مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۲/ شماره ٤/سال ۱۳۹۰/ص ۱۸-۱

بررسی میزان جذب کادمیوم از خاک آلوده در دوره‌های مختلف رشد گوجه فرنگی

بهمن یارقلی[*,**]

[*] نگارنده مسئول، نشانی: کرج، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص. پ. ۸۴۵- ۳۱۵۸۵، تلفن: ۲۷۰۵۳۲۰ (۰۲۶۱)، پیام‌نگار: yar_bahman@yahoo.com

[**] عضو هیات علمی و استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تاریخ دریافت:۸۹/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۷/۱۶

چکیده

آلودگی محیط زیست با فلزات سنگین مشکل جهانی در حال گسترش است. فلزات سنگین عمدتاً در لایهٔ سطحی خاک رسوب می‌کنند و در دراز مدت با افزایش غلظت آنها در خاک جذب گیاهان می‌شوند و در اندام‌های مختلف آنها تجمع پیدا می‌کنند. کادمیوم خاک از معادل ۰/۰۰۱ تا ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک متغیر است ولی حد نرمال آن باید کمتر از ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک باشد. مقدار جذب و تجمع فلزات سنگین در گونه‌های مختلف گیاهی و در بخش‌های مختلف گونه‌ها متفاوت و متأثر از غلظت فلز و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک است. در زمینهٔ استفاده از آب‌های آلوده و پساب‌های حاوی فلزات سنگین در کشاورزی بررسی‌های زیادی شده است، ولی اطلاعات در زمینهٔ مقدار جذب و تجمع فلزات سنگین در دوره‌های مختلف رشد بسیار محدود است. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف غلظت کادمیوم خاک محیط ریشه بر مقدار جذب و تجمع آن در اندام‌های مختلف گوجه فرنگی در دوره‌های مختلف رشد، به صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تیمار شامل غلظت‌های صفر، ۵۰ ، و۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، در سه تکرار اجرا شد. خاک مورد استفاده از نوع لومی بود که از مزرعهٔ چهارصد هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (کرج) انتخاب و بعد از دو بار الک کردن با مش دو میلی‌متر و افزودن نیترات کادمیوم ($Cd(NO_3)_2$) و مخلوط کردن آن، آماده شد. برای کاشت از بشکه‌های پلاستیکی به قطر ۸۰ و ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. در دورهٔ تحقیق از محلول خاک در عمق‌های مختلف ساعت به ساعت و از اندام‌های مختلف گوجه‌فرنگی در دوره‌های مختلف رشد جهت سنجش مقدار تجمع کادمیوم نمونه‌برداری شد. نتایج حاصل، پس از تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار SPSS، نشان می‌دهد که در تمام اندام‌های گوجه فرنگی اثر تیمار بر مقدار کادمیوم تجمع یافته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است و اندام‌های مختلف گوجه فرنگی از نظر جذب و تجمع کادمیوم رفتارهایی متفاوت دارند بدین معنا که غلظت کادمیوم تجمع یافته در برگ، ریشه، ساقه، میوه و پوست میوه تا دانه روندی کاهشی دارد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که از کل کادمیوم اضافه شده به خاک میزان ناچیزی در اندام مختلف گوجه‌فرنگی تجمع می‌یابد، به طوری که میزان کل کادمیوم تجمع یافته در توده سلولی در تیمار شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ ppm به ترتیب معادل ۰/۰۳۸٤، ۰/۰٥٦٤، و ۰/٦۷۸گرم است. مقایسهٔ نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت کادمیوم کاهش رشد گوجه فرنگی و به ویژه میزان تولید محصول را به همراه دارد. نتایج بیانگر کاهش ۲۰ و ۳۵ درصدی کاهش محصول تولیدی در تیمار ۵۰ و ۱۰۰ ppm ، نسبت به تیمار شاهد است. به رغم کاهش شدید غلظت کادمیوم در محلول خاک در دوره‌های مختلف رشد، از میزان کادمیوم جذب شده در اندام‌های گوجه‌فرنگی کاسته نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی

جذب، جعبه کشت، خاک آلوده، دوره‌های رشد، کادمیوم، گوجه فرنگی

مقدمه

دفع فلزات سنگین طی فعالیت‌های انسان، آلودگی خاک‌های زیادی را به همراه داشته است؛ تا آنجا که شدت آلودگی این خاک‌ها در بسیاری از نقاط بیش از حد استاندارد است (Carlos *et al.*, 2005; Rossini & Fernandez, 2007). بررسی‌ها نشان می‌دهد که تا سال

© 2014,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۲۰۰۵، حداقل ۲۰ میلیون هکتار از اراضی آفریقا، بخش مهمی از اراضی زراعی آمریکای جنوبی، خاورمیانه، جنوب اروپا و جنوب غرب آمریکا، مکزیک و بخش مهمی از آسیا با فاضلاب خام آبیاری می‌شد. استفاده از این منبع آب آبیاری در مناطق مختلف، آلودگی محیط زیست و تجمع فلزات سنگین در خاک و انتقال آنها به محصولات زراعی را به همراه داشته است (Nicholson *et al.*, 2003; Carr, 2005; Richard-Sally & Buechiler, 2005).

منبع اصلی فلزات سنگین خاک مصرف پساب‌های شهری و صنعتی، نهاده‌های شیمیایی (سموم و کودها)، لجن حاصل از تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری و معادن استخراج فلزات است. مهمترین فلزات سنگین موجود در فاضلاب‌ها سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، کروم (Cr)، قلع (Sn) و آرسنیک (As) هستند. اکثر فلزات سنگین در لایهٔ سطحی خاک رسوب می‌کنند و تجمع تدریجی آنها در دراز مدت منجر به انتقال به محصولات زراعی در حدی فراتر از استانداردهای مجاز مصارف انسانی می‌شود (Channey *et al.*, 2002; Okoronkwo *et al.*, 2005). کادمیوم، با حد مجاز معادل ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، یکی از مهمترین و متحرک‌ترین فلزات سنگین خاک محسوب می‌شود. محل اصلی تجمع کادمیوم در بدن، بافت‌های نرم هستند و مسمومیت با این فلز باعث آسیب به کلیه، استخوان، و سیستم عصبی می‌شود (Sauerbeck, 1991; Okoronkwo *et al.*, 2005).

بر اساس استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، میانگین مجاز ماهانه افزایش یون کادمیوم در خاک معادل ۳۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اعلام شده است و مقدار کل کادمیوم اضافه شده در هر هکتار خاک در سال نباید از ۱/۹ کیلوگرم تجاوز کند (Anon, USEPA, 1995). سازمان بهداشت جهانی مقدار مجاز کادمیوم در رژیم غذایی هفتگی انسان را ۷ میکروگرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن و حداکثر مقدار مجاز این عنصر را در خوراک انسانی ۰/۱ ppm اعلام کرده است (Anon, WHO, 1992a). برای تغذیهٔ دام نیز مقدار مجاز کادمیوم ۱۰ تا ۲۰ ppm گزارش شده است (Kabatta & Pendias, 2001). تحقیقات نشان می‌دهد که تجمع فلزات سنگین بسته به نوع فلز، شرایط خاک، و گونهٔ گیاه متفاوت است و در اندام‌های هوایی، به ویژه برگ و ساقه، بیش از سایر اندام‌ها و در دانه بسیار کمتر از برگ و ساقه است (Tiller, 1989; Kabatta & Pendias, 2001; Hattori *et al.*, 2002). با توجه به کمبود آب، شهرهای بزرگ کشور جهت جبران آن ناگریز از مصرف پساب‌های شهری و صنعتی (حاوی فلزات سنگین) در کشاورزی هستند. مطالعات نشان می‌دهد که به طور میانگین ۶ متر مکعب در ثانیه فاضلاب و روان‌آب سطحی تهران از طریق مسیل‌ها و کانال‌ها با دریافت آلاینده‌های مختلف شهری و صنعتی، صرف آبیاری حدود ۵ تا ۸ هزار هکتار از اراضی زراعی جنوب تهران می‌شود که در آنها بیشتر سبزی و صیفی می‌کارند (Yargholi, 2007). کاربرد دراز مدت این پساب‌ها و همچنین مصرف غیر اصولی کودهای شیمیایی که عمدتاً برای کشت سبزی و صیفی به‌کار می‌روند، منجر به تجمع فلزات سنگین در خاک و انتقال آن به محصولات زراعی شده است (Shariat & Farshi, 1997). بر اساس نتایج این تحقیق، مقدار کادمیوم، سرب و کروم در سبزی‌های مزارع این منطقه به ترتیب با مقادیر ماکزیمم ۲/۹، ۱۰/۵، و ۹/۷ میکروگرم در گرم در بوته‌های جعفری، تربچه و شوید بیش از مقدار مجاز هر گیاه برای مصارف خوراکی بوده است. استفاده از فاضلاب در بخش‌هایی از اراضی زراعی قزوین باعث افزایش غلظت سرب، مس، کادمیوم و روی به ترتیب به حدود ۳۲۵، ۳۸، ۱/۶، و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک شده که بیش از حد مجاز (۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است (Mostashari, 2002). این حالت برای بخش مهمی از اراضی کشور، به ویژه در حاشیهٔ شهرهای بزرگ به وجود آمده و در حال گسترش است. بررسی آلودگی اراضی

زراعی کشور نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم و سرب در بخشی از اراضی زراعی آلوده استان‌های گیلان و اصفهان ۱/۹ تا ۱۸۰/۵ و زنجان و چهارمحال بختیاری ۸۹/۴ تا ۲۶۱۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است (Jafarzadeh, 1997; Shariat & Farshi, 1997).

نتایج پژوهش‌های ترابیان و مهجوری (Torabian & Mahjori, 2002)، نشان می‌دهد که دامنهٔ آلودگی اراضی زراعی جنوب تهران به کادمیوم ۰/۱۰۱ تا ۷/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و در گونه‌های زراعی (انواع سبزی) در محدوده ۰/۳۹۷تا ۱/۴۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک محصول است که بیش از حد مجاز برای مصرف انسان است. با توجه به روند رو به رشد جمعیت و توسعهٔ صنعتی کشور، گسترش آلودگی‌های ناشی از این عناصر و ورود آنها به زنجیرهٔ غذایی رو به افزایش است. به‌رغم تحقیقات مختلف در زمینهٔ اثر فاضلاب‌های شهری و صنعتی بر خصوصیات خاک و گیاه، اطلاع دقیقی از مقدار جذب فلزات سنگین از محیط ریشه در دوره‌های مختلف رشد گونه‌های زراعی، در دست نیست و جهت استفاده کم خطر از این منابع و حفظ سلامت جامعه، اجرای تحقیقات کاربردی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش در قالب تحقیقاتی جامع، با هدف رفتار سنجی کادمیوم در سامانه زیستی خاک - گیاه اجرا شده است. در این مقاله، نتایج بررسی میزان جذب کادمیوم در گونه گوجه فرنگی طی دوره‌های مختلف رشد و تجمع آن در بخش‌های مختلف گونهٔ مذکور بحث و تجزیه و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

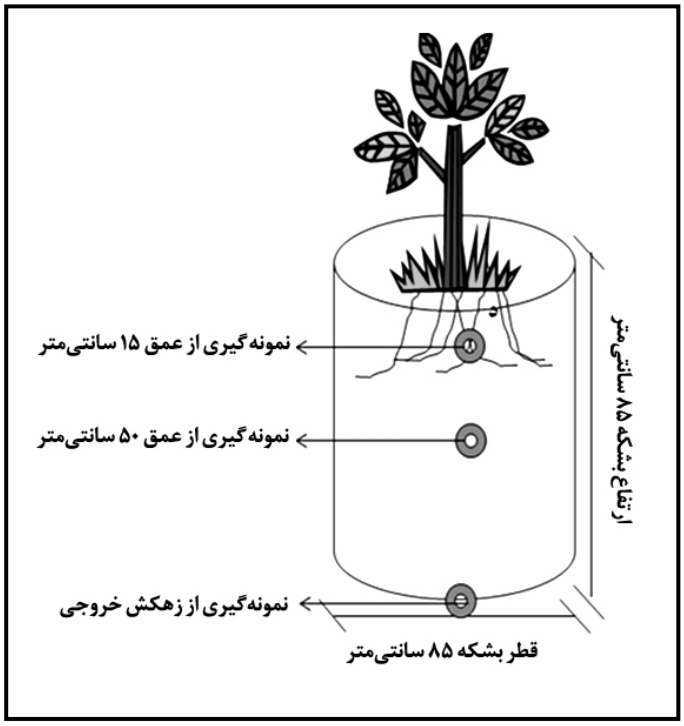
این تحقیق روی رقم گوجه فرنگی سانسید (Sun seed)، به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به مدت یک سال در سه تیمار و سه تکرار در محل مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج اجرا شده است. این رقم گوجه‌فرنگی مورد مطالعه از عملکرد مطلوب برخوردار بوده و مقاومت آن در مقابل بیماری‌ها و آفات مطلوب بوده و توسعه گسترده‌ای در سطح کشور دارد. تیمارها شامل غلظت کادمیوم خاک در سه سطح (خاک شاهد بدون افزودن کادمیوم، خاک با غلظت ۵۰ و خاک با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم) بوده که با افزودن نیترات کادمیوم (Cd(NO3)2) با درجه خلوص ۹۰درصد پودری شکل طی چند مرحله به خاک و تهیهٔ مخلوط یکنواخت حاصل شده است. بدین‌صورت که با توجه به عناصر تشکیل دهنده (Cd(NO3)2) و درصد خلوص آن، نیترات کادمیوم مورد نیاز برای ۱۰۰۰ کیلوگرم خاک با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، معادل ۲۳۵/۵ گرم محاسبه و ابتدا در ۲ کیلوگرم خاک نرم و کاملاً خشک مخلوط گردید، سپس مخلوط حاصل با افزودن خاک، مخلوط شده و به وزن ۱۰ کیلوگرم، سپس با افزودن خاک و اختلاط به وزن ۵۰ کیلوگرم رسانده شد و این عمل طی چند مرحله، تا رسیدن خاک به وزن ۱۰۰۰ کیلوگرم ادامه پیدا کرد. همین روش با نیترات کادمیومی معادل ۱۱۷/۷۵ برای تهیه تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیز استفاده گردید.

اختلاط در اول پاییز و کاشت در نیمهٔ دوم فروردین اجرا شد و در این بین در دو نوبت به فاصلهٔ دو ماه خاک تیمارشده با افزودن آب به حالت اشباع در آمد. قبل از شروع عملیات زراعی، نمونه‌ای از خاک تهیه و آنالیز شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. این تحقیق در محیط کنترل شده (بشکه‌های مستقر در فضای آزاد از جنس پلاستیک، به قطر ۸۰ و ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر) اجرا شد که با خاک با غلظت کادمیوم مورد نظر پر شده بودند. برای آنکه از فرونشینی خاک، ایجاد ترک و آسیب رسیدن به کپسول‌های مکش جلوگیری شود خاک بشکه‌ها متراکم شد. برای سهولت نمونه‌گیری، بشکه‌ها روی سطح زمین

قرار گرفتند و بدنه بشکه‌ها برای جلوگیری از اثر تابش خورشید و گرم شدن، با پارچه شفاف و محوطه‌سازی پوشانده شدند.

در دو عمق مختلف (۱۵ و ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک) محیط ریشه و خروجی زهکش در هر تیمار، کپسول‌های مکش و متعلقات آن با هدف گرفتن محلول خاک (با تواتر ساعتی) برای آنالیز شیمیایی تعبیه شد. کپسول‌های مکش حدوداً ۴۵ سانتی‌متر طول و ۳ میلی‌متر ضخامت دارندکه بخش اول آن (حدود ۲۰ سانتی‌متر) از جنس پلاستیک سخت و نوک آن از جنس سرامیک است که با ایجاد مکش، آب از این قسمت جذب می‌شود. بخش دوم از جنس پلاستیک شفاف و نرم است که در بیرون از خاک قرار می‌گیرد. برای حفظ پایداری و جلوگیری از انسداد آن در اثر وزن خاک از درون آن یک میله نازک استیل عبور داده شده است. انتهای بخش دوم جهت نمونه‌گیری قابل اتصال به پمپ و سایر وسایل مکشی است. برای سهولت در نمونه‌برداری، بشکه‌ها در سطح زمین کار گذاشته شدند و برای کاهش اثر نورخورشید، سطح خارجی آنها با پارچهٔ کتان سفید پوشانده شد. بذر گیاه در نیمهٔ دوم فروردین کاسته شد و آبیاری تا نیمهٔ دوم شهریور ادامه داشت. در هر بشکه، هشت بوته کشت شده بود که چهار تای آنها در مراحل مختلف رشد جهت بررسی، کنده شده و چهار بوتهٔ دیگر تا پایان تحقیق باقی ماند.

دوره‌های رشد مورد نظر در این تحقیق شامل چهار دوره اصلی (رشد اولیه، رشد سریع، رسیدن اولیه، و رسیدن نهایی) بود که نمونه‌برداری در اواسط هر دوره صورت گرفت. در مراحل مختلف کاشت، داشت، و برداشت به منظور حذف اندازه‌گیری فلزات سنگین موجود در نهاده‌های مصرفی، از مصرف سموم و کودهای شیمیایی خودداری شد. شماتیک پایلوت مورد استفاده در شکل۱ ارائه شده است.



شکل ۱- شماتیک پایلوت مورد استفاده

جدول۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

فاکتور	واحد	مقدار	دستگاه یا روش اندازه‌گیری
pH	-	۷/۴	pH متر
ماسه	درصد	۳۵	
سیلت	درصد	۴۲	هیدرومتری
رس	درصد	۲۳	
موادآلی	درصد	۱/۲۵	روش والکلی- بلک
FC	درصد	۲۷/۵	Pressure plate
PWP	درصد	۱۳/۴	Pressure plate
Ca^{2+}	میلی اکی‌والان بر لیتر	۴/۱۲	تیترکردن
Mg^{2+}	میلی اکی‌والان بر لیتر	۳/۳۱	تیترکردن
Na^{+}	میلی اکی‌والان بر لیتر	۲/۷۲	فلیم فتومتر
HCO_3^{-}	میلی اکی‌والان بر لیتر	۳/۲	تیترکردن
SO_4^{2-}	میلی اکی‌والان بر لیتر	۳/۲۴	اسپکتروفتومتر
Cl^{-}	میلی اکی‌والان بر لیتر	۳/۸	تیترکردن
ظرفیت تبادل کاتیونی	میلی‌اکیوالان‌گرم بر ۱۰۰گرم	۱۱	Bower
هدایت هیدرولیکی اشباع	سانتی‌متر در روز	۲۷/۸۰	دستگاه اندازه‌گیری هدایت الکتریکی به روش بار متغیر
جرم مخصوص ظاهری	کیلوگرم‌بر متر مکعب	۱۳۴۰	پارافین
جرم مخصوص حقیقی	کیلوگرم‌بر متر مکعب	۱۵۹۰	پیکنو متر
EC_e	دسی زیمنس بر متر	۱/۶۵	EC متر
کادمیوم	میلی‌گرم برکیلوگرم	۰/۰۳	اسپکتروفتومتر جذب اتمی

در این تحقیق، مقدار آب مورد نیاز گیاه با استفاده از روش پنمن مانتیث (با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه مشکین‌آباد کرج) روزانه برآورد و با توجه به فصل و مراحل رشد گونه، به فواصل حدوده ده روزه به گیاه داده شد. در تعیین آب مورد نیاز، مطابق روش ارائه شده در کتاب برآورد نیاز آبی محصولات زراعی از ضریب رشد گیاهی (Kc) برای مراحل مختلف رشد گونه‌های مورد مطالعه استفاده شد (Farshi *et al*., 1999). به منظور ایجاد زهاب، آب داده شده به گیاه معادل ۱/۲ برابر نیاز آبی محاسبه شده بود. برای آبیاری محصولات مورد مطالعه از آب شرب و لوله کشی شهر کرج با کیفیت ارائه شده در جدول ۲ استفاده شد.

جدول۲- مشخصات کیفی آب مورد استفاده در آبیاری محصولات

پارامتر	EC	pH	Ca	Mg	Na	K	CO_3	HCO_3	SO_4	Cl	Cd
واحد	میکرو زیمنس بر سانتی‌متر	-	میلی اکی‌والان گرم در لیتر								میلی‌گرم در لیتر
میانگین	۶۳۵	۷/۳	۳/۲	۳/۸	۱/۶۹	۰	۰-	۳/۶۴	۲/۸۷	۲/۰۵	ND

در دوره‌های مختلف رشد، از بخش‌های مختلف (ریشه، ساقه، برگ، و میوه) گوجه‌فرنگی جهت سنجش غلظت کادمیوم تجمع یافته نمونه‌برداری شد. بخش‌های مختلف نمونه‌های برداشت شده با چاقوی پلاستیکی از هم جدا شدند و پس از شستشو با آب مقطر، در دمای ۷۰ درجهٔ سلسیوس به مدت سه روز خشک شدند. نمونه‌های خشک شدهٔ هر تیمار بعد از اختلاط کامل آسیاب و پودر شدند. پنج گرم از پودر حاصل با افزایش تدریجی دما از ۲۵ به ۴۵۰ درجه سلسیوس طی ۱/۵ ساعت و نگهداری در دمای ۴۵۰ درجهٔ سلسیوس به مدت ۲ ساعت، سوزانده و خاکستر شد. خاکستر حاصل، در ۲۰ میلی‌لیتر محلول (HCl:HNO3, 3:1V/V) ریخته و با آب مقطر به نسبت ۱:۲۰ رقیق شد. پس از آن، با دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (4100ZL, Cupertino, CA GFAA, Perkin-Elmer model)، غلظت کادمیوم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. ظرفیت کاتیونی خاک با روش باور (Bower) اندازه‌گیری شده است که در آن از استات سدیم (pH=8.2) و استات آمونیوم (pH=7) استفاده گردید (Markert, 1996). نمونه‌ها در آزمایشگاه‌های آب، خاک و فاضلاب و همچنین آزمایشگاه صنایع غذایی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی در کرج آنالیز شدند.

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صفات مورد بررسی، نخست آنالیز واریانس شدند. میانگین‌های صفات در سطوح فاکتورهای آزمایشی از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد مقایسهٔ آماری شدند. برای محاسبات آماری و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای SPSS و Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

میزان کادمیوم در بخش‌های مختلف گونهٔ مورد مطالعه از لحاظ آماری بررسی شد. تجزیهٔ واریانس میانگین غلظت کادمیوم در اندام‌های مختلف گونه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در هر یک از شش بخش ریشه، ساقه، برگ، میوه، پوست میوه، و دانه اثر تیمار بر مقدار کادمیوم تجمع یافته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول۳)، که بدین معنی است که اندام مختلف گونه گوجه فرنگی از نظر جذب و تجمع کادمیوم رفتاری متفاوت دارد و این تفاوت رفتار براساس محاسبات آماری در سطح یک درصد معنی‌دار است.

جدول ۳ - تجزیهٔ واریانس اثر فاکتورهای آزمایش بر غلظت کادمیوم در اندام مختلف گونه گوجه فرنگی

منابع تغییر	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات					
		ریشه	ساقه	برگ	میوه	پوست میوه	بذر
تیمار	۲	۰/۵۹۰**	۰/۶۰۵**	۰/۷۹۴**	۰/۴۹۳**	۰/۴۹۱**	۰/۴۴۷**
خطا	۱۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱	۰/۱۴۶	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات		۱/۰۶	۱/۳۰	۲/۰۶	۱/۰۹	۲/۳۵	۲/۵۵

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

نتایج تأثیر تیمارها بر میانگین تجمع کادمیوم در اندام‌های مختلف بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در جدول ۴ نشان داده شده است. تمایز رده بندی‌ها در ستون‌های عمودی (اثر تیمارها بر اندام مختلف) شدیدتر است و میزان کادمیوم تجمع‌یافته در هر اندام هر یک از تیمارها، متفاوت است. این تمایز در ردیف‌های افقی (اندام مختلف در یک تیمار)، نسبت به ستون‌های عمودی حداقل است و تمایز کمتری دیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که غلظت کادمیوم تجمع یافته نسبت مستقیم با غلظت کادمیوم هر تیمار دارد و در تمام اندام‌های شاهد حداقل و

در تیمار ۱۰۰ ppm حداکثر است. نکته جالب توجه، کاهش غلظت کادمیوم در اندام مصرفی (میوه، پوست میوه، و دانه) در مقایسه با ریشه، ساقه و برگ (اندام غیر خوراکی) است. این نتیجه با تحقیقات پژوهشگران دیگر (Giordano & Mays, 1977; Tiller, 1989; Fazeli, 1998) همخوانی دارد که در آنها نشان داده شده است میزان تجمع کادمیوم در دانهٔ سبزی‌ها، غلات و محصولات صیفی کمتر از سایر اندام‌هاست.

در این تحقیق، کادمیوم فلزی است با تحرک و قابلیت جذب زیاد، به ویژه در سبزی‌ها، که به راحتی از طریق پوست ریشه جذب و از راه سیمپلاستی یا آپوپلاستی با واردشدن در بافت چوب به اندام‌های فوقانی گیاهان منتقل می‌شود. تحقیقات گیوردانو و مایز (Giordano & Mays, 1977) نشان می‌دهد که با کشت گوجه‌فرنگی در خاک‌های با بافت متوسط ودارای کادمیوم با غلظت ۳۵ و۵۰ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم، غلظت کادمیوم تجمع یافته در برگ به ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۲/۱ و در میوه معادل ۰/۲ و ۰/۳۹ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم است.

بررسی نتایج تأثیر تیمارهای غلظت کادمیوم در خاک بر میزان تجمع آن در اندام‌های مختلف، (جدول ۴) نشان می‌دهد که در تمام اندام‌ها، تجمع کادمیوم در تیمار سوم نسبت به سایر تیمارها در سطح یک درصد دارای افزایش معنی‌داری است و پس از آن به ترتیب تیمارهای دوم و اول قرار گرفته‌اند. بالاترین تجمع کادمیوم در گونه مورد بررسی معادل ۱/۳۳ ppm ، مربوط به برگ در تیمار ۱۰۰ ppm و حداقل آن معادل ۰/۰۲ ppm ، مربوط به دانه در تیمار شاهد است. بررسی میانگین نتایج نشان می‌دهد که ترتیب میزان تجمع کادمیوم در اندام مختلف شامل برگ، ساقه، ریشه، میوه، پوست میوه و دانه است.

جدول٤ - مقایسهٔ اثر تیمارها بر مقدار تجمع کادمیوم در اندام‌های مختلف گونه گوجه فرنگی

گونه	تیمار	ریشه	ساقه	برگ	میوه	پوست میوه	دانه
		میلی‌گرم بر کیلوگرم					
	شاهد (خاک بدون افزودن کادمیوم)	۰/۰۴۱e	۰/۰۵۶e	۰/۰۴۴e	۰/۰۳۳ef	۰/۰۵۴e	۰/۰۲۰f
گوجه فرنگی	خاک با غلظت کادمیوم ۵۰ PPM	۰/۸۱c	۰/۷۲c	۱/۰۸b	۰/۶۴d	۰/۵۵۳d	۰/۴۵۰d
	خاک با غلظت کادمیوم ۱۰۰ PPM	۱/۲۱a	۱/۱۷ab	۱/۳۳a	۰/۹۳b	۰/۸۶۷b	۰/۸۷۰b

اعداد دارای حروف یکسان، از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱درصد فاقد اختلاف معنی‌دار هستند.

همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که رابطهٔ بین تیمارها و تجمع کادمیوم در اندام مختلف متفاوت است، بدین مفهوم که روند تغییرات کادمیوم خاک بین سطوح مختلف تیمارهای آزمایشی تأثیرات متفاوتی در اندام مختلف گونه مورد بررسی دارا و این تغییر در بعضی از اندام‌ها قابل توجه و بعضی دیگر قابل اغماض است. در این زمینه، نتایج تحقیق (Giordano & Mays, 1977) نشان می‌دهد که قابلیت تجمع کادمیوم در ساقه عامل محدودکنندهٔ مهمی در رشد گونه‌هاست و بعضی از گیاهان از جمله گوجه‌فرنگی به دلیل تجمع کم آن در ساقهٔ خود، توان رشد بالایی در خاک و آب آلوده به کادمیوم دارند و حتی در خاک‌های با غلظت ۱۷۰ میلی‌گرم کادمیوم نیز قادر به رشد هستند.

بررسی نتایج تیمارها نشان می‌دهد که میزان جذب و تجمع کادمیوم نسبت مستقیم با غلظت کادمیوم محیط ریشه دارد و با افزایش غلظت این عنصر، میزان جذب و تجمع آن در گونهٔ مورد بررسی افزایش می‌یابد. این نتایج همسو با نتایج تحقیقات سایر محققان از جمله (Ramos *et*

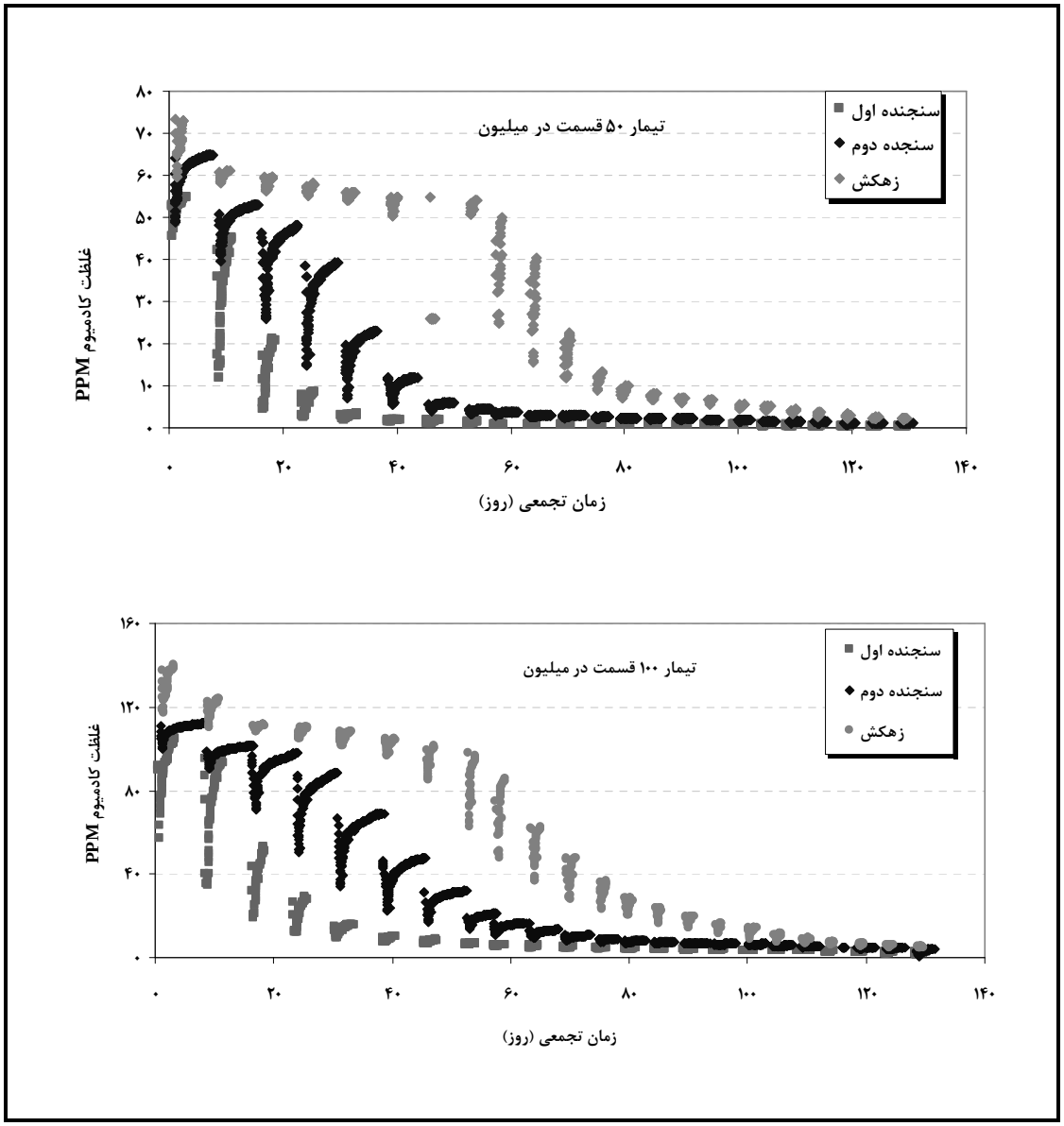
(*al*, 2002 است. بر پایهٔ نتایج حاصل از تحقیق (جدول ۵)، به استثنای تیمار شاهد، در سایر تیمارها غلظت کادمیوم تجمع یافته در بخش خوراکی گونهٔ گوجه فرنگی بیش از حد مجاز برای مصارف انسانی است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که از کل کادمیوم اضافه شده به خاک میزان ناچیزی در اندام‌های مختلف گوجه‌فرنگی تجمع یافته است، به طوری که میزان کل کادمیوم تجمع یافته در توده سلولی حاصل در تیمارهای شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ ppm به ترتیب معادل ۰/۰۳۸۴، ۰/۵۶۴، و ۰/۶۷۸گرم است. چنانچه مشاهده می‌شود میزان کادمیوم تجمع یافته در تیمار شاهد در مقایسه با دو تیمار دیگر ناچیز و قابل اغماض است و حداقل میزان را دارد. میزان کادمیوم تجمع یافته در تیمار ۱۰۰ ppm بیشتر از سایر تیمارها است ولی میزان آن در مقایسه با تیمار ۵۰ ppm افزایش قابل توجهی را نشان نمی‌دهد. این عامل عمدتاً به واسطه کاهش تولید محصول به دلیل اثر منفی ناشی از افزایش غلظت کادمیوم در خاک است. در جدول ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، میزان کل تودهٔ سلولی تولیدی کاهش می‌یابد. براساس نتایج حاصل وزن خشک تودهٔ سلولی تولیدی در تیمارهای شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ ppm کادمیوم به ترتیب معادل ۸۹۷، ۷۳۸، و ۶۱۰ گرم است.

جدول ۵ - میزان و غلظت کادمیوم تجمع یافته در اندام مختلف گونه گوجه‌فرنگی

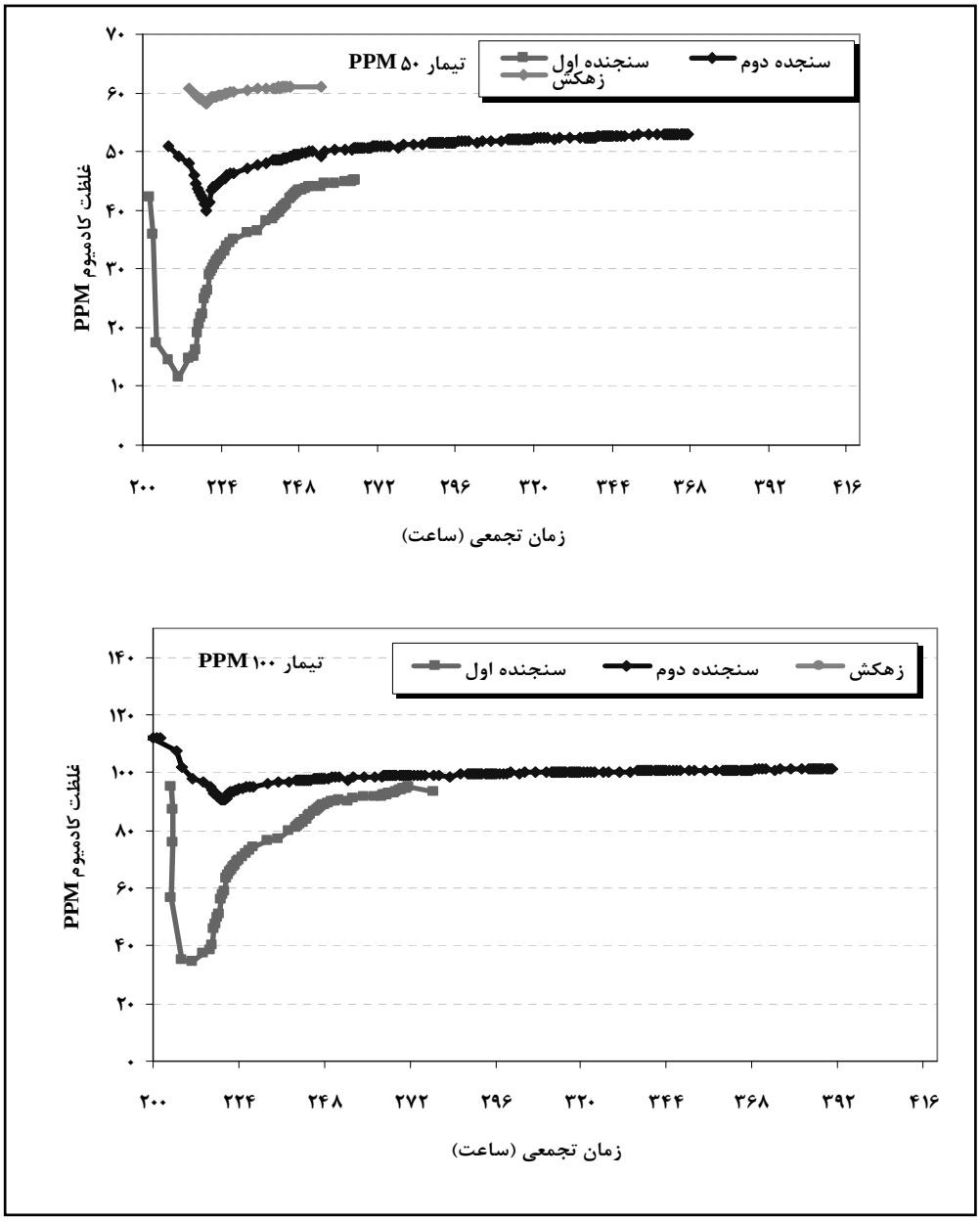
اندام	واحد	تیمار شاهد	تیمار۵۰ ppm	تیمار۱۰۰ ppm
برگ	وزن خشک	۱۶۲	۱۳۸	۱۱۹
	غلظت کادمیوم	۰/۰۴۴	۱/۰۸	۱/۳۲
	میزان کل کادمیوم	۰/۰۰۷۱	۰/۱۴۹	۰/۱۵۷
ساقه	وزن خشک	۲۷۵	۲۳۵	۱۹۵
	غلظت کادمیوم	۰/۰۵۶	۰/۷۲	۱/۱۷
	میزان کل کادمیوم	۰/۰۱۵۴	۰/۱۶۹	۰/۲۲۷
ریشه	وزن خشک	۹۸	۷۳	۶۱
	غلظت کادمیوم	۰/۰۴۱	۰/۸۱	۱/۲۱
	میزان کل کادمیوم	۰/۰۰۴	۰/۰۵۹	۰/۰۷۳۸
میوه	وزن خشک	۳۶۲	۲۹۲	۲۳۵
	غلظت کادمیوم	۰/۰۳۳	۰/۶۴	۰/۹۳
	میزان کل کادمیوم	۰/۰۱۱۹	۰/۱۸۶۹	۰/۲۱۸۵
کل	وزن خشک	۸۹۷	۷۳۸	۶۱۰
	میزان کل کادمیوم	۰/۰۳۸۴	۰/۵۶۴	۰/۶۷۸
حد مجاز برای مصارف خوراکی (میلی‌گرم بر کیلوگرم محصول)			۰/۱	

در شکل ۲ و ۳ به ترتیب روند تغییرات غلظت کادمیوم در آب موجود در عمق‌های مختلف خاک در طول دورهٔ تحقیق و در دورهٔ آبیاری ارائه شده است. ناپیوستگی‌های موجود در نمودارها در شکل ۲، به دلیل کاهش رطوبت و ناممکن شدن نمونه برداری است. چنانچه از شکل مذکور مشاهده می‌شود با هر آبیاری و

افزایش میزان رطوبت خاک، غلظت کادمیوم در آب موجود در خاک کاهش می‌یابد و در حدود رطوبت اشباع به حداقل میزان خود می‌رسد. به تدریج با کاهش رطوبت میزان غلظت کادمیوم در آب موجود در خاک افزایش می‌یابد و این میزان در حدود رطوبت ۱۷ درصد (کمترین میزان رطوبت قابل نمونه‌گیری) به حداکثر میزان خود می‌رسد. دامنهٔ تغییرات غلظت کادمیوم در هر نوبت آبیاری در ابتدای فصل زراعی وسیع است و این میزان به مرور در نوبت‌های بعدی در طول فصل زراعی کاهش می‌یابد و در انتهای فصل به حداقل می‌رسد. این نتیجه می‌تواند ناشی از خروج بخشی از کادمیوم به صورت زه‌آب، به ویژه در اوایل فصل و همچنین کاهش غلظت کادمیوم در خاک و تثبیت بیشتر آن در خاک، در انتهای فصل در مقایسه با ابتدای دوره کشت باشد.



شکل۲- روند تغییرات غلظت کادمیوم در آب موجود در عمق‌های مختلف خاک در طی دوره تحقیق



شکل۳- روند تغییرات غلظت کادمیوم در آب موجود در عمق‌های مختلف خاک طی یک نوبت آبیاری

غلظت کادمیوم در اندام‌های مختلف گوجه‌فرنگی در مراحل مختلف رشد و روند تغییرات آن در محلول خاک در دوره‌های مختلف رشد در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب برای تیمار دوم و سوم ارائه شده است. در نمودارها مشاهده می‌شود که مرحلهٔ رشد اولیه حدود ۳۰ تا ۳۵ روز و اوایل این دوره مصادف با غلظت بالای کادمیوم است که البته روند کاهشی شدید دارد. به رغم کوتاه بودن این دوره، جذب و تجمع در برگ و ساقه گیاه مورد نظر قابل توجه است. دورهٔ رشد سریع شامل ۵۰ تا ۴۰ روزه است که طی آن روند کاهش غلظت کادمیوم در محلول خاک تداوم دارد ولی روند جذب و تجمع کادمیوم تقریباً با روند دوره رشد اولیه مشابه است. علت این امر می‌تواند افزایش

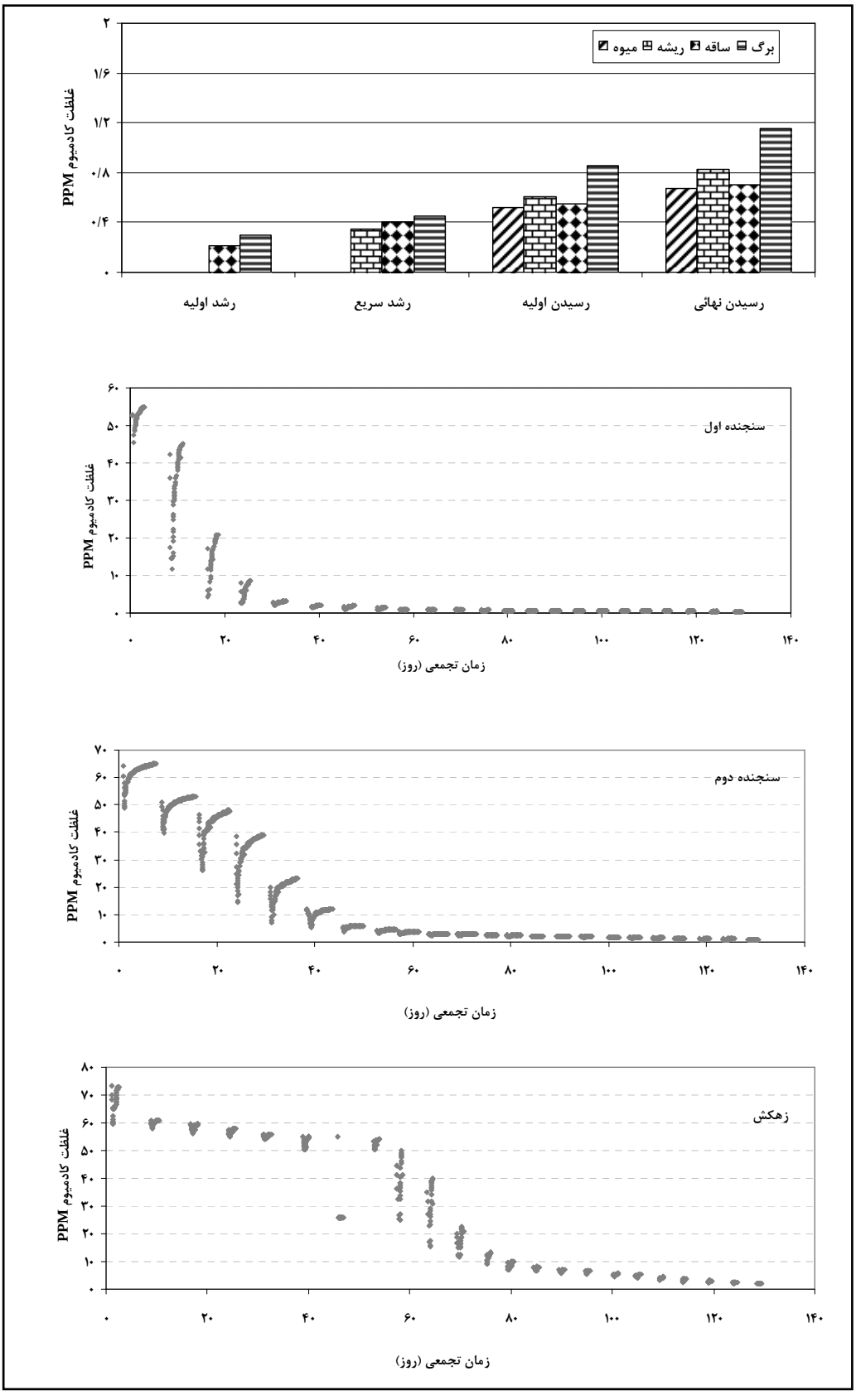
عمق ریشه و افزایش توان گیاه در جذب و استفاده از کادمیوم لایه‌های عمقی‌تر خاک باشد. در مراحل بعدی رشد (رسیدن اولیه و رسیدن نهایی) که هریک به ترتیب حدود ۴۰ و ۴۵ روز طول می‌کشد؛ غلظت کادمیوم در محلول خاک کاهش چشمگیری پیدا می‌کند ولی جذب و تجمع کادمیوم در اندام گیاه تداوم دارد. این عامل می‌تواند ناشی از تداوم گسترش ریشه، همسو با حرکت کادمیوم به لایه‌های عمقی‌تر و همچنین جذب تبادل یا تثبیت شده در خاک باشد.

میزان غلظت کادمیوم با عمق خاک نسبت مستقیم دارد؛ با افزایش عمق خاک غلظت این عنصر در محلول خاک افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که غلظت کادمیوم در محلول خاک روندی کاهشی دارد که پیش‌بینی می‌شود علت آن جذب نشدن این عنصر و تثبیت کامل کادمیوم افزوده شده به خاک در مراحل اولیهٔ کشت و حرکت آن به صورت تدریجی از سطح به عمق و همزمان با آن تثبیت و جذب بیشتر در لایه‌های تحتانی باشد. این روند در سنجنده اول به واسطهٔ واقع شدن در لایهٔ سطحی‌تر بیشترین شدت و در زهکش خروجی به واسطهٔ واقع شدن در لایهٔ تحتانی کمترین شدت را دارد. همچنین روند کاهش غلظت کادمیوم محلول خاک، به دلیل جذب نشدن و تثبیت نشدن کامل آن در خاک، در مراحل ابتدایی فصل کشت زیاد است و به مرور با رسیدن به انتهای فصل کشت و جذب و تثبیت بیشتر، این روند کاهش می‌یابد. در بررسی بیلان کادمیوم بر اساس جرم کادمیوم تجمع یافته در اندام مختلف گوجه فرنگی و همچنین کادمیوم موجود در خاک، مشاهده می‌شود که بخش اصلی کادمیوم اضافه شده به خاک بعد از اتمام عملیات زراعی جذب خاک می‌شود و در آن باقی می‌ماند (جدول ۶). این میزان در تیمار ۵۰ ppm معادل ۱۹/۰۹ گرم و یا معادل ۹۰/۶۸ درصد و در تیمار ۱۰۰ ppm معادل ۳۶/۵۰ گرم و یا معادل ۸۶/۷۰ درصد کل کادمیوم اضافه شده به خاک است.

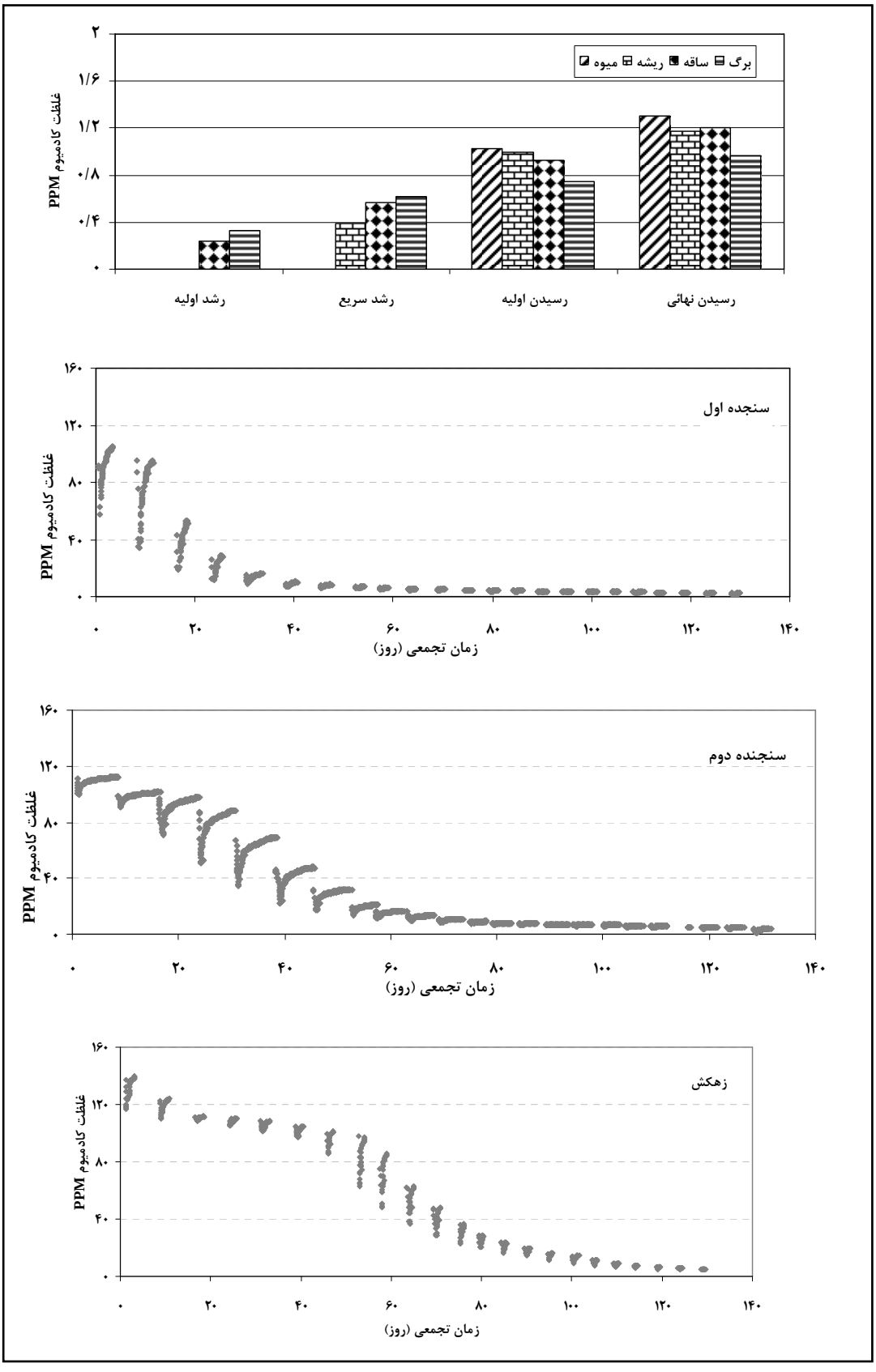
تفاوت مجموع این دو با کادمیوم اضافه شده، میزان کادمیوم دفع شده به صورت زهاب درنظر گرفته شد که در تیمار اول معادل ۱/۴۰ گرم (۶/۶۵ درصد) و در تیمار دوم ۴/۹۲ گرم (۱۱/۶۸ درصد) کل کادمیوم اضافه شده به خاک به دست آمده است.

جدول٦- بررسی وضعیت تعادل جرمی کادمیوم در بخش‌های مختلف

اجزای مختلف	تیمار ۵۰ ppm		تیمار ۱۰۰ ppm	
واحد	گرم	درصد	گرم	درصد
میزان تجمع در خاک	۱۹/۰۹	۹۰/۶۸	۳۶/۵۰	۸۶/۷۰
میزان دفع در زهاب	۱/۴۰	۶/۶۵	۴/۹۲	۱۱/۶۸
میزان تجمع در محصول	۰/۵۶	۲/۶۶	۰/۶۷۸	۱/۶۱
جمع کل	۲۱/۰۵	۱۰۰	۴۲/۱۰	۱۰۰



شکل٤- نمودارهای غلظت کادمیوم در آب موجود در عمق‌های مختلف خاک و اندام گوجه فرنگی در تیمار۵۰ ppm



شکل۵- نمودارهای غلظت کادمیوم در آب موجود در عمق‌های مختلف خاک و اندام گوجه فرنگی در تیمار ۱۰۰ ppm

بررسی نتایج مطابق نمودارهای شکل ۵، نشان می‌دهد که غلظت کادمیوم محلول در آب در دوره‌های اول آبیاری بالاست و در طول دورهٔ آبیاری روندی کاهشی دارد. این امر نشان می‌دهد که به رغم این که بعد از افزودن نیترات کادمیوم به خاک، چند ماه صرف تثبیت آن در خاک شده، این زمان کافی نبوده است. مشاهده، غلظت‌های بالای کادمیوم در آب نشانگر وجود کادمیوم غیر تثبیت شده در خاک است که البته در طول دورهای آبیاری از میزان محلول در آب کاسته و بخش عمده آن در خاک تثبیت شده است. یادآوری می‌شود کادمیوم موجود در خاک به دو قسمت اصلی محلول در آب و بخش تثبیت شده در خاک قابل تقسیم است. نمونه‌هایی که در این تحقیق اندازه گرفته و در نمودارها ارائه شده است بیانگر غلظت کادمیوم در محلول خاک (آب موجود در خاک) است. این میزان لزوماً تابعی از غلظت کادمیوم تثبیت شده در خاک نیست، می‌توان نتیجه گرفت که به رغم کاهش شدید غلظت کادمیوم در محلول خاک در طول فصل زراعی (مرحلهٔ رسیدن اولیه و رسیدن نهایی)، به دلیل گسترش محدودهٔ توسعهٔ ریشه و همچنین توانایی ریشه در جذب کادمیوم تثبیت شده در خاک، میزان جذب و تجمع این فلز در اندام گونه گوجه‌فرنگی کاهش نیافته است. این نتیجه می‌تواند مطابق با سوابق تحقیقات و نشانگر این موضوع باشد که تنها کادمیوم موجود در محلول خاک عامل جذب و انتقال این عنصر در محصولات زراعی نیست بلکه کادمیوم جذب شده در خاک نیز می‌تواند به منبعی از کادمیوم برای گونه‌های زراعی محسوب شود. بر اساس نتایج تحقیقات (Lasat, 2003; Lee *et al.*, 1998)، بعضی از گیاهان از ریشه خود ترکیبات آلی اسیدی ترشح می‌کنند که سبب اسیدی شدن لایه میکرونی اطراف ریشه یا ریزوسفر و افزایش قابلیت انحلال فلزات سنگین می‌شوند. همچنین بعضی از گیاهان از ریشه خود ترکیبات آلی کیلیت کننده ترشح می‌کنند که با فلزات سنگین خاک پیوند می‌خورد و جذب آنها را تسهیل می‌کنند. این ترکیبات تحت عنوان فیتوسایدروفورها خود به دو دسته کیلیت کننده‌های گیاهی و متالوتیون‌ها تقسیم می‌شوند.

این فاکتور لزوم توجه به خاک‌های آلوده به فلزات سنگین را به رغم استفاده از آب غیرآلوده آشکار می‌سازد. براساس نتایج حاصل از این تحقیق، گونه گوجه فرنگی در مرحلهٔ رشد اولیه در معرض بیشترین غلظت فلز کادمیوم در محلول خاک است و در مرحله رسیدن نهایی این حالت به حداقل می‌رسد. توجه به این نکته نیز ضروری است که گوجه‌فرنگی عموماً نشاکاری می‌شود و محصول گوجه‌فرنگی مصرفی در دو مرحله رسیدن اولیه و رسیدن نهایی به دست می‌آید و بهتر است در حد توان از کاشت این گیاه در خاک‌های آلوده به ویژه در مراحل آخر رشد (رسیدن اولیه و رسیدن نهایی)، خودداری شود.

نتیجه‌گیری

بررسی نتایج نشان می‌دهد که از کل کادمیوم اضافه شده به خاک میزان ناچیزی در اندام مختلف گوجه‌فرنگی تجمع می‌یابد، به طوری که میزان کل کادمیوم تجمع یافته در کل توده سلولی گونه گوجه فرنگی حاصل در تیمار شاهد، ۵۰ و تیمار ۱۰۰ ppm کادمیوم به ترتیب معادل ۰/۰۳۸۴، ۰/۵۶۴، و ۰/۶۷۸گرم است (حد مجاز برای مصارف خوراکی معادل ۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم است). به جز تیمار شاهد در دو تیمار دیگر غلظت کادمیوم تجمع یافته در اندام‌های مختلف گونه گوجه‌فرنگی بیش از حد مجاز برای مصارف انسانی است. نتایج نشان می‌دهد که غلظت کادمیوم تجمع یافته نسبت مستقیم با غلظت کادمیوم تیمار دارد و در تمام اندام‌ها در تیمار شاهد حداقل و در تیمار ۱۰۰ ppm حداکثر است.

نکتهٔ جالب توجه، کاهش غلظت کادمیوم در اندام مصرفی میوه، پوست میوه و دانه)، در مقایسه با ریشه، ساقه و برگ (اندام غیر خوراکی)، است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که میزان زیست تودهٔ گونه گوجه فرنگی نسبت عکس با غلظت کادمیوم دارد و این موضوع آشکارا در جدول ۳ مشاهده می‌شود. این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش غلظت کادمیوم کاهش رشد و نمو گوجه فرنگی و میزان تولید محصول را به همراه دارد و این فاکتور در میزان محصول تولیدی مؤثرتر است، به طوری که نتایج بیانگر کاهش ۲۰ درصد و ۳۵ درصد از میزان محصول تولیدی در تیمار ۵۰ و ۱۰۰ ppm، نسبت به تیمار شاهد است.

سنجش میزان کادمیوم در محلول نیم‌رخ خاک نشان می‌دهد که غلظت این عنصر نسبت عکس با رطوبت خاک دارد و با شروع هر نوبت آبیاری، همزمان با افزایش رطوبت خاک، کاهش می‌یابد اما به مرور با کاهش رطوبت خاک، افزایش می‌یابد. این تغییرات دامنه وسیعی دارد و تغییرات مذکور در ابتدای فصل زراعی بالا بوده ولی به مرور در نوبت‌های بعدی در طول فصل زراعی کاهش یافته است و در انتهای فصل به حداقل می‌رسد. غلظت کادمیوم با عمق خاک نیز نسبت مستقیم دارد و با افزایش عمق خاک غلظت آن افزایش می‌یابد. در طول فصل زراعی، غلظت کادمیوم در محلول خاک روندی کاهشی دارد و شدت این روند از سطح به عمق رو به کاهش است.

غلظت کادمیوم در محلول خاک طی فصل زراعی به شدت کاهش می‌یابد. به رغم کاهش شدید غلظت کادمیوم محلول خاک در طول فصل زراعی، به ویژه در مراحل رسیدن اولیه و رسیدن نهایی، از غلظت و میزان جذب و تجمع این فلز در اندام‌گونه گوجه‌فرنگی کاسته نمی‌شود. غلظت کادمیوم در محلول خاک، از ۱۰۰ درصد در ابتدای دوره رشد به ترتیب به حدود ۵۰ درصد در پایان رشد اولیه، ۱۵ درصد در پایان رشد سریع، ۵ درصد در پایان مرحلهٔ رسیدن نهایی و کمتر از ۱ درصد در پایان مرحلهٔ رسیدن نهایی می‌رسد. این موضوع با نتایج تحقیقات دیگر (Lasat, 2003 & Lee *et al.*, 1998)، همسو و نشانگر این است که به رغم کاهش شدید کادمیوم موجودر محلول خاک میزان جذب آن در گیاه کاهش نشان نمی‌دهد. یعنی تنها کادمیوم موجود در محلول خاک عامل جذب و انتقال این عنصر در محصولات زراعی نیست و بلکه کادمیوم جذب شده در خاک نیز می‌تواند به عنوان منبعی از این فلز برای گونه‌های زراعی محسوب شود. با توجه به توانایی گیاه گوجه فرنگی در جذب کادمیوم تثبیت شده در خاک لزوم توجه به خاک‌های آلوده به فلزات سنگین را به رغم استفاده از آب غیرآلوده، آشکار می‌سازد. لازم است در حد توان از کاشت این گیاه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین خودداری شود.

قدردانی

از همکاران آزمایشگاه آب، خاک و فاضلاب و همچنین آزمایشگاه بخش تحقیقات صنایع غذایی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی به ویژه از سرکار خانم‌ها مهندس شفیعی، مهندس بهمدی، مهندس معدنی و مهندس عباسی برای همکاری در اجرای آزمایش‌ها قدردانی می‌شود.

مراجع

Anon. WHO. 1992. Cadmium-Environmental Aspects. Geneva. World Health Organization.

Anon. USEPA. 1995. Standard for Use Or Disposal Of Sewage Sludge. Fedral Register: Oct. 25. 60(206).

Carlos, A., Constantino, L., Garcia, F.P., Razo, L.M.D., Vazquez, R. R. and Varaldo, H.M.P. 2005. Chemical fractionation of heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. J. Agric. Ecosys. Environ. 108, 57-71.

Carr, R. 2005. WHO guidelines for safe wastewater use: More than just numbers. J. Irrig. Drain. Eng. 54, 103-111.

Channey, R.L. 1980. Health risks associated with toxic metals in municipal sludge. In: Damron, G.T. (Eds.) Ann Arbor. Science Pub.

Channey, R., Baker, A., Malik, Y. and Brown, J. 2002. Phytoremediation of soil metals. J. Current Opinion Biotech. 36, 115-21.

Farshi, A.A., Shariati, M.R., Jarollahi, R., Shahabifar, M. and Tavallaei, M.M. 1999. An Estimate of Water Requirement of Main Field Crops and Orchards in Iran. Vol. 1: Field Crops. Soil and Water Research Institute. (in Farsi)

Fazeli, M.S. 1998. Enrichment of heavy metal in paddy crops irrigated by paper mill effluents near Nanjangud, Mysore District, Karnatake. India Environ. J. Geol. 34(4): 42-54.

Giordano, P.M. and Mays, D.A. 1977. Yield and heavy metal content of several vegetable species grown in soil amended with sewage sludge. In Biological Implications of Heavy Metals in the Environment. ERDA REP. Conf. 750929. Oak. Ridge. Tennessee.

Hattori, H.E., Asari, E. and C. Mitsuo. 2002. Estimate of cadmium concentration in brown rice. The 17th World Conference of Soil Science. Aug. 14-21. Thailand.

Jafarzadeh, N. 1997. Assessment the wastewater use effects in Shiraz on heavy metals concentration on soil and plants. Proceeding of the 6th Water and Soil Conference. (in Farsi)

Kabatta, A. and Pendias, H. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. The 3rd Ed. CRC Press. Boca Raton FL.

Lasat, M. M. 2003. The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. J. Environ Pollution. 113, 121-7.

Lee, J., Reeves, R.D. and Brooks, R. 1998. The relation between nickel and citric acid in some nickel accumulation plants. Phytochemistry. 17, 1033-1035.

Markert, B. 1996. Insturmental Element and Multi-element Analysis of Plant Samples. John Wiley and Sons. Sussex. England.

Mattigod, S.V., Sposito, G. and Page, A.L. 1981. Factors affecting the solubility's of trace metal in soils. In: Dowdy, R.H. (Ed) Chemistry in the Soil Environment Soil. Sci. Soc. Am. Madison, WI.

Mostashari, M. 2002. Investigation of Quazvin soils and plants pollution with heavy metals during irrigation with wastewater. Proceeding of the 7th Water and Soil Conference. (in Farsi)

Nicholson, F.A., Smith, S.R., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C. and Chambers, B.J. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. J. Sci. Total Environ. 311, 205-219.

Okoronkwo, N.E., Igwe, J.C. and Onwuchekwa, E.C. 2005. Risk and health implications of polluted soils for crop production. African J. Biotech. 4(13): 1521-1524.

Ramos, I., Esteban, E., Lucena, J.J. and Garate, A. 2002. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of lactuca sp. Ca-Mn intraction. Plant Sci. 162, 761-767.

Richard-Sally, L. and Buechiler, S. 2005. Managing wastewater agriculture to improve livelihoods and environmental quality in poor countries. J. Irrig. Drain. Eng. 54, 11-22.

Rossini, S., Oliva, A. and Fernandez, E. 2007. Monitoring of heavy metals in topsoil, atmospheric particles and plant leaves to identify possible contamination sources. Microchemical. J. 86, 131-139.

Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.12/No.4/2012/P: 1-18

Cadmium Absorption by Tomatoes at Different Growth Stages in Polluted Soil

B. Yargholi*

* Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Tehran, Iran. P.O. Box: 31585-845. E-Mail: yar_bahman@yahoo.com
Received: 24 May 2010, Accepted: 8 October 2011

Environmental pollution by heavy metals is a growing global concern. Most heavy metals accumulate in the top soil and in the long term, increased concentrations in the soil results in increased absorption and accumulation in plants. The usual concentration of cadmium in the soil is 0.001-2.4 mg/kg of dry soil. The level of absorption and accumulation in plants depends on the type of plant, tissue make-up of the plant and physical and chemical characteristics of the soil. There is a deficit of information on the amounts of absorption and accumulation of heavy metals at different tomato growth stages. This study was conducted to analyze the impact of the level of cadmium concentration in soil on its absorption and accumulation at different stages of tomato growth using factorial experimentation in a completely randomized design with three repetitions. The variables were three Cd concentrations (control treatment with no Cd; soil with 50 mg kg-1 Cd; soil with 50 mg kg-1 Cd; soil with 50 mg kg-1 Cd). The soil samples were collected from 400 ha of farmland at the Seed and Plant Improvement Institute in Karaj, Iran. They were sifted twice using 2 mm mesh and the treatments were prepared by adding cadmium nitrate to the soil to make homogeneous mixtures. The experiments were carried out in plastic cylinders 120 cm in length and 85 cm in diameter. The depth of the solution soil was sampled hourly and tomato organs were sampled at different growth stages to record the cadmium absorption rate. SPSS software was used to perform an analysis of variance of the data and the Duncan multiple range test was used to perform a comparison of means ($P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$). Results showed that cumulative cadmium concentration differs in the tissues of the leaf, root, leg, fruit and peel in decreasing order. A negligible amount of the total cadmium added to the soil was absorbed by the plant. Total cadmium absorbed in the cellular colonies of the tomato plant in the control treatment, soil with 50 ppm added Cd, and soil with 100 ppm added Cd were 0.0384, 0.564 and 0.678 g, respectively. The results indicate a direct relationship between Cd accumulation and Cd concentration in the root region. A comparison of the outcomes indicated that increasing the cadmium concentration resulted in a reduction of tomato growth and, especially, the production rate. A 20-35% decrease in production rate was seen in 50-00 ppm cadmium exposure compared to the control. These results show that strong decreases in cadmium concentrations in the solution soil did not decrease the absorption rate of cadmium at various growth stages of the tomato.

Keywords: Growth stages, Tomato, Cadmium, Absorption, Polluted soil