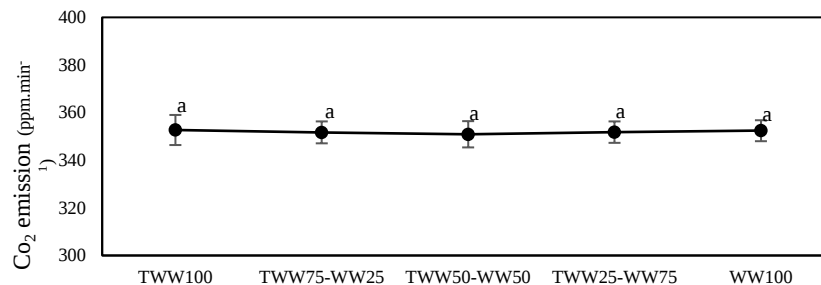
Table 4- Result of Analysis of variance the effect of treated wastewater on soil CO₂ emission

(S.O.V)	df	Mean of square			
		S1 (ppm.min ⁻¹)	S2 (ppm.min ⁻¹)	S3 (ppm.min ⁻¹)	S4 (ppm.min ⁻¹)
Block	2	26.4416ns	3.0841ns	8.6016ns	0.9414ns
Source of irrigation	4	1.5562ns	0.5112ns	98.4876**	55.3639**
Error	8	13.6065	8.564	7.9854	5.0026
Total	14	-	-	-	-
C.v	-	1.0	0.6	0.9	0.4

**, * and ns: showed significant level at 0.01, 0.05 and non-significant, respectively.

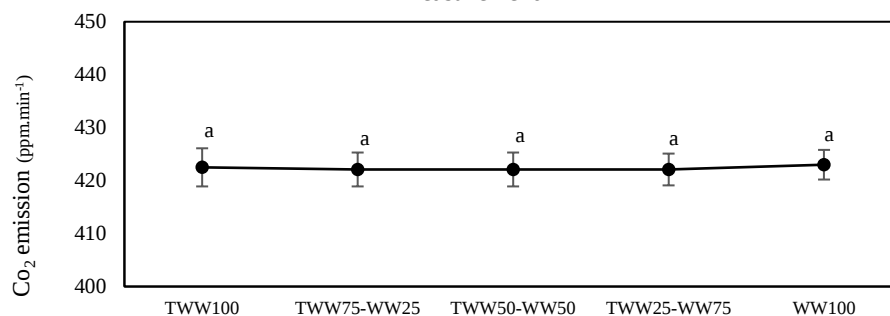
نشده بود. بنابراین، فعالیت ریزجانداران خاک‌زی و به تبع آن تنفس خاک خیلی تأثیر چشمگیری بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن خاک نداشت (شکل‌های ۱ و ۲). همچنین نتایج نشان داد که بیشترین میزان انتشار دی‌اکسید کربن خاک در مرحله سوم سنجش (۵۵ روز پس از کاشت)، مربوط به تیمار آبیاری TWW100 و TWW75-WW25 به‌ترتیب با ۴۵۹/۱ و ۴۵۴/۹ پی‌پی‌ام در دقیقه بود و کمترین میزان انتشار دی‌اکسید کربن خاک مربوط به تیمارهای آبیاری TWW50-WW50، TWW25-WW75 و WW100 به‌ترتیب با ۴۴۹/۶، ۴۴۶/۱ و ۴۴۶ پی‌پی‌ام در دقیقه مشاهده شد (شکل ۳).

بر پایه نتایج مقایسه میانگین‌ها، در مراحل اول (۳۰ روز پس از کاشت) و دوم (۴۵ روز پس از کاشت) سنجش تفاوت چندان قابل توجهی در میزان انتشار دی‌اکسید کربن خاک در میان تیمارهای آزمایش مشاهده نشد. این نتایج قابل انتظار هم بود چراکه در این مراحل، گیاه به‌تازگی نشاء شده بود و از نظر رشد و توسعه اندام هوایی و زیرزمینی، به حد کافی نرسیده بود. لذا تنفس ریشه بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن خاک خیلی تأثیر محسوسی نداشت. از طرف دیگر با توجه به تعداد دفعات کم دور آبیاری با پساب و تیمارهای ترکیبی با پساب از شروع برنامه آبیاری، عناصر غذایی موجود در پساب هنوز به‌طور کافی و کامل در اختیار گیاه قرار نگرفته یا جذب



شکل ۱- مقایسه تأثیر تیمارهای آزمایش بر میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک در مرحله اول سنجش

Figure 1- Comparison of the effect of experimental treatments on the soil CO₂ emissions in the first stage of measurement

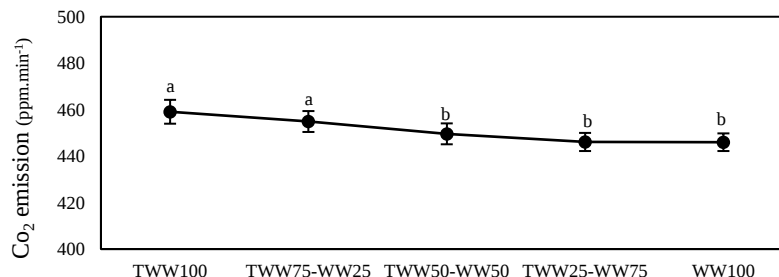


شکل ۲- مقایسه تأثیر تیمارهای آزمایش بر میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک در مرحله دوم سنجش

Figure 2- Comparison of the effect of experimental treatments on the soil CO₂ emissions in the second stage of measurement

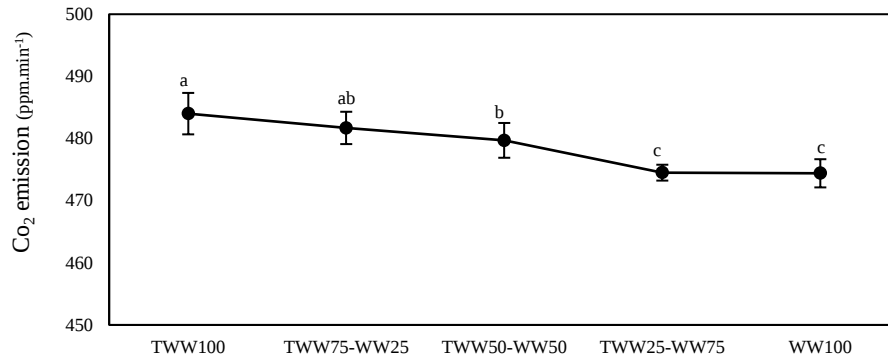
آبیاری TWW25-WW75 و WW100 با مقادیر به ترتیب ۴۷۴/۴ و ۴۷۴/۵ پی پی ام در دقیقه مشاهده شد. در مراحل سوم و بویژه چهارم از سنجش میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک، می توان ارتباط تنگاتنگی را میان افزایش تعداد دفعات آبیاری با پساب و افزایش میزان فعالیت ریزجانداران خاکزی و رشد و نمو اندام های هوایی و توسعه سیستم ریشه گیاه مشاهده کرد، که در نهایت منجر به افزایش تنفس خاک و در پی آن افزایش میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک نسبت به مراحل اول و دوم سنجش شد (شکل ۴).

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، با افزایش تعداد دفعات آبیاری با پساب و بدلیل فراهم ساختن عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، رشد و نمو اندام های هوایی و توسعه سیستم ریشه بهبود یافته و در کنار فعالیت میکروارگانیسم های خاکزی میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک نیز افزایش یافت. بر پایه یافته ها، بالاترین میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک در مرحله چهارم سنجش (۷۰ روز پس از کاشت)، مربوط به تیمار آبیاری TWW100 با مقدار ۴۸۴ پی پی ام در دقیقه بود و پایین ترین میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک مربوط به تیمار



شکل ۳- مقایسه تأثیر تیمارهای آزمایش بر میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک در مرحله سوم سنجش

Figure 3- Comparison of the effect of experimental treatments on the soil CO₂ emissions in the third stage of measurement



شکل ۴- مقایسه تأثیر تیمارهای آزمایش بر میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک در مرحله چهارم سنجش
Figure 4- Comparison of the effect of experimental treatments on the soil CO₂ emissions in the fourth stage of measurement

نتایج این پژوهش با نتایج سایر مطالعات مبنی بر افزایش میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک بدلیل بهبود شرایط فیزیکی و حاصلخیزی خاک، ایجاد شرایط مطلوب برای فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک‌زی و رشد و توسعه اندام‌های هوایی و زیرزمینی گیاه فلفل در اثر آبیاری با پساب در مقایسه با آب چاه، کاملاً همسو بود.

صفات مورفولوژیک و عملکرد میوه

نتایج تجزیه واریانس تأثیر آبیاری با پساب شهری بر صفات مورفولوژیکی گیاه فلفل سبز شیرین، در جدول ۴ ارائه گردید. نتایج نشان داد تأثیر آبیاری با پساب شهری بر ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک ریشه، وزن تر و خشک اندام هوایی، شاخص سطح برگ و عملکرد میوه معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، همچنین نتایج نشان داد که در شرایط آبیاری TWW100، بیشترین وزن تر و خشک ریشه به ترتیب با ۱۶۰/۵ و ۴۶/۱ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. این در حالی بود که کمترین میزان وزن تر و خشک ریشه در شرایط آبیاری WW100 به ترتیب با ۱۵۰/۵ و ۳۲/۲ کیلوگرم در هکتار بدست آمد (شکل ۵). همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان وزن تر اندام هوایی گیاه فلفل سبز در شرایط آبیاری TWW100 با مقدار ۷۳۰/۵ کیلوگرم در هکتار و پایین‌ترین میزان وزن تر اندام هوایی نیز در شرایط آبیاری TWW25-WW75 و WW100 به ترتیب با مقادیر ۶۸۸/۹ و ۶۶۴/۴ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد.

عوامل بسیاری در سرعت معدنی شدن کربن و میزان انتشار دی اکسیدکربن دخالت دارند. به عنوان مثال می‌توان به دو مورد رطوبت خاک و دما اشاره کرد که در نتیجه فعالیت‌های تجزیه‌ای ریزجانداران خاک‌زی ایجاد شده و سهم بسیار عظیمی در میزان انتشار و معدنی شدن کربن دارند (Shiukhy-Soqanloo et al., 2024). از طرفی نتایج Rashid Rostami et al., (2021) حاکی از آن بود که میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک بدلیل تغییرات نامحسوس دما، بسیار ناچیز بود. Chi et al., (2020) افزایش میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک را به شرایط مطلوب دمایی و رطوبت کافی در خاک نسبت دادند. در واقع تنفس ریشه گیاهان در این شرایط افزایش یافته و به دنبال آن با افزایش تنفس خاک، میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک نیز افزایش می‌یابد. نتایج برخی مطالعات مؤید کاهش میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک در اثر کاهش تنفس خاک می‌باشد که این امر بدلیل کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تنفس ریشه گیاهان می‌باشد (Shiukhy-Soqanloo et al., 2024; Negassa et al., 2015). افزایش یا کاهش میزان مواد مغذی موجود در خاک مانند فسفر و ازت، ممکن است فعالیت میکروارگانیسم‌ها را دچار تغییر کند و موجب افزایش یا کاهش فعالیت این جانداران شود که بدین ترتیب می‌تواند بر میزان تنفس خاک و در نتیجه افزایش یا کاهش میزان انتشار دی اکسیدکربن خاک اثر گذار باشد (La Scala et al., 2006). Haj Agha Memar et al (2016) همبستگی مثبتی بین فسفر موجود در خاک و انتشار دی اکسیدکربن از خاک را گزارش کردند. همسنجی

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس آبیاری با پساب شهری بر صفات مورفولوژیک و عملکرد میوه فلفل سبز

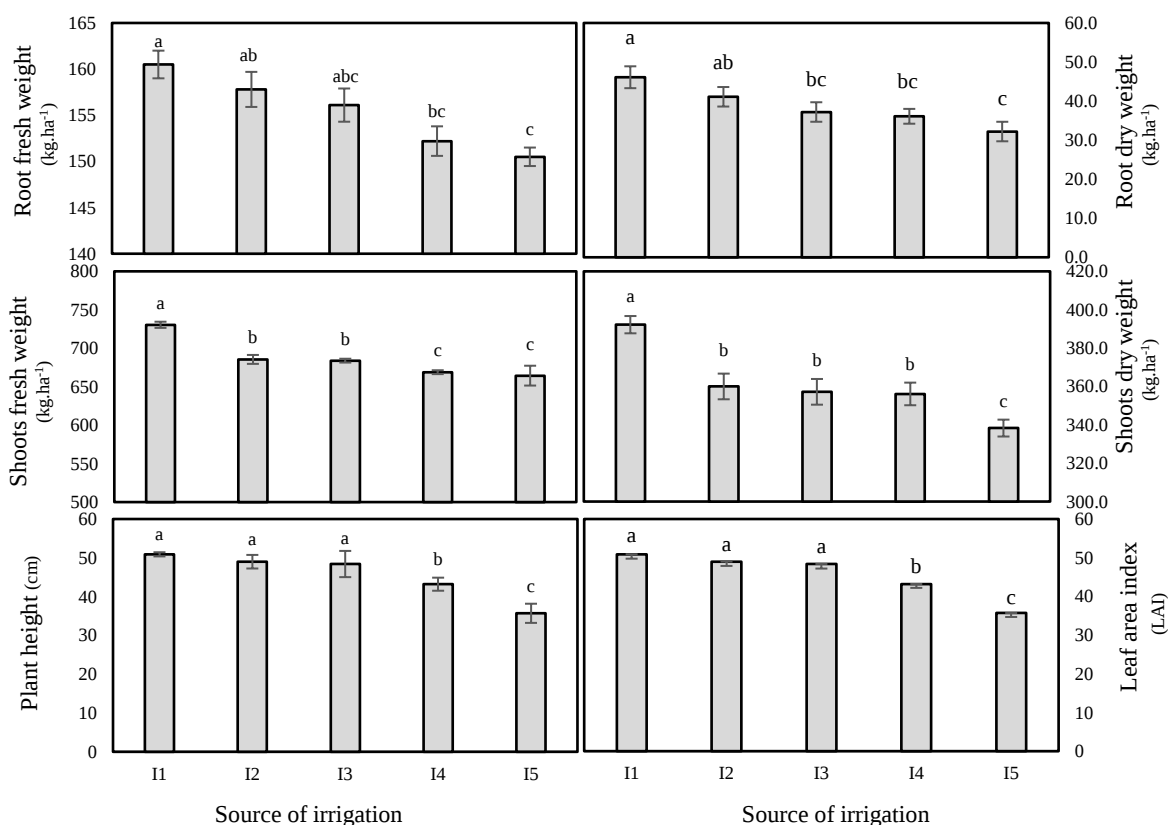
Table 4- Result of analysis of variance the irrigation with treated wastewater on morphological characteristics and green pepper yield

S.O.V	df	Mean of square						
		Root fresh weight (kg.ha ⁻¹)	Root dry weight (kg.ha ⁻¹)	Shoots fresh Weight (kg.ha ⁻¹)	Shoots dry weight (kg.ha ⁻¹)	Plant height (Cm)	LAI	Fruit yield (kg.ha ⁻¹)
Block	2	5.1926ns	12.1940ns	74.1786ns	60.482ns	9.4037ns	0.02ns	223.72ns
Source of irrigation	4	49.5283*	83.734**	2057.3433**	1146.136**	113.6015**	0.24**	10896.22**
Error	8	12.9618	7.0865	40.9378	22.547	3.5758	0.01	58.72
Total	14	-	-	-	-	-	-	-
C.V	-	2.3	6.9	0.9	1.3	4.1	4.6	0.5

**, * and ns: showed significant level at 0.01, 0.05 and non- significant, respectively.

ارتفاع گیاه در شرایط WW100 با ۳۵/۷ سانتی متر مشاهده شد. همچنین بیشترین شاخص سطح برگ مربوط به شرایط آبیاری TWW100، TWW75-WW25 و TWW50-WW50 به ترتیب با ۳/۴۵، ۳/۴۴ و ۳/۴۶ و کمترین مقدار شاخص سطح برگ در شرایط آبیاری TWW25-WW75 و WW100 با مقادیر به ترتیب ۳ و ۲/۷ مشاهده شد (شکل ۵).

در حالی که بیشترین وزن خشک اندام هوایی، مربوط به شرایط آبیاری TWW100، با ۳۹۲/۲ و کمترین مقدار آبیاری در شرایط WW100، با ۳۳۸/۳ کیلوگرم در هکتار بود. بر پایه یافته‌ها، بیشترین ارتفاع گیاه مربوط به شرایط آبیاری TWW100، TWW75-WW25 و TWW50-WW50 به ترتیب با ۴۹، ۵۰/۹ و ۴۸/۴ سانتی متر بود و کمترین مقدار

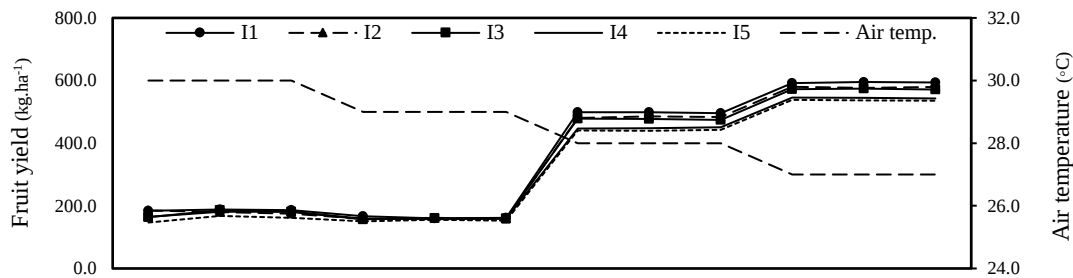


I₁: TWW100, I₂: TWW75-WW25, I₃: TWW50-WW50, I₄: TWW25-WW75, I₅: WW100.

شکل ۵- تأثیر تیمارهای آزمایش بر ویژگی‌های مورفولوژیک فلفل سبز در طول فصل رشد و نمو

Figure 5- The impact of experimental treatments on morphological characteristics of green pepper at during growth season

حد دمای مطلوب رشد بود و میزان عملکرد پایین در برداشت‌های اولیه میوه، مؤید این مسئله بود. با توجه به اینکه دمای مطلوب میوه‌دهی ۲۸-۲۱ درجه سلسیوس می‌باشد، اما دمای هوای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در زمان شروع میوه‌دهی، موجب شد که عملکرد کل میوه به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. در ادامه با سپری شدن زمان و با کاهش دمای هوا تا حد مطلوب رشد (۲۷-۲۳ درجه سلسیوس)، عملکرد میوه به‌طور کاملاً مشهود و محسوسی افزایش پیدا کرد (شکل ۶).



I1: TWW100, I2: TWW75-WW25, I3: TWW50-WW50, I4: TWW25-WW75, I5: WW100

شکل ۶- مقایسه عملکرد میوه میان تیمارهای آزمایش تحت تأثیر دمای هوا در طول دوره برداشت میوه فلفل سبز

Figure 6- Comparison of fruit yield among experimental treatments under the air temperature affect during the fruit-harvesting period of green pepper

سبزی‌نگی و ارتفاع گیاه را به جذب عناصر غذایی موجود در پساب نسبت دادند که در نهایت باعث افزایش عملکرد اسفناج گردید. (Hajihashemi et al, 2020) با بررسی میزان تأثیر آبیاری با پساب بر رشد و فتوسنتز دو رقم گندم بیان کردند که پساب باعث افزایش کارایی مصرف آب و ویژگی‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل، رنگدانه‌های فتوسنتزی و فتوسنتز خالص شد و به دنبال آن شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و عملکرد دانه نیز افزایش پیدا کرد. نتایج Khoshravesh et al., (2021) نشان داد که پساب مغناطیسی سبب افزایش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در ذرت نسبت به پساب غیرمغناطیسی شد. همچنین با افزایش استفاده از پساب، عملکرد و اجزای عملکرد ذرت افزایش یافت. نتایج برخی مطالعات از جمله؛ (Nazario et al., 2019; Yazdani, 2014; Mousavi and Shahsavari, 2017; et al.) نیز به برتری آبیاری با پساب در مقایسه با آب چاه اشاره داشتند. هم‌سنجی نتایج این مطالعات با یافته‌های این پژوهش مبنی بر تأثیر مثبت پساب بر بهبود ویژگی‌های مورفولوژیک فلفل

پساب شهری حاوی مقادیر زیادی از عناصر مغذی مورد نیاز گیاه می‌باشد که با توجه به کیفیت پساب مورد استفاده با فراهم آوردن این عناصر برای گیاه، باعث رشد اندام‌های مختلف گیاهی می‌شود که به دنبال آن، موجب بهبود عملکرد محصول و مواد فتوسنتزی می‌شود (Alizadegan et al., 2022b). استفاده از پساب‌های مختلف بدلیل بهبود بخشیدن به شرایط فیزیکی خاک و فراهم نمودن نیتروژن در خاک، شرایط مورد نیاز برای افزایش رشد و عملکرد و اجزای عملکرد در گیاه را فراهم ساخته که موجب افزایش معنی‌دار عملکرد می‌گردد (Shiukhy-Soqanloo et al., 2023; Badiei et al, 2016). دلیل افزایش سطح برگ را فراهمی نیتروژن خاک و افزایش جذب آن توسط گیاه در شرایط آبیاری با پساب در مقایسه با آب چاه دانستند، که منجر به افزایش عملکرد محصول گردید. (Qazavei and Earst, 2016) بیان نمودند زمانیکه گیاه در مرحله زایشی باشد، وجود به اندازه عناصر غذایی، در پر کردن دانه‌های گیاه گندم نقش مهمی دارند. (Swain et al, 2020) نیز افزایش افزایش وزن تر برگ، شاخص

ارائه گردید. نتایج نشان داد که تأثیر آبیاری با پساب شهری بر غلظت فلزات سرب و کادمیوم خاک و میوه معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، آبیاری با پساب در مقایسه با آب چاه تأثیر بسیار قابل توجهی بر انباشت فلزات سنگین در خاک و میوه فلفل دارند.

سبز همسو بود.

غلظت فلزات سنگین خاک و میوه

نتایج تجزیه واریانس تأثیر آبیاری با پساب شهری بر غلظت فلزات سنگین خاک و میوه فلفل سبز، در جدول ۵

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس تأثیر پساب بر غلظت فلزات سنگین خاک و میوه فلفل سبز

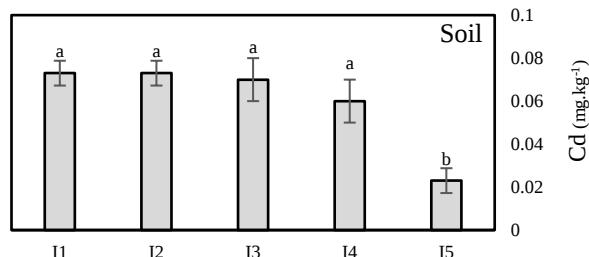
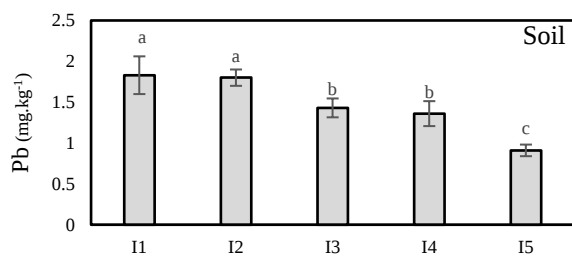
Table 5- Analysis of variance the treated wastewater on HMs concentration and green pepper fruit

S.O.V	df	Mean square			
		Soil		Fruit	
		(Pb)	(Cd)	(Pb)	(Cd)
Block	2	0.0034ns	0.00006ns	0.0036ns	0.00004ns
Source of irrigation	4	0.4221**	0.0013**	0.1069**	0.00027**
Error	8	0.0254	0.00006	0.0095	0.00003
Total	14	-	-	-	-
C.v	-	10.8	12.9	10.2	12.2

***, * and ns: showed significant level at 0.01, 0.05 and non-significant, respectively.

مشاهده شد. این در حالی بود که بیشترین میزان غلظت فلز کادمیوم خاک به ترتیب با ۰/۰۷۲، ۰/۰۷۰ و ۰/۰۶۰ میلی گرم در کیلوگرم، مربوط به شرایط آبیاری TWW100، TWW25 + WW50 و TWW50 + WW50، TWW75 + WW25 بود. لازم به ذکر است علیرغم افزایش غلظت کادمیوم خاک در میان تیمارهای آبیاری با پساب در مقایسه با آب چاه، تفاوت چندانی میان آنها مشاهده نشد (شکل ۷).

بر پایه نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان غلظت فلز سرب موجود در خاک در شرایط آبیاری TWW100 و TWW75+WW25 به ترتیب با ۱/۸۳ و ۱/۸۰ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده شد. در حالی که کمترین میزان آن، مربوط به شرایط آبیاری WW100، با ۰/۹۱ میلی گرم در کیلوگرم بود. همچنین در شرایط آبیاری WW100 کمترین میزان غلظت فلز کادمیوم خاک با ۰/۰۲۳ میلی گرم در کیلوگرم



I1: TWW100, I2: TWW75-WW25, I3: TWW50-WW50, I4: TWW25-WW75, I5: WW100

شکل ۷- بررسی میزان غلظت فلزات سرب و کادمیوم خاک در طول فصل رشد

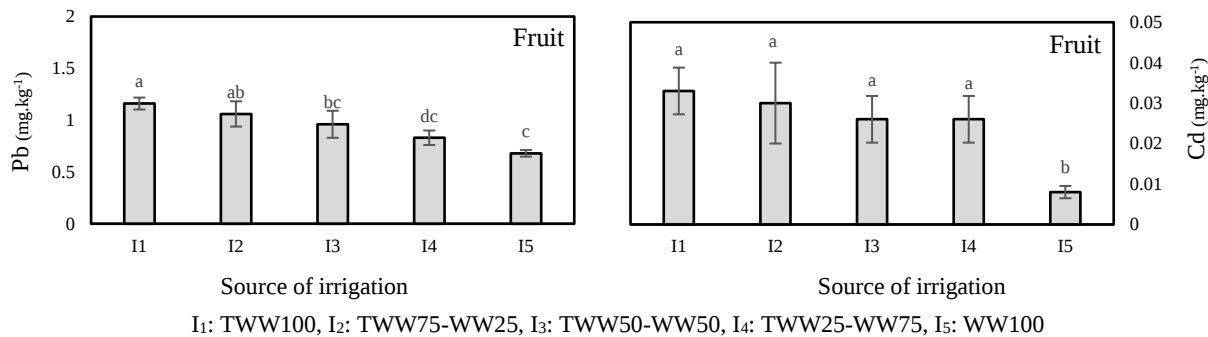
Figure 7- Investigating the lead (Pb) and cadmium (Cd) concentrations in the soil at during the growing season

به شرایط آبیاری با WW100، با ۰/۶۸ میلی گرم در کیلوگرم بود. همچنین نتایج مربوط به غلظت فلز کادمیوم میوه بسیار مشابه با انباشت فلز کادمیوم در خاک بود. به طوریکه در شرایط آبیاری WW100 کمترین میزان غلظت فلز کادمیوم خاک با ۰/۰۰۸ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده شد. این در حالی بود که بیشترین میزان غلظت فلز کادمیوم خاک به

یافته‌های حاصل از مقایسه میانگین‌های تأثیر تیمارهای آزمایش بر میزان غلظت فلزات سرب و کادمیوم میوه فلفل در شکل ۸ ارایه گردید. همانطور ملاحظه می‌شود، بیشترین میزان غلظت فلز سرب میوه در شرایط آبیاری TWW100 و TWW75+WW25 به ترتیب با ۱/۱۶ و ۱/۰۶ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده شد. در حالی که کمترین میزان آن، مربوط

TWW25+WW75 بود. این در حالی بود که در میان تیمارهای آبیاری با پساب تفاوت محسوسی مشاهده نشد و تغییرات تقریباً یکسان بود (شکل ۷).

ترتیب با ۰/۰۳۳، ۰/۰۳۰، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۲۶ میلی گرم در کیلوگرم مربوط به شرایط آبیاری TWW100، TWW75+WW25، TWW50+WW50 و



I1: TWW100, I2: TWW75-WW25, I3: TWW50-WW50, I4: TWW25-WW75, I5: WW100

شکل ۸- بررسی میزان غلظت فلزات سرب و کادمیوم میوه فلفل سبز در طول فصل رشد

Figure 7- Investigating the lead (Pb) and cadmium (Cd) concentrations in green pepper fruit at during the growing season

دال بر این بود که بیشترین میزان عناصر پرمصرف، میزان قابلیت هدایت الکتریکی و انباشت فلزات سنگین خاک، مربوط به منبع پساب در مقایسه با آب چاه بود. نتایج برخی مطالعات از جمله (Shiukhy-Soqanloo et al., 2023; Nazario et al., 2019; Gatta et al., 2015) مؤید آن است که بهره‌گیری از منبع پساب برای آبیاری، افزایش غلظت برخی از فلزات سنگین بویژه کادمیوم را به همراه خواهد داشت. البته با در نظر گرفتن این نکته که، این امر نیازمند سپری شدن زمان می‌باشد و تغییرات به یکباره در طول یک فصل رشد رخ نخواهد داد. با توجه به حدود آستانه استاندارد مجاز برای فلزات سرب (بین ۵-۲ میلی گرم در کیلوگرم) (Chaney, 1989) و کادمیوم (۳-۰/۱ میلی گرم در کیلوگرم) (Baker and Brooks, 1989) در تولیدات گیاهی، نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت سرب و کادمیوم موجود در میوه فلفل سبز بسیار پایین‌تر از حدود استاندارد جهانی و ملی بود. بنابراین هیچ‌گونه اختلالی را در زنجیره غذایی ایجاد نکرده و برای سلامتی مصرف‌کنندگان خطری را بوجود نخواهد آورد.

نتیجه‌گیری

با توجه بروز پدیده تغییر اقلیم و تأثیر پیامدهای نامطلوب آن از جمله افزایش دما، وقوع خشکسالی و متعاقب آن کمبود منابع آب آبیاری در بخش کشاورزی، کاربرد منابع آب نامتعارف همچون منبع آب پساب تصفیه شده شهری ضروری

کاهش عملکرد و اختلال در رشد و نمو یکی از متداول‌ترین و بارزترین اثرات نامطلوبی است که گیاهان در مواجهه با غلظت‌های بالای فلزات سنگین بروز می‌دهند (Alizadegan et al., 2022b). فلزات سرب و کادمیوم برای رشد و نمو گیاه ضروری نمی‌باشند، اما در صورت جذب این فلزات هم عملکرد محصولات کشاورزی کاهش می‌یابد و هم با ورود آنها به زنجیره غذایی، اثرات گاهاً جبران‌ناپذیری بر سلامتی موجودات زنده بویژه انسان بر جای خواهند گذاشت (Shiukhy-Soqanloo et al., 2023). ساختارهای مورفولوژیکی مانند کوتیکول ضخیم، بافت‌های فعال بیولوژیکی به عنوان موانع فیزیکی، نخستین خط دفاعی گیاهان در مقابله با فلزات سنگین شناخته می‌شوند که راهکاری دفاعی برای تحمل سمیت با فلزات سنگین می‌باشند (Emamverdian et al., 2015). غلظت بیش از حد استاندارد فلزات سنگین موجود در خاک بویژه سرب و کادمیوم، کیفیت محصولات کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Sadeghi et al., 2020). محصولات صیفی و سبزیجات به میزان زیادی در معرض آلودگی به فلزات سنگین سرب و کادمیوم قرار می‌گیرند (Ray et al., 2018). استفاده از پساب با توجه به اینکه حاوی عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ریزمغذی‌ها می‌باشد، باعث می‌شود که پساب با افزایش پایداری خاکدانه‌ها باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک و درنتیجه افزایش باروری خاک شود (Fath Al-Ulumi et al., 2015). نتایج (Alizadegan et al (2022b) نیز

- Baziarpur, H., Raeini-Sarjaz, M., Shiukhy-Soqanloo, S. 2020. Influence of rice straw management on emissions of methane and carbon dioxide greenhouse gases during the second rive cropping (Case study, Sari, Iran). *Journal of Agricultural Meteorology*, 8(1), 35-43 (In Farsi).
- Busse, M.D., Sanchez, F.G., Ratcliff, A.W., Butnor, J. R., Carter, E.A., Robert, F. 2009. Soil carbon sequestration and changes in fungal and bacterial biomass following incorporation of forest residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(2), 220-227.
- Chaganti, N.V., Ganjegunte, G., Niu, G., Ulery, A., Flynn, R., Enciso, M.J., Meki, N.M., Kiniry, R.J. 2020. Effects of treated urban wastewater irrigation on bioenergy sorghum and soil quality. *Agricultural Water Management*, 228, 78-91.
- Chaney, R. L. 1989. Toxic element accumulation in soils and crops, protecting soil fertility and agricultural food chains. *Inorganic Contaminants in the Vadose Zone*, 140-158.
- Chen, W., Lu, S., Pen, C., Jiao, W., Wang, M. 2013. Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation. *Environmental Pollution*, 178, 294-299.
- Chi, Y., Yang, P., Ren, S., Ma, N., Yang, J., Xu, Y. 2020. Effects of fertilizer types and water quality on carbon dioxide emissions from soil in wheat-maize rotations. *Science of the Total Environment*, 698, 134010.
- Domashenko, Y., Vasilyev, S. 2018. Agroecological Substantiation for the Use of Treated Wastewater for Irrigation of Agricultural Land. *Journal of Ecological Engineering*, 19(1), 48-54.
- Elmer, P. (1982). Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry.
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., Xie, Y. 2015. Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response. *The Scientific World Journal*, 1-18.
- Farmanifard, M., Pirsahab, H., Fatahi, N. 2017. Impact of Long-Term Irrigation with Kermanshah Municipal Treated Wastewater on Some Soil Physical Properties. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(3), 493-508 (In Farsi).
- Fath Al-Ulumi, S., Asghari, Sh., Goli kalanpal, E. 2015. The effect of municipal sewage sludge on the concentration of high consumption elements in soil and plants and some agronomic traits of wheat. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 2, 49-70. (In Farsi).
- Gatta, G., Libutti, A., Gagliardi, A., Beneduce, L., Brusetti, L., Borruso, L., Disciglio, G., Tatantino, E. 2015. Treated agro-industrial wastewater irrigation of tomato crop, Effects on qualitative/quantitative characteristics of

و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بر پایه یافته‌ها، آبیاری با پساب شهری در مقایسه با منبع آب چاه، بدلیل تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و بهبود شرایط فیزیکی و حاصلخیزی خاک موجب افزایش برخی ویژگی‌های مورفولوژیک و عملکرد میوه فلفل سبز شد. از سوی دیگر، با افزایش میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن خاک و همچنین غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک و میوه استفاده از این منبع آبیاری را با تردید و نگرانی مواجه ساخته است. هر چند غلظت فلزات سنگین چه در خاک و چه در میوه از حد آستانه‌های استانداردهای جهانی و ملی تجاوز نکرد. اما بنظر می‌رسد در بلند مدت این اثرات نامطلوب، چالش‌زا باشند. لذا با توجه به اثرات مثبت استفاده از پساب‌ها، می‌توان بهره‌گیری از پساب شهری به‌صورت متناوب یا ترکیب با آب چاه، را در برنامه‌های مدیریت آبیاری پیشنهاد نمود. البته بایسته است که پایش مداوم و مستمر واحدهای تولیدی (مزارع و گلخانه‌ها) انجام شده و رعایت نکات بهداشتی و زیست‌محیطی نیز لحاظ گردد.

منابع

- Alizadegan, F., Gholami Sefidkouhi, M. A., Shiukhy-Soqanloo, S. 2022b. Evaluation of wastewater effects on soil chemical characteristics, microelements concentrations; heavy metals accumulation and maize yield (Single Cross 704). *Journal of Water and Soil*, 36(4), 1328-1337 (In Frasi).
- Alizadegan, F., Gholami Sefidkouhi, M. A., Shiukhy-Soqanloo, S. 2022a. Evaluation of treated wastewater irrigation effect on yield components and yield of maize (single cross 704). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(6), 1328-1337. (In Frasi).
- Badiei, A., Karandish, F., Tabatabai, S. 2016. The effect of irrigation with raw and treated municipal wastewater on wheat yield and microbial properties of soil and plants. *Journal of Water and Soil Science*, 4(2), 215-228. . (In Farsi).
- Bahari Panbechooleh, H., Mousavi Baygi, S. M. Shiukhy-Soqanloo, S. 2024. Assessment of rate of carbon dioxide emission of soils affected by urban Wastewater and its role on the quality of sweet green pepper. *Agrometeorology, Sari Agricultural Science and Natural Resource (SANRU)*.
- Baker, A.J., Brooks, R. 1989. Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 2, 81-126.

- Impact of the application of domestic wastewater by subsurface drip irrigation on the soil solution in sugarcane cultivation. *Applied and Environmental Soil Science*, 4, 2-11.
- Negassa, W., Price, R. F., Basir, A., Snapp, S. S. Kravchenko, A. 2015. Cover crop and tillage systems effect on soil CO₂ and N₂O fluxes in contrasting topographic positions. *Soil and Tillage Research*, 154, 64-74.
- Qazavie, R., Earst, M. 2016. Evaluation of the effect of irrigation with municipal effluent on the accumulation of some chemical elements in the plant and ecological characteristics of the eucalyptus plant (*Eucalyptus camadulensis* Dehnh). *Journal of Plant Ecology*, 8, 13-29. (In Farsi).
- Raeini-Sarjaz, M., Shiukhy-Soqanloo, S. 2014. Evaluation of the effect of geographical aspects and fruit location within orange tree canopy on Sangin orange fruit quality. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2(1), 57-66. (In Farsi).
- Rasid Rostami, H., Raeini Sarjaz, M. Shiukhy-Soqanloo, S. 2021. Evaluation of the effect of nitrogen fertilizer and irrigation schedule on soil CO₂ flux, photochemical properties and corn yield (Single Cross 704). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(1), 4-13. (In Farsi).
- Ray, R. R. L., Fares, A., Risch, E. 2018. Effects of Drought on Crop Production and Cropping Areas in Texas. *Agricultural & Environmental Letters*, 14:1-5.
- Sadeghi, M., Noroozi, M., Kargar, F., Mehrbakhsh, Z. 2020. Heavy Metal Concentration of Wheat Cultured in Golestan Province, Iran and Its Health Risk Assessment. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 5(2), 993-1000.
- Shiukhy Soqanloo, S., Gholami, M. A., Ghasemi, Y. 2023. Effect of water stress and urban wastewater on the heavy metals concentration, yield and quality of basil. *Journal of Horticultural Science*, 37(3), 723-739. (In Farsi).
- Shiukhy-Soqanloo, S., Gholami Sefidkouhi, M. A., Arefrad, M. 2024. Evaluation of The Water Stress and Irrigation Management Effects on Soil CO₂ Emission, Water Productivity and Soybean Yield (*Glycine max* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(3), 343-357 (In Farsi).
- Shiukhy-Soqanloo, S., Mousavi-Baygi, M., Torabi, B., Raeini-Sarjaz, M. 2021. Evaluation of climate change effects on irrigated wheat CV. Mehregan yield under drought stress condition (Case study, Varamin). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(2), 15-28. (In Farsi).
- Swain, A., Singh, S. K., Mohapatra, K. K., Patra, A. 2020. Effect of sewage sludge application on yield, production and microbiological properties of the soil. *Agricultural Water Management*, 149, 33-43.
- Haj Agha Memar, Sh., Keivan Behjou, F., Sefidi, K., Behtari, B. 2016. Impact of land use management on soil CO₂ greenhouse gas emissions (Case study, Fandoghloo Forest Reserve). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 23(2), 330-343. (In Farsi).
- Hajhashemi, S., Mbarki, S., Skalicky, M., Noedoost, F., Raeisi, M., Brestic, M. 2020. Effect of Wastewater Irrigation on Photosynthesis, Growth, and Anatomical Features of Two Wheat Cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Water*, 12, 1-12.
- Kaliappan, S. B., Gunasekaran, Y., Smyrna, R., and R. S. Meena. 2019. Soil and Environmental Management. In *Sustainable Management of Soil and Environment*, 1-27. Springer, Singapore.
- Khawla, K., Besma, K., Enrique, M., Mohamed, H. 2019. Accumulation of trace elements by corn (*Zea mays*) under irrigation with treated wastewater using different irrigation methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 530-537.
- Khoshravesht, M., Erfanian, F., Pourgholam-Amiji, M. 2021. The Effect of Irrigation with Treated Magnetic Effluent on Yield and Yield Components of Maize. *Water Management in Agriculture*, 8(1), 115-128. (In Farsi).
- La Scala, N. J., Bolonhezi, D. Pereira, G.T. 2006. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 91, 244-248.
- Lindsay, W. L., Norvell, W. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42:421-428.
- Mahfooz, Y., Yasar, A., Guijan, L., Islam, Q. U., Tabinda Akhtar, A. B., Rasheed, R., Irshad, S., Naeem, U. 2020. Critical risk analysis of metals toxicity in wastewater irrigated soil and crops, a study of a semi-arid developing region. *Scientific Reports*, 10(1), 12845.
- Mousavi S. R., Shahsavari, M. 2014. Effects of treated municipal wastewater on growth and yield of maize (*Zea mays*). *Biological Forum*, 6(2), 228-233.
- Naimi, L., Javid, A. M., Mir Bagheri, S. A. 2014. Investigation on Impacts of Using Effluent of Municipal Wastewater Treatment Plant for Irrigation in Order to Sustainable Development (Case Study, Shahrake Gharb WWTP), *Journal of Sustainability, Development and Environment*, 1(1), 37-46. (In Farsi).
- Nazario, A. A., Zution, I., Augusto Agnellos Barbosa, E., Nazario Silva dos Santos, L., Rodrigues Cavalcante Feitosa, D., Matsura, E. E. 2019.

- system. Journal of Cleaner Production, 139, 142-153.
- Vanaee, F., Karami, P., Joneidi J. H., Nabiee, E. K. 2016. Simulation of Soil Organic Carbon Dynamics in Lawn Ecosystem under Different Management Conditions Using the Model of the Century. Rangeland, 10(4), 439-449 (In Farsi).
- Yazdani, A., Saffari, M., Ranjbar, Gh. 2017. Effect of treatment with treated municipal wastewater on grain yield and accumulation of heavy metals in grain of barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.). Iranian Journal of Crop Sciences, 4, 284-296. (In Farsi).
- nutrients uptake and nutrient use efficiency of spinach (*Spinacia oleracea* L.). Annals of Plant and Soil Research, 22(3), 305-309.
- Tabatabaei, S. H., Nourmahnad, N., Golestani Kermani, S., Tabatabaei, S. A., Najafi, P., Heidarpour, M. 2020. Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions- A review. International Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture, 9, 193-220.
- Tripathi, V., Rajput, T. B. S., Patel, N. 2016. Biometric properties and selected chemical concentration of cauliflower influenced by wastewater applied through surface and subsurface drip irrigation



Evaluation of the impact of treated wastewater application on soil Co₂ emission, HMs accumulation and green pepper yield

H. Bahari Panbechooleh¹, M. Mousavi Baygi², S. Shiukhy Sughanlu^{*3}

Received: 02/05/2024

Accepted: 01/12/2024

Abstract

In order to evaluate the impact of treated wastewater application on soil Co₂ emission, HMs accumulation and green pepper yield, an experiment based on randomized complete blocks with three replications was carried out at Sari Agricultural sciences and Natural Resources University (SANRU), Iran in 1402-1401 crop year. Irrigation source treatment includes five levels; treated wastewater (TWW100), (TWW75 + WW25), (TWW50 + WW50), (TWW25 + WW75) and 100% well water (WW100). Based on the findings, the effect of irrigation with treated wastewater on soil Co₂ flux was significant ($P \leq 0.01$). So that the highest level of soil Co₂ emission in the fourth stage was related to TWW100 irrigation conditions with 484 ppm.min⁻¹ and its lowest amount related to irrigation conditions TWW25-WW75 and WW100 was observed with 474.5 and 474.4 ppm.min⁻¹, respectively. Also, the effect of treated wastewater irrigation on the morphological characteristics and green pepper yield was significant ($P \leq 0.01$). So that the highest fruit yield was related to TWW100 with 1536 and the lowest was related to WW100 with 1384.8 kg ha⁻¹. Base on the result, the highest concentration of soil and pepper fruit lead (Pb) was in TWW100 and TWW75+WW25 irrigation conditions, and the lowest level was related to WW100 irrigation conditions. The highest concentration of soil and fruit cadmium (Cd) was observed in TWW100, TWW75+WW25, TWW50+WW50 and TWW25+WW75 irrigation conditions. In general, due to the water scarcity crisis and the importance of irrigation water resources management, it is suggested to use treated wastewater alternately or in combination with well water.

Keywords: Cadmium, LAI, Morphological characteristics, Water deficit, Well water



¹ M. Sc. Graduated of Agro-Meteorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

² Professor of Agro-Meteorology, Department of Water Engineering, Agricultural Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

³ Assistant Professor of Agro-Meteorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Iran

(*Corresponding author Email address: Saeid.Shiukhy@gmail.com)

نحوه ارجاع مقاله:

بهاری پنبه چوله، ح.، موسوی بایگی، م.، شیوخ سوغانلو، س. ۱۴۰۴. ارزیابی تأثیر کاربرد پساب شهری بر انتشار دی اکسید کربن خاک، غلظت فلزات سنگین و عملکرد فلفل سبز. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۳(۱): ۸۲-۹۵. DOI: 10.22125/agmj.2024.456389.1168

Bahari Panbechooleh, H., Mousavi Baygi, M., Shiukhy Sughanlu, S. 2025. Evaluation of the impact of treated wastewater application on soil Co₂ emission, HMs accumulation and green pepper yield. Journal of Agricultural Meteorology, 13(1): 82-95. DOI: 10.22125/agmj.2024.456389.1168