

ارزیابی برخی فلزات سنگین در خاک‌های شالیزاری و تجمع آنها در اندام‌های برنج در منطقه لنجان استان اصفهان

قاسم رحیمی*^۱ و امین چرخ‌آبی^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۵/۱۵

^۱ استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghasemr@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر تجمع فلزات سنگین در برنج رشد یافته در اراضی آلوده به این فلزات به یک نگرانی اساسی تبدیل شده است. بر این اساس مقادیر فلزات سنگین (کادمیوم، مس، آهن و منگنز) در خاک، آب و اندام‌های برنج (*Oryza sativa L.*) کشت شده (به‌ترتیب در ۹۰، ۶ و ۴۱ نمونه) در اراضی شالیکاری منطقه لنجان اندازه‌گیری شد. این منطقه در استان اصفهان واقع شده و در معرض آلاینده‌های متعدد قرار دارد. نتایج نشان داد که غلظت کادمیوم در آب رودخانه ۰/۰۰۵ میلی‌گرم بر لیتر و نزدیک به حد استاندارد (۰/۰۱ میلی‌گرم بر لیتر) بودند، با این حال، باید اثرات تجمعی آن را در درازمدت مد نظر داشت. غلظت مس (۲۳/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم)، آهن (۱۲۷۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) و منگنز (۱۰۸/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) در ریشه‌های برنج بالاتر از حد مجاز (۲۰، ۴۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. همچنین غلظت کادمیوم در ریشه، ساقه و دانه‌های برنج (به‌ترتیب ۱/۶، ۱/۱ و ۱/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود که بسیار بالاتر از حد مجاز (۰/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود و از لحاظ مصرف توسط انسان به‌ویژه ساکنان محلی، نیازمند توجه است. تعیین فاکتور انتقال فلزات در اندام‌های گیاه برنج نشان داد که مس و منگنز، با توجه به تحرک نسبتاً پایین در گیاه، احتمالاً توسط فاکتورهای بیرونی مانند فرونشست جوی در منطقه کنترل می‌گردند. میزان مس در اندام هوایی برنج در منطقه چمگردان بالاترین مقدار را داشت که علت آن را می‌توان به نزدیکی بیشتر این منطقه به دودکش‌های کارخانه نوب‌آهن نسبت داد. بنابراین، علاوه بر نقش ویژگی‌های خاک، فعالیت‌های انسانی نیز در غلظت فلزات مورد مطالعه تأثیر به‌سزایی دارند که به‌منظور دستیابی به کشاورزی پایدار بایستی مورد توجه واقع گردد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، برنج، فاکتور انتقال، فلزات سنگین

Assessment of Some Heavy Metals in Paddy Soils and their Accumulation in the Organs of Rice in the Lenjan Area of Isfahan Province

G Rahimi ^{*1} and A Charkhabi ²

Received: 2 June 2013 Accepted: 6 August 2013

¹⁻ Assist. Prof., Soil Sci. Dept, Faculty of Agric., Bou-Ali Sina Univ., Hamadan, Iran

²⁻ Graduated M.Sc., Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., Bou-Ali Sina Univ., Hamadan, Iran

* Corresponding Author Email: ghasemr@gmail.com

Abstract

In recent years, the accumulation of toxic heavy metals in grown rice at contaminated soil has led to a major concern. Accordingly, the quantities of heavy metals (Cd, Cu, Fe and Mn) were measured in soil, water and different parts of rice plants (*Oryza sativa L.*) cultivated (90, 6 and 41 samples, respectively) in Lenjan region. The studied area is located in Esfahan province and is exposed to various contaminants. The results showed that the concentrations of Cd in the water samples (0.005 mg/L) were less than the standard level (0.01 mg/L). However, its long term cumulative effects should be considered. The concentrations of Cu (23.4 mg/L), Fe (12708 mg/L) and Mn (108.9 mg/L) in roots of rice plant were higher than their standard limits (20, 450 and 100 mg/kg, respectively). Also, the concentrations of Cd in the root, straw and grain (1.6, 1.1 and 1.3 mg/kg, respectively) of rice were higher than the standard limit (0.3 mg/kg), so it is more important for consumers, particularly local residents, to pay special attention to that. Transfer factors (TF) of Cu and Mn ions in different parts of rice plants showed that they were probably controlled by external factors such as atmospheric deposition in the region, because their mobilities were relatively low in the plants. The accumulation of Cu was the highest in the aerial part of rice plants in Chamgordan region which could be due to short distance of the region from the foundry smokestacks. Therefore, in addition to the effect of soil properties, human activities have a significant impact on the concentrations of the studied metals, which should be considered to achieve sustainable agriculture in the area.

Keywords: Heavy metal, Pollution, Rice, Transfer factor

مقدمه

سنگین به علت پایداری و غیرقابل تجزیه بودن در محیط حائز اهمیت می‌باشند (ژائو و همکاران ۲۰۰۹). فلزات

تهدید امنیت غذایی یکی از مهمترین نگرانی‌های جهان در عصر حاضر است. در میان آلاینده‌ها، فلزات

منطقه مورد مطالعه آنها بر اثر فعالیت‌های صنعتی و به تبع آن برنج کشت شده در این خاک‌ها نیز به‌وسیله کادمیوم، مس، سرب و روی آلوده شدند، به‌طوری‌که غلظت این فلزات برای مصرف‌کننده‌ها به‌ویژه افراد کهنسال و بچه‌ها، بالاتر از حد استاندارد قرار گرفت. همچنین کاربرد طولانی مدت فاضلاب‌های خانگی به علت تاثیر فلزات سنگین، مورد توجه پژوهشگران می‌باشد (موکوتی و همکاران ۲۰۰۶). چانگ و همکاران (۲۰۱۱) افزایش میزان سرب، کادمیوم، مس و روی در خاک و برنج را ناشی از کاربرد فاضلاب‌های خانگی در خاک و در نتیجه تجمع این فلزات را در برنج بدست آوردند. فراتر رفتن غلظت فلزات سنگین در خاک‌های استان مازندران (شمال ایران) از حد مجاز و نیز در برنج رقم طارم که با آب آلوده آبیاری شده بود توسط شکرزاده و همکاران (۱۳۹۱) گزارش شده است. همچنین کفیل زاده و همکاران (۱۳۸۵) تجمع کادمیوم، مس، آهن و نیکل در برخی محصولات کشاورزی را به علت ورود آب‌هایی که پذیرنده انواع فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی بود، عنوان نمودند.

فرآیند انتقال فلزات سنگین از خاک به گیاهان در شرایط خاک‌های آلوده، به‌دلیل خطرآفرینی برای انسان، بسیار حائز اهمیت است. همچنین فلزات سنگین بعد از ورود به داخل گیاه، از طریق تاثیر بر فرایندهای بیوشیمیایی، تنفس و فتوسنتز، اثرات مضر روی رشد گیاه دارند (کالاوروزیوتیس و همکاران ۲۰۱۲). تحقیقات زیادی روی تخمین زیست‌فراهمی فلزات سنگین و پیش‌بینی جذب آنها توسط گیاهان انجام شده است (ژائو و همکاران ۲۰۰۹). علاوه بر آن مدل‌های ریاضی به منظور پیش‌بینی انتقال فلزات از خاک به گیاهان نیز توسعه پیدا کرده‌اند (هوگ و همکاران ۲۰۰۳). در میان تحولات اخیر، فاکتور انتقال به‌عنوان پارامتری کلیدی در نظر گرفته شده است که تأثیر مستقیم بر تجمع فلزات سنگین در گیاهان دارد (نان و همکاران ۲۰۱۰).

در دهه‌های اخیر با پیشرفت انقلاب صنعتی در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، شهرنشینی در اطراف قطب‌های صنعتی توسعه یافته است. از طرفی تخلیه زباله و فاضلاب‌های شهری به‌داخل رودخانه‌ها

سنگین به‌طور طبیعی از فرایندهایی مانند واکنش‌های شیمیایی و هواپدگی مواد واقع در پوسته زمین ناشی می‌شوند. در کنار این منابع طبیعی، فعالیت‌های انسانی شامل کاربرد مواد شیمیایی کشاورزی، کودهای حیوانی و شیمیایی، لجن فاضلاب و همچنین فعالیت‌های صنعتی از قبیل معادن و کارخانجات ذوب فلز نیز وجود دارد (لی و همکاران، ۲۰۰۹، وو و همکاران ۲۰۱۱). در این مورد بیشترین مقدار ورود آلاینده‌ها به خاک، به‌علت فعالیت‌های انسان است. ویژگی‌های خاک تحت تأثیر کاربری اراضی و نیز مجاورت با منابع آلاینده است. بیشتر مواد آلاینده مانند آفت‌کش‌ها و کودها به‌طور مستقیم وارد خاک می‌شوند ولی برخی مانند پسماند کارخانه‌های صنعتی توسط ته‌نشست‌های رودخانه‌ها و برخی توسط گرد و غبار به خاک اضافه می‌شوند (تونر ۲۰۰۹).

جذب فلزات سنگین به‌وسیله گیاهان و به‌ویژه محصولات کشاورزی از اراضی آلوده، یکی از مهم‌ترین راه‌های ورود این عناصر به زنجیره غذایی است (چنی ۱۹۹۰). بنابراین غلظت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی باید در سطوحی نگهداری شوند که حداقل زیان را به گیاهان وارد نموده و کمترین تهدید را برای زنجیره غذایی به همراه داشته باشند (اسمیت ۱۹۹۴). در میان محصولات کشاورزی، برنج (*Oryza sativa*) از جمله مواد غذایی پر مصرف است که به‌طور چشمگیری در کشورهای آسیایی استفاده می‌گردند. همچنین به‌دلیل قابلیت بیشتر در تجمع فلزات سنگین در مقایسه با سایر محصولات مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار گرفته است (پارک و همکاران ۲۰۱۱). به این ترتیب مصرف برنج آلوده می‌تواند تهدید جدی برای مصرف‌کنندگان این محصول به‌شمار آید.

پژوهش‌های پرشمار درباره آلودگی خاک‌ها و گیاهان به فلزات سنگین به‌ویژه از طریق آبیاری با فاضلاب‌های صنعتی، شهری و خانگی در مزارع انجام گرفته است. ژائو و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی دریافتند که رابطه‌ای معنی‌دار بین میزان فلزات سنگین خاک و میزان تجمع این فلزات در اندام‌های برنج وجود دارد. هانگ و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که خاک‌های

بختیاری قرار گرفته است. این منطقه دارای میانگین بارندگی ۱۵۷/۷ میلی‌متر در سال، میانگین دمای ۱۵/۷ درجه سلسیوس و اقلیم خشک بوده و جهت باد غالب، غربی و جنوب غربی است (بحرائی ۱۳۸۰). منطقه مورد مطالعه شامل زرین‌شهر، چمگردان، سده لنجان و ورنامخواست با وسعت ۱۵ کیلومتر مربع بود که مهم‌ترین محصول این منطقه برنج است. به‌منظور آگاهی از وضعیت فلزات سنگین در برنج منطقه لنجان، ۴۱ نمونه گیاه برنج در مرحله برداشت محصول به همراه خاک‌های اطراف آنها (جمعاً ۹۰ نمونه) جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک به‌صورت مرکب از همان کرت‌هایی که برنج کشت شده بود، برداشت گردید. به‌علاوه از منابع آبیاری شامل رودخانه زاینده‌رود و فاضلاب شهری قبل از ورود به کانال‌های آبرسانی (هر کدام ۳ نمونه)، نیز نمونه‌برداری به‌عمل آمد.

یک عادت دیرینه است و امکان آلوده شدن خاک‌ها را فراهم می‌آورد (ژائو و همکاران ۲۰۰۷). منطقه لنجان واقع در استان اصفهان به‌واسطه وجود زاینده‌رود، شرایط مناسبی برای کشاورزی از جمله کشت برنج دارد.

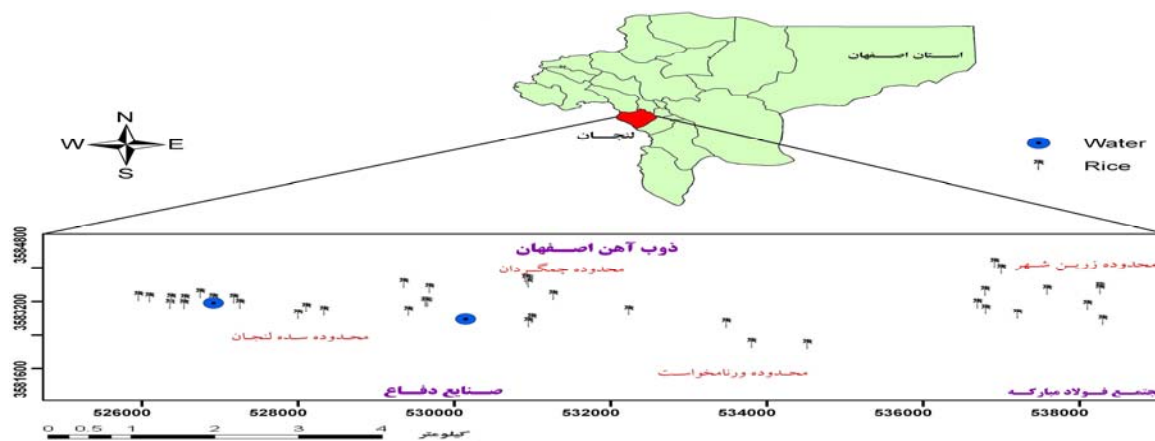
زمین‌های کشاورزی این منطقه به‌دلیل ورود فاضلاب‌های صنعتی، شهری و خانگی به منابع آبیاری دارای پتانسیل آلودگی می‌باشند. به همین منظور پژوهش حاضر با هدف بررسی و تعیین مقادیر فلزات سنگین در خاک، آب و اندام‌های مختلف برنج و همچنین ارزیابی نحوه انتقال این فلزات در سیستم خاک - برنج، در منطقه لنجان انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان لنجان در حد فاصل ناحیه نیمه خشک

استان اصفهان و نیمه مرطوب استان چهار محال



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری.

آمونیم اندازه‌گیری شد (اسمیت ۱۹۹۱، راول ۱۹۹۴). جهت اندازه‌گیری غلظت کل فلزات سنگین، نمونه‌های خاک توسط اسید نیتریک ۴ نرمال هضم شدند (اسپوزیتو و همکاران ۱۹۸۲) و برای تعیین غلظت فراهم، از عصاره‌گیر DTPA استفاده شد (لیندزی و نورول ۱۹۷۸). به‌منظور بررسی غلظت فلزات سنگین در گیاهان از روش هضم تر استفاده گردید (عبدالشافی و همکاران ۱۹۹۴). در این روش یک گرم از پودر گیاه توزین شد و ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک (۶۵ درصد) به

غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه برنج

نمونه‌های خاک هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های خاک مانند بافت خاک به روش هیدرومتری، pH خاک در عصاره ۱:۵ آب به خاک توسط دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۵ آب به خاک با دستگاه هدایت‌سنج در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی، ماده آلی به روش والکی- بلک و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از روش استات

هوایی به غلظت آن در ریشه می‌باشد (کوئی و همکاران ۲۰۰۵، کالاوروزیوتیس ۲۰۱۲).

نتایج و بحث

ویژگی‌های عمومی خاک‌های منطقه مطالعاتی در جدول ۱ ارائه شده است. pH خاک‌ها در منطقه کمی قلیائی با میانگین ۷/۶۸ و میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک ۲۰/۸۱ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم بدست آمد. کربنات کلسیم معادل نسبتاً زیاد با میانگین ۲۴/۸ درصد، بیانگر آهکی بودن خاک‌های منطقه می‌باشد. همچنین میزان تغییرات ماده آلی در خاک‌های منطقه زیاد بود (۳/۳۸ درصد) که به دلیل سلیقه‌ای بودن در استفاده از کودهای حیوانی توسط کشاورزان است. بیشترین میزان هدایت الکتریکی ۳/۲ دسی‌زیمنس بر متر در منطقه سده بدست آمد که احتمالاً بخاطر کاربرد افراطی کودهای شیمیایی است (پاتل و همکاران ۲۰۰۰).

آن اضافه گردید. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس در بن‌ماری قرار گرفت و ۲/۶ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن به آن افزوده شد. پس از سرد شدن، عصاره مورد نظر تهیه شد. در نهایت غلظت فلزات در عصاره‌ها توسط دستگاه اسپکترومتری جذب اتمی مدل واریان ۲۲۰ قرائت گردید. این تحقیق در قالب طرح کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار انجام شد و محاسبات آماری توسط نرم‌افزارهای SAS 9.1 و Excel انجام شد.

فاکتور تجمع و فاکتور انتقال

به‌منظور محاسبه روابط بین فلزات سنگین در خاک و گیاه از فاکتور تجمع استفاده شد. فاکتور تجمع از تقسیم کردن غلظت کل فلز در گیاه بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه بر غلظت کل فلز در خاک بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک خاک محاسبه شد (کوئی و همکاران ۲۰۰۵).

فاکتور انتقال نیز بیانگر نسبت غلظت فلز در اندام

جدول ۱- توصیف آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه.

متغیر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین
pH (۱:۵)	-	۷/۰۲۵	۸/۲۴	۷/۶۸
EC (۱:۵)	(dS/m)	۰/۱۵۲	۳/۲۷	۰/۴۹
CEC	(cmolc/kg)	۱۰/۱	۴۷/۶	۲۰/۸
کربنات کلسیم معادل	(%)	۱۷/۹	۳۶/۸	۲۴/۸
ماده آلی	(%)	۰/۷۶	۴/۱۴	۲/۴۹
رس	(%)	۱۶	۳۱	۲۳
سیلت	(%)	۱۶	۴۸	۳۴
شن	(%)	۲۷	۵۷	۴۳

غلظت فلزات سنگین در خاک منطقه مورد مطالعه

مقادیر غلظت کل و فراهم فلزات سنگین در خاک منطقه در جدول ۲ نشان داده شده است. بیشترین میزان کادمیوم کل (۲/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و فراهم (۰/۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در منطقه سده لنجان بود که کادمیوم کل بالاتر از حد مجاز (۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. با توجه به کاربری اراضی در سده لنجان شاید بتوان بالاتر بودن میزان کادمیوم را در این منطقه به سیستم کشت آن و تناوب محصولات منطقه ارتباط داد زیرا علاوه بر برنج، کشت سیب زمینی نیز در این منطقه رایج است که با مصرف بالای کودهای

حیوانی و شیمیایی همراه است. جزءبندی کادمیوم در شالیزارهای اصفهان نشان داد که بیشترین مقدار کادمیوم در جزء همراه با کربنات (با میانگین ۳۶/۱٪) می‌باشد. بیشتر بودن کادمیوم در جزء کربناتی می‌تواند خطر آلودگی آنرا افزایش دهد زیرا فرامی بیشتری نسبت به اجزاء دیگر دارد. این جزء بعد از جزء تبدالی می‌تواند وارد فاز محلول شده و در دسترس گیاه قرار گیرد (جلالی و همتی ۲۰۱۳). مس کل در منطقه سده لنجان (۳۱/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مس فراهم در منطقه ورنامخواست (۷/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشترین مقدار را داشتند. منطقه زرین‌شهر بیشترین

در منطقه زرین‌شهر بود (جدول ۲) که از دلایل احتمالی آن می‌توان به ورود انواع فاضلاب‌های صنعتی و شهری به این منطقه اشاره کرد.

میزان آهن کل و منطقه سده لنجان بیشترین میزان آهن فراهم را داشتند (به ترتیب ۸۳۹۴/۴ و ۱۳۵/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم). همچنین بالاترین غلظت منگنز کل و فراهم نیز

جدول ۲- غلظت کل و فراهم فلزات سنگین (mg/kg) اندازه‌گیری شده در خاک به تفکیک منطقه.

عنصر	زرین‌شهر (n=19)	سده لنجان (n=47)	ورنامخواست (n=10)	چمگردان (n=14)	حدود مجاز
کادمیوم کل	۱/۳۲۵	۲/۳۶۳	۰/۶۲۸	۱/۰۵۱	۰/۸ ^d
کادمیم فراهم	۰/۰۶۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۶	۰/۰۶۴	-
مس کل	۳۰/۳۹	۳۱/۱۳	۲۶/۸۵	۲۶/۵۵	-
مس فراهم	۷/۲۱	۷/۸۷	۷/۹۳	۷/۰۴۸	۱ ^a
آهن کل	۸۳۹۴/۴۷	۷۷۳۷/۵۳	۷۹۷۱/۷۵	۶۳۷۳/۰۴	-
آهن فراهم	۱۲۹/۰۶	۱۳۵/۷۸	۱۲۹/۳۸	۱۲۱/۹۵	۱۰ ^a
منگنز کل	۵۳۲/۰۷	۴۷۱/۱۱	۴۶۱/۹	۴۳۶/۸۹	-
منگنز فراهم	۱۷/۲	۱۳/۱۳	۱۱/۵۰۵	۱۲/۸۴	۵ ^a

a: دوبرمن و فیرهارست (۲۰۰۰) b: امینی و همکاران (۲۰۰۵)

جدول ۳- ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های آب در منطقه مورد مطالعه و حدود استاندارد (mg/L).

رودخانه	EC (dS/m)	pH	کادمیوم	مس	آهن	منگنز
رودخانه	۰/۲۷۶	۸/۳	۰/۰۰۵	۰/۰۴۹	*	۰/۰۹۹
فاضلاب شهری	۰/۸۲۰	۷/۳	۰/۰۰۲	۰/۰۵۳	*	۰/۱۲۰
حد استاندارد ^a	-	-	۰/۰۲	۰/۲	۵	۰/۲
حد استاندارد ^b	-	-	۰/۰۱	۰/۱	۱	-

*: غیر قابل تشخیص توسط دستگاه جذب اتمی a: آیرز و وستکات (۱۹۸۵) b: مونت‌گومری و همکاران (۱۹۸۵)

غلظت فلزات سنگین در آب آبیاری منطقه مطالعاتی

برخی ویژگی‌های شیمیایی و غلظت فلزات سنگین به همراه حدود استاندارد هر کدام در آب آبیاری منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است. غلظت کادمیوم در آب رودخانه و فاضلاب شهری، برای مصارف آبیاری زیر حد استاندارد بود و غلظت آن در آب رودخانه به حد بحرانی نزدیکتر بود (جدول ۲). همچنین میزان مس و منگنز نیز زیر حد استاندارد آلودگی بودند و غلظت آنها در فاضلاب شهری بیشتر از آب رودخانه بدست آمد. البته باید توجه داشت که استفاده مستمر، می‌تواند باعث تجمع این فلزات در خاک گردد. شکرزاده و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی غلظت فلزات سنگین در آب آبیاری شالیزارهای استان مازندران عنوان کردند که اگرچه غلظت فلزات در نمونه‌های آب آبیاری پایین‌تر از حد استاندارد بود ولی به‌مرور می‌تواند موجب تجمع فلزات در خاک و برنج گردد. میزان آهن نیز در هر دو نمونه توسط دستگاه جذب اتمی غیرقابل تشخیص بود.

غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف برنج کشت شده در منطقه مورد مطالعه کادمیوم

جدول ۴ غلظت فلزات مورد بررسی را به تفکیک منطقه در اندام‌های مختلف گیاه برنج نشان می‌دهد. با توجه به اینکه بیشترین میزان کادمیوم کل و فراهم در منطقه سده لنجان بود (جدول ۲)، میزان این عنصر در ریشه برنج کشت شده در این منطقه اندکی متفاوت با سایر مناطق بود، هر چند از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۴). محققان بیان نموده‌اند که هر چه آلودگی خاک نسبت به فلزات سنگین بیشتر باشد، احتمال انباشتگی بیشتری از عناصر یاد شده در گیاه وجود خواهد داشت (دستجردی و همکاران ۱۳۸۶). در مطالعه حاضر، غلظت کادمیوم موجود در خاک با غلظت کادمیوم موجود در ریشه برنج همبستگی مثبت و معنی‌داری را نشان داد (جدول ۵). هانگ و همکاران (۲۰۰۹)، ژائو و همکاران (۲۰۰۹) و سینگ و همکاران (۲۰۱۰) نیز همبستگی مثبتی بین غلظت کادمیوم در خاک و غلظت

در مقایسه با استاندارد بی‌نام (۱۹۸۴) و آلویی (۱۹۶۸) به ترتیب ۳/۵ و ۴/۲ برابر بیشتر از حد مجاز بود (جدول ۴) که توجه ویژه‌ای از لحاظ مصرف بخش خوراکی برنج برای انسان و دام را می‌طلبد.

آن در برنج بدست آوردند. مقدار مجاز کادمیوم در برنج در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین برخی محققان حد آن را ۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم ذکر کرده‌اند (فکورجنتی و همکاران ۲۰۱۱). بر این اساس، میزان کادمیوم به‌طور میانگین در ساقه و دانه برنج در منطقه

جدول ۴- میانگین غلظت فلزات سنگین در قسمت‌های مختلف برنج (mg/kg dw) در منطقه مورد مطالعه.

منطقه	اندام گیاه	کادمیوم	مس	آهن	منگنز
زرین‌شهر (n= ۱۱)	ریشه	۱/۵۸±۰/۰۴ ^a	۳۵±۵/۸ ^a	۱۲۷۱۷±۸۰۴ ^a	۱۱۲/۵±۷/۴ ^a
	ساقه	۰/۹۲±۰/۰۵ ^a	۴/۴±۱/۱ ^a	۳۸۸±۴۶/۳ ^a	۷۴/۶۵±۱۱/۸ ^a
	دانه	۱/۲۷±۰/۰۵ ^a	۲/۴±۰/۳۷ ^b	۱۳۴±۹/۱ ^a	۳۹/۵۸±۴/۲ ^a
سده لنجان (n= ۲۱)	ریشه	۱/۶±۰/۰۵ ^a	۱۹/۸±۱/۲ ^a	۱۲۶۱۷±۱۰۸۵ ^a	۱۱۲/۰۵±۷/۶ ^a
	ساقه	۱/۲±۰/۲۳ ^a	۳/۴۲±۰/۳۲ ^{ab}	۳۴۴±۲۳/۷ ^a	۵۴/۰۴±۴ ^a
	دانه	۱/۲۸±۰/۰۵ ^a	۲/۳۳±۰/۴۷ ^b	۱۳۴±۹/۶ ^a	۳۵/۷۳±۱/۷ ^a
چمگردان (n= ۵)	ریشه	۱/۴۱±۰/۱۲ ^a	۱۵/۳±۱/۹۷ ^a	۱۳۲۰۵±۳۲۲۶ ^a	۹۴/۴۱±۲۴ ^a
	ساقه	۰/۹۲±۰/۰۵ ^a	۲/۵±۰/۳۵ ^b	۳۹۲/۳±۴۱/۵ ^a	۷۲/۵±۵/۱ ^a
	دانه	۱/۳۲±۰/۰۲ ^a	۲۹/۸±۲۵/۵ ^a	۱۴۵/۱±۱۰/۷ ^a	۳۹/۱±۳/۵ ^a
ورنامخواست (n= ۴)	ریشه	۱/۵۶±۰/۱۱ ^a	۲۰/۸±۸/۴ ^a	۱۲۵۴۳±۲۰۰۷ ^a	۱۰۱/۵۳±۱۴/۹ ^a
	ساقه	۱/۰۵±۰/۱۵ ^a	۴/۳۰±۰/۵۱ ^{ab}	۳۳۲±۸۷ ^a	۷۱/۲±۱۷ ^a
	دانه	۱/۱۸±۰/۰۳ ^a	۲/۳۸±۰/۴۱ ^b	۱۱۷±۱۸/۷ ^a	۳۷/۲±۳/۲ ^a
میانگین نمونه‌ها در کل منطقه (n= ۴۱)	ریشه	۱/۵۷±۰/۰۳۷	۲۳/۴۱±۱/۹۲	۱۲۷۰۸±۷۱۴	۱۰۸/۹۹±۵/۳
	ساقه	۱/۰۷±۰/۱۲	۳/۶۵±۰/۳۷	۳۶۱±۱۹/۵	۶۳/۴۹±۴/۴
	دانه	۱/۲۷±۰/۰۲	۷/۷۱±۳/۱۱	۱۳۴±۵/۹	۳۷/۳۱±۱/۵
حدود مجاز فلزات سنگین در برنج	ریشه	۰/۳ [*]	۲۰ [*]	۴۵۰ [*]	۱۰۰ ^{**}
	ساقه	۰/۳ [*]	۱۲ ^{***}	۱۰۰ ^{***}	۷۰ ^{***}
	دانه	۰/۳ ^{**}	۵ ^{***}	۴۰ ^{***}	۳۰ ^{***}

حروف مشابه برای هر عنصر در هر یک از اندام‌های برنج در مناطق مختلف، نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن است. * بی‌نام (۱۹۸۴) ؛ ** آلویی (۱۹۶۸) ؛ *** دو برمن و فیرهارست (۲۰۰۰).

کادمیوم در آب این چاه‌ها به میزان ۰/۰۴-۰/۱۵ میلی‌گرم بر لیتر بوده که حدود ۱/۵ تا ۴ برابر بیشتر از حد استاندارد آن در آب‌ها (۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد (کفیل زاده و همکاران ۱۳۸۵). وی علت آن را به لاگون‌های ذوب‌آهن و انتقال فاضلاب‌های آلوده از طرف صنایع دفاع به این منطقه عنوان کرده است. بنابراین ورود این آب‌ها به کانال‌های آبیاری مزارع می‌تواند به‌صورت تدریجی منجر به تجمع کادمیوم در خاک گردد. تحقیقات نشان داده است که برنج کشت شده در خاکی با غلظت ۰/۴ تا ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، باعث تولید محصولی با غلظت کادمیوم معادل ۰/۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک محصول

همچنین جدول ۴ نشان می‌دهد که در تمام منطقه مورد مطالعه میزان تجمع کادمیوم در دانه برنج بیشتر از ساقه بود. این نتیجه همسو با نتایج تحقیقاتی است که کادمیوم را فلزی با تحرک بالا و قابلیت جذب راحت در گیاه معرفی کرده‌اند، که می‌تواند به‌راحتی از طریق ریشه جذب و وارد بافت گیاه شده و به اندام‌های فوقانی گیاهان منتقل شود (کاباتا پندیاس و پندیاس ۲۰۰۰). بعد از سده لنجان، منطقه زرین‌شهر بالاترین میزان کادمیوم کل را داشت که می‌تواند به استفاده از آب آلوده و در نتیجه تجمع این فلز در خاک این منطقه نسبت داده شود (جدول ۲). پورمقدس (۲۰۰۳) در بررسی غلظت فلزات در آب چاه‌های منطقه زرین‌شهر نتیجه گرفت که غلظت

به‌طوری که نسبت به میزان آن در ریشه و ساقه افزایش قابل توجهی را نشان داد. خاک منطقه چمگردان کمترین میزان مس کل و فراهم را در بین مناطق مورد مطالعه داشت (جدول ۲)، بنابراین به‌نظر می‌رسد عوامل دیگری مانند فرونشست جوی ناشی از دودکش‌های کارخانه مجاور در غلظت آن تأثیرگذار بوده است، زیرا این منطقه بیشترین نزدیکی را با کارخانه ذوب‌آهن دارد (شکل ۱). بعد از چمگردان، منطقه زرین‌شهر بیشترین تجمع مس را در دانه برنج نشان داد (۲/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) که فاضلاب‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی (صنعتی و شهری) را می‌توان در غلظت آن مؤثر دانست. مطالعات ابراهیمی و همکاران (۱۳۸۹) نشان داد که میزان مس وارد شده به کانال‌های آبیاری زرین‌شهر به میزان ۰/۰۹ میلی‌گرم بر لیتر بوده که نزدیک به مرز آلودگی برای آبیاری (۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد. این فاضلاب‌های صنعتی با توجه به شیب زمین، از طرف صنایع دفاع وارد زرین‌شهر می‌گردند. بنابراین، غلظت مس بیشتر گیاهان در این منطقه می‌تواند به موارد مذکور نسبت داده شود. شایان ذکر است که مقدار مس موجود در ریشه گیاهان زرین‌شهر فراتر از حد مجاز است و با توجه به اینکه استمرار استفاده از این آب‌ها می‌تواند در آینده خطر آلودگی را برای برنج کشت شده در این منطقه به همراه داشته باشد، بنابراین نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است. محققان افزایش تجمع مس در اندام‌های هوایی برنج را ناشی از آبیاری کردن آن با آب رودخانه‌ای که متأثر از فاضلاب شهری و صنعتی بود گزارش کرده‌اند (مرادمند و بیگی هرچگانی، ۱۳۸۸). کفیل زاده و همکاران (۱۳۸۵) در بررسی غلظت فلزات سنگین در محصولات کشاورزی مجاور رودخانه خشک شیراز که پذیرنده انواع فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی بود، نتیجه گرفتند که میزان مس در کلیه گیاهان به‌صورت معنی‌داری از حداکثر مجاز بیشتر است و فاضلاب‌های مذکور را منشأ اصلی این فلزات عنوان نمودند. کائو و یو (۲۰۰۰) نیز در بررسی تأثیر فاضلاب در غلظت مس در قسمت‌های مختلف برنج مشاهده نمودند که غلظت مس با کاربرد فاضلاب به میزان چشمگیری افزایش یافته است. تیواری و

می‌گردد و استفاده از آبی با غلظت کادمیوم معادل ۵ میلی‌گرم بر لیتر برای آبیاری برنج باعث تولید محصولی با غلظت کادمیوم معادل ۱/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک محصول گردیده است (زازولی و همکاران ۲۰۰۶). در چین که آبیاری با پساب دارای سابقه طولانی می‌باشد، آلودگی جدی شالیزارها به کادمیوم مشاهده شده است (لی و همکاران ۲۰۰۹). در یک بررسی در خاک‌های شدیداً آلوده در منطقه ژانگشی^۱ چین، غلظت کادمیوم به ۵-۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و مقدار آن در برنج برداشت شده به ۱-۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید (وو و همکاران ۱۹۸۹).

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین غلظت کل فلزات در خاک و اندام‌های مختلف برنج.

	کادمیوم	مس	آهن	منگنز
ریشه	۰/۳۲۲*	۰/۰۹	-۰/۰۱۹	۰/۲۱۴
ساقه	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۰۳	-۰/۰۷
دانه	۰/۰۳	۰/۱۷۶	۰/۰۰۵	۰/۰۸

*: رابطه معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

مس

مقدار مس در ریشه برنج در منطقه زرین‌شهر (۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ورنامخواست (۲۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، بالاتر از حد استاندارد، در منطقه سده نزدیک به مرز آلودگی (۱۹/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در منطقه چمگردان در محدوده مجاز (۱۵/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بدست آمد (جدول ۴). به‌علاوه مقدار مس در ساقه‌های برنج منطقه زرین‌شهر بیشترین مقدار (۴/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در منطقه چمگردان کمترین مقدار (۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را به خود اختصاص داد که از لحاظ آماری نیز تفاوت‌ها معنی‌دار بودند (جدول ۴) و در محدوده مجاز ارائه شده توسط دوبرمن و فیرهارست (۲۰۰۰) قرار داشتند. نکته قابل توجه اینکه، میزان مس موجود در دانه‌های برنج کشت شده در منطقه چمگردان (۲۹/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از دیگر مناطق به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (جدول ۴)،

¹ Zhangshi

نقش شرایط احیایی حاکم بر مزارع شالیزاری را در افزایش زیست‌فراهمی آهن بایستی مد نظر داشت.

بعد از چمگردان، منطقه زرین‌شهر بیشترین تجمع آهن را داشت، این منطقه در معرض فاضلاب‌های ذوب آهن، صنایع دفاع، فاضلاب‌های شهری خود و همچنین چمگردان قرار دارد. پورمقدس (۲۰۰۳) میانگین سالانه غلظت فلزات را در کل منطقه لنجان‌ات مطالعه نمود. در این تحقیق میانگین چهار فصل غلظت فلزات در آب در برخی چاه‌های زرین‌شهر برای آهن ۱/۹ میلی-گرم بر لیتر بدست آمد که ۱/۹ برابر حد مجاز ارائه شده (مونت گومری ۱۹۸۵) بود.

منگنز

حداکثر غلظت منگنز در ریشه‌های برنج در منطقه زرین‌شهر (۱۱۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بدست آمد (جدول ۴). زیرا بیشترین غلظت منگنز کل و فراهم نیز در این منطقه بود که احتمالاً بیشتر در دسترس گیاه قرار گرفته است. منطقه چمگردان میزان منگنز کل و فراهم کمتری را نسبت به بقیه مناطق داشت ولی نکته قابل توجه آن است که مقدار منگنز در ساقه و دانه (به ترتیب ۷۲/۵ و ۳۹/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) برنج کشت شده در آن بعد از زرین‌شهر بیشترین بود که از دلایل احتمالی آن می‌توان فرونشست جوی در منطقه را ذکر کرد زیرا این منطقه بیشترین نزدیکی را با دودکش‌های ذوب‌آهن دارد. هودجی و جلالیان (۱۳۸۳ب) حداکثر غلظت منگنز را در اندام هوایی برنج در اطراف مجتمع فولاد مبارکه ۷۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بدست آوردند. در مطالعه حاضر، غلظت منگنز در ساقه برنج در مناطق زرین‌شهر، چمگردان و ورنامخواست بالاتر از حد استاندارد بود و غلظت آن نیز در دانه برنج در تمام مناطق بالاتر از حد استاندارد ارائه شده توسط دوبرمن و فیرهارست (۲۰۰۰) برای برنج (۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) بدست آمد.

فاکتور انتقال و تجمع فلزات

گیاهان برای جذب فلزات در بافت‌هایشان متفاوت عمل می‌کنند (داتا و همکاران ۲۰۰۰) و راندمان گیاهان مختلف در جذب فلزات، توسط میزان تجمع فلزات در گیاه و یا توسط فاکتور تجمع فلزات از خاک به گیاه

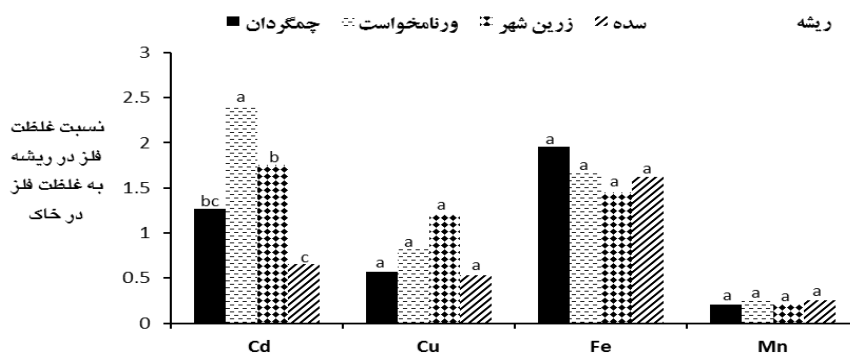
همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی نتیجه گرفتند که استفاده از پساب صنعتی به منظور آبیاری اراضی، غلظت‌های آهن، منگنز، کادمیوم و مس در خاک را نسبت به خاک‌هایی که از آب چاه برای آبیاری استفاده شده بود، به میزانی بالاتر از حد استاندارد، افزایش داده است.

آهن

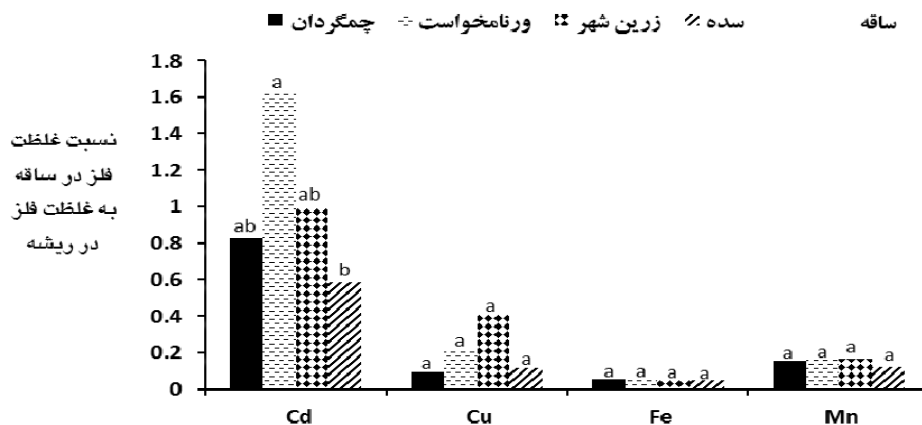
با توجه به جدول ۴، غلظت آهن بدست آمده در ساقه و دانه برنج در تمام مناطق بیشتر از حد مجاز ارائه شده توسط دوبرمن و فیرهارست (۲۰۰۰) بود. در این مورد، برنج کشت شده در منطقه چمگردان بیشترین میزان آهن را در ساقه و دانه (به ترتیب ۳۹۲/۳ و ۱۴۵/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در بین مناطق مطالعاتی دارا بود. این افزایش می‌تواند به دلیل فرونشست ذرات حاوی عنصر آهن ناشی از کارخانه ذوب آهن باشد، زیرا چمگردان بیشترین نزدیکی را با دودکش‌های این کارخانه دارد. خاک و گیاهان رشد یافته در مجاورت مناطق صنعتی به خوبی قادرند غلظت تشدید شونده فلزات سنگین را نشان دهند. همچنین محققان دریافته‌اند که جذب فلزات سنگین در گیاهان می‌تواند از طریق اندام‌های هوایی (شاخه، برگ و ساقه) نیز صورت گیرد (رحمانی ۱۳۸۷). هودجی و جلالیان (۱۳۸۳a) آلودگی خاک و گیاه با آهن، روی و منگنز را در منطقه استقرار مجتمع فولاد مبارکه بررسی نمودند. آنان حداکثر غلظت آهن در اندام هوایی برنج در اطراف مجتمع فولاد را ۲۲۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاهی بدست آوردند. رحمانی (۱۳۸۷) نیز در بررسی اراضی تحت کشت مو ذکر کرد که غلظت آهن در نمونه‌های گیاه مورد بررسی به علت فرونشست ذرات مواد جامد حاوی عنصر آهن از هوا بر سطح اندام هوایی گیاه به دلیل نزدیکی به منبع آلاینده (صنعت ذوب آهن) می‌باشد. بنابراین غلظت فلزات سنگین به‌ویژه در اندام‌های هوایی گیاهان در یک منطقه آلوده می‌تواند پدیده‌هایی مانند فرونشست جوی ناشی از کارخانه‌های موجود در یک منطقه را نشان دهد. البته با توجه به اینکه میزان آهن فراهم بدست آمده در منطقه مطالعاتی بسیار بالاتر از حد بحرانی ارائه شده توسط لیندزی و نورول (۱۹۷۸) می‌باشد (۴/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم)،

به‌طور کلی میزان انتقال فلزات از خاک به ریشه بیشتر از انتقال آنها در قسمت‌های هوایی بدست آمد. میزان فاکتور انتقال برای کادمیوم در هر سه قسمت ریشه، ساقه و دانه بالا بود (شکل‌های ۲ تا ۴). این نشان می‌دهد که کادمیوم قابلیت تحرک بالایی را در برنج دارد. تحقیقات نشان داده است که کادمیوم پس از جذب، در گیاه متحرک بوده و براحتی به اندام‌های هوایی می‌رسد. انتقال سریع کادمیوم از ریشه به اندام هوایی و به‌ویژه برگ‌ها در گیاهان مختلف به وضوح دیده شده است. تجمع فلزات در اندام هوایی گیاهان به غلظت آن‌ها در محیط ریشه گیاهان بستگی دارد (کاباتا پندیاس و پندیاس ۲۰۰۰). بسیاری از مطالعات نیز نشان داده‌اند که کادمیوم پس از انباشت در اندام‌های هوایی دوباره به ریشه برمی‌گردد (گاداپتی و مکفی ۲۰۰۶).

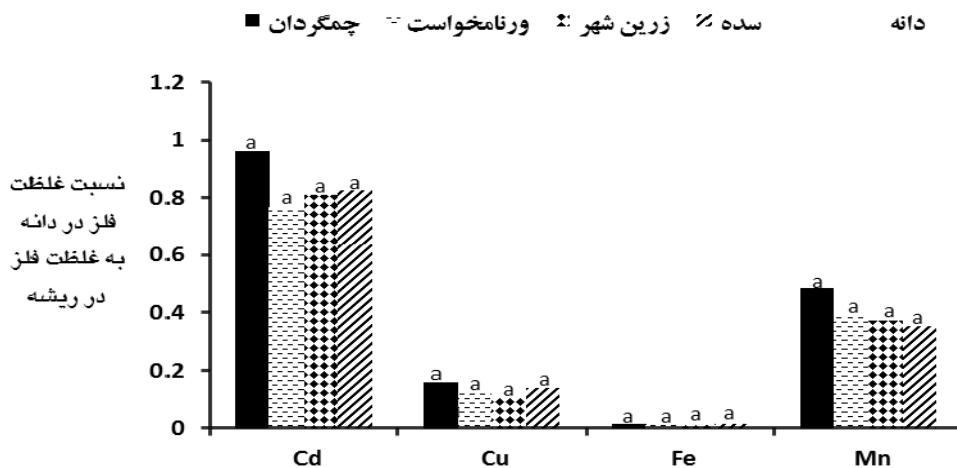
تشخیص داده می‌شود. در جایی‌که گیاهان مختلف روی خاک‌هایی رشد یافته باشند که مقادیر یکنواخت و کنترل شده‌ای از فلزات را دارا باشند، میزان تجمع فلزات، توسط گیاهان می‌تواند شاخص خوبی از راندمان جذب آنها را نشان دهد، در حالیکه وقتی گیاهان روی خاک‌هایی رشد یافته باشند که مقادیر متغیری از فلزات را دارا باشند (مانند مزارع کشاورزی)، فاکتور تجمع فلزات، بهترین راندمان گیاهان را نشان می‌دهد. به‌طور کلی فاکتور تجمع از خاک به گیاه بر اساس مقدار کل فلز در خاک محاسبه می‌شود (هودا و همکاران ۱۹۹۷). در مطالعه حاضر، فاکتور تجمع مس در قسمت‌های مختلف برنج تقریباً مشابه بود (شکل‌های ۲، ۳ و ۴) بدین معنی که مس موجود در خاک، در ساقه و دانه‌های برنج تجمع یافته است که این نتایج با مطالعات کائو و یو (۲۰۰۰) مطابقت دارد.



شکل ۲- فاکتور تجمع فلزات در ریشه برنج.



شکل ۳- فاکتور انتقال فلزات از ریشه به ساقه برنج.



شکل ۴- فاکتور انتقال فلزات از ریشه به دانه برنج.

اگرچه میزان کادمیوم در ساقه و دانه برنج کشت شده در تمام مناطق، بسیار بالاتر از حد استاندارد بود. ورود فاضلاب‌های صنعتی مانند فاضلاب‌های نوب‌آهن و صنایع دفاع در منطقه زرین‌شهر، باعث شده تا غلظت اکثر فلزات مورد بررسی در خاک و ریشه برنج این منطقه بالاتر از دیگر مناطق باشد.

مقدار مس در ساقه برنج منطقه چمگردان کمترین بود، اما در دانه‌های برنج بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده بود. این امر نشان می‌دهد که مس در منطقه چمگردان تحت تاثیر فرونشست جوی ناشی از دودکش‌های کارخانه مجاور خود می‌باشد؛ زیرا این منطقه بیشترین نزدیکی را با کارخانه نوب‌آهن دارد. غلظت آهن بدست آمده در ساقه و دانه برنج در تمام مناطق بیشتر از حد مجاز ارائه شده توسط دو برمن و فیهارست (۲۰۰۰) بود. در این خصوص، برنج کشت شده در منطقه چمگردان بیشترین میزان آهن را در ساقه و دانه (به ترتیب ۳۹۲/۲۹ و ۱۴۵/۰۷ میلی گرم بر کیلوگرم) در بین مناطق دارا بود که این افزایش می‌تواند بدلیل فرونشست ذرات حاوی عنصر آهن ناشی از کارخانه نوب آهن باشد.

ترتیب فاکتور انتقال فلزات از خاک به ریشه‌های برنج به صورت کادمیوم < آهن > مس < منگنز > از ریشه به ساقه برنج به ترتیب کادمیوم < مس > منگنز < آهن > و از ساقه به دانه برنج به ترتیب کادمیوم < منگنز > مس <

به علت شرایط غرقابی و غالب شدن فرم احیایی آهن، میزان انتقال آن از خاک به ریشه برنج بالا بود ولی پس از جذب توسط ریشه به میزان خیلی کم به ساقه و دانه انتقال یافته است (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). میزان انتقال منگنز از خاک به ریشه کمتر از آهن بود (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). پژوهش‌ها نشان داده است که افزایش غلظت آهن اختلالاتی را در جذب منگنز ایجاد نموده است (پیز و جونز ۱۹۹۷). با این حال، میزان انتقال منگنز از ریشه به ساقه و دانه برنج افزایش چشمگیری را نشان داد. با توجه به ماهیت غیرپویای منگنز در گیاه، به نظر می‌رسد منگنز از طریق رخداده فرونشست جوی در منطقه جذب ساقه و دانه شده باشد. این پدیده در منطقه چمگردان مشهودتر است، زیرا چمگردان بیشترین نزدیکی را با دودکش‌های کارخانه نوب آهن دارد. میزان منگنز در ساقه و دانه‌های برنج منطقه چمگردان بیشتر از مناطق دیگر بود که برای ساقه، این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار بود.

نتیجه‌گیری کلی

بیشترین میزان کادمیوم کل و فراهم خاک در منطقه سده لنجان بدست آمد که احتمالاً بدلیل استفاده بیش از حد و غیر اصولی از کودهای شیمیایی می‌باشد. همین‌طور میزان کادمیوم در اندام‌های مختلف برنج در این منطقه بالاترین سطح را به خود اختصاص داد.

مورد منگنز مستثنی بود، بنحوی که میزان انتقال آن در دانه بیشتر از ریشه و ساقه بود که علت احتمالی آن را می‌توان فرونشست جوی در منطقه در اثر دود حاوی فلزات سنگین ناشی از کارخانه‌های مجاور ذکر نمود. بنابراین با توجه به اینکه غالباً برنج تولیدی در مناطق مورد مطالعه توسط ساکنین محلی و نیز دام‌های آنها مصرف می‌شود نیازمند توجه است.

آهن، در میان فلزات سنگین مطالعه شده، کادمیوم در خاک‌های شالیزاری بیشترین زیست‌فراهمی را برای جذب توسط برنج دارا بود، به طوری که بیشترین میزان فاکتور انتقال برای این عنصر بدست آمد که با نتایج دیگر مطالعات، که کادمیوم را فلزی با قابلیت تحرک بالا معرفی نموده‌اند، مطابقت دارد (کاباتا پندیاس و پندیاس ۲۰۰۰). به طور کلی میزان انتقال فلزات از خاک به ریشه برنج بالاتر از انتقال آنها از ریشه به ساقه، و از ریشه به ساقه بالاتر از ساقه به دانه بدست آمد. این روند در

منابع مورد استفاده

- ابراهیمی ا، امین م، هاشمی ح، فولادی فرد ر و وحید دستجردی م، ۱۳۸۹. بررسی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی منطقه سجاد شهرستان زرین‌شهر. مجله تحقیقات نظام سلامت، جلد ۶، صفحه‌های ۹۱۸ تا ۹۲۶.
- بحرائی م، ۱۳۸۰. مطالعه سینپتیکی بارندگی در اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشکده شهید بهشتی.
- دستجردی ف، تدین نژاد م و شیرانی ک، ۱۳۸۶. گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به عنصر روی در منطقه ایرانکوه توسط گونه‌های مرتعی. مجله علوم آب و خاک، جلد ۲۱، شماره ۲، صفحه‌های ۲۳۵ تا ۲۴۵.
- رحمانی ح، ۱۳۸۷. کیفیت پساب صنعتی شرکت ذوب‌آهن اصفهان و اثرات آن بر اراضی تحت کشت مو. مجله علوم محیطی. جلد ۵، شماره ۴، صفحه‌های ۱۳۵ تا ۱۴۴.
- شکرزاده م، رکنی م ع و گالستین، ۱۳۹۱. بررسی میزان فلزات سنگین (کروم- کادمیوم- سرب) در آب آبیاری و برنج رقم طارم تولیدی مزارع شهرهای مرکزی استان مازندران. مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، جلد ۲۲، شماره ۹۸، صفحه‌های ۲۳۴ تا ۲۴۲.
- کفیل‌زاده ف، کارگر م و کدیور ا، ۱۳۸۵. بررسی غلظت کادمیم، روی، مس، آهن و نیکل در رودخانه خشک شیراز و برخی محصولات کشاورزی مجاور. علوم و تکنولوژی محیط زیست، جلد ۸، شماره ۴، صفحه‌های ۶۷ تا ۷۵.
- مرادمند م، بیگی هرچگانی ح و محمدخانی ع، ۱۳۸۸. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بر توزیع سرب و نیکل در اندام لفل سبز و خاک. مجله پژوهش آب ایران، جلد ۳، شماره ۵، صفحه‌های ۶۳ تا ۷۰.
- هودجی م و جلالیان ا، ۱۳۸۳a. پراکنش آهن، روی و سرب در خاک و محصولات کشاورزی در منطقه استقرار مجتمع فولاد مبارکه. مجله محیط‌شناسی، جلد ۳۶، شماره ۳۰، صفحه‌های ۱۵ تا ۲۶.
- هودجی م و جلالیان ا، ۱۳۸۳b. پراکنش نیکل، منگنز و کادمیوم در خاک و محصولات کشاورزی در منطقه استقرار مجتمع فولاد مبارکه. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۸، شماره ۳، صفحه‌های ۵۵ تا ۶۶.

Abdel-Shafey HI, Hegemann W and Teiner A, 1994. Digestion with concentrated HNO₃ and H₂O₂. Environ Manage Health 5: 21-24

Alloway WH, 1968. Environmental cycling of trace elements. Advanced Agron 20: 255-265.

Amini M, Afyuni M, Khademi H, Abbaspour KC and Schulin R, 2005. Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of central Iran. Science of the Total Environ 347: 64-77.

Anonymous, 1984. Contaminants: Joint FAO/WHO food standards program. Codex Alimentarius, World Health Organization, Rome Italy 1: 1-33.

Ayers RS and Westcott DW, 1985. Water Quality for Agriculture. Irrigation and Drainage Paper 29, FAO MSc Rome Italy.

Cao ZH and Hu ZY, 2000. Copper contamination in paddy soils irrigated with wastewater. Chemosphere 41: 3-6.

- Chaney RL, 1990. Public health and sludge utilization part 2. *Biocycle* 31:68-73.20.
- Chung BY, Song CH, Park BJ and Cho JY, 2011. Heavy metals in brown rice (*Oryza sativa* L.) and soil after long-term irrigation of wastewater discharged from domestic sewage Treatment Plants *Pedo* 21(5): 621–627.
- Cui Y, Zhu YG, Zhai R, Huang Y, Qiu Y and Liang J, 2005. Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, china. *Environ Inter* 31: 784-790.
- Datta SP, Biswas DR, Saharan N, Ghosh SK and Rattan RK, 2000. Effect of long-term application of sewage effluents on organic carbon, bioavailable phosphorus, potassium and heavy metals status of soils and uptake of heavy metals by crops. *J Indian Soc Soil Sci* 48: 836–839.
- Doberman A and Fairhurst TH, 2000. Rice nutrient disorders and nutrient management. International Rice Research Institute, Manila *Environmen Pollut* 157: 2542–2549.
- Facoor Janati SS, Beheshti HR, Feizy J and Khoshbakht Fahim N, 2011. Determinations of Cadmium, Lead, Arsenic and Mercury in Rice from Iran. *Int J Ind Chem* 2(4): 196-200.
- Gadapati WR and Macfie SM, 2006. Phytochelatinareonly partially correlated with Cd-stress in two species of *Brassica* *Plant Sci* 170: 471–480.
- Hang X, Wang H, Zhou J, Ma CH, DU CH and Chen X, 2009. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryza sativa*) in a typical area of the Yangtze River Delta. *Environ Pollu* 157: 2542–2549.
- Hooda PS, McNulty D, Alloway BJ and Aitken MN, 1997. Plant availability of heavy metals in soils previously amended with heavy applications of sewage sludge. *J Sci Food Agric* 73: 446–454.
- Hough RL, Young SD and Crout NMJ, 2003. Modelling of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn uptake by winter wheat and forage, from a sewage disposal farm. *Soil Use Manage* 19: 19–27.
- Jalali M and Hemati N, 2013. Chemical fractionation of seven heavy metals (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn) in selected paddy soils of Iran. *Paddy Water Environ* 11: 299–309.
- Kabata-Pendias A, and Pendias H, 2000. Trace Elements in Soils and Plants. CRC.
- Kalavrouziotis IK, Koukoulakis P, Kostakioti E, 2012. Assessment of metal transfer factor under irrigation with treated municipal Wastewater. *Agric Water Manage* 103: 114– 119.
- Li P, Wang X, Allinson G, Li X and Xiong X, 2009. Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang, China. *J Hazard Mater* 161:516–521.
- Lindsay WL and Norvell WA, 1978. Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Sci Soc Am J* 42:421-428.
- Mc Bride MB, 1995. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations Protective. *J of Environ Qual* 24:5-18.
- Montgomery JM, 1985. Water Treatment, Principle and Design. John Wiley & sons. Inc. New York 696 p.
- Muchuweti M, Birkett JW, Chinyanga E and Zvauya R, 2006. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. *Agric Eco and Environ* 112: 41–48.
- Nan Z, Zhao C, Liu X, Saha UK, Lena QMa, Abigail R and Clarke-Sather R, 2010. The uptake and translocation of selected elements by Cole (*Brassica*) grown using oasis soils in pot experiments. *Toxicol Environ Chem* 92(8): 1541–1549.
- Pais I and Jones JB, 1997. The Handbook of Trace Elements. St. Lucie Press. Boca Raton Florida, 223 Pages.
- Park BJ, Lee Jh and Kim WI, 2011. Influence of soil characteristics and arsenic, cadmium, and lead contamination on their accumulation levels in rice and human health risk through intake of rice grown nearby abandoned mines. *J Korean Soc Appl Biol Chem* 54(4): 575-582.
- Patel RM, Prasher SO and Bonnell RB, 2000. Effects of watertable depth, irrigation water salinity, and fertilizer application on root zone salt buildup. *Canada Agri Engin* 42 (3): 111-115.
- Pour Moghadas H, 2003. A Survey of Groundwater Quality in Lenganat Zone of Isfahan. *J of Sch Health and Health Res Ins* 1(4): 31-40.
- Rowell DL, 1994. Soil Science: Method and Application. Longman Group Harlow. 345 p.
- Singh A, Sharma RK, Agrawal M and Marshall FM, 2010. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India. *Food and Chemi Toxicol* 48: 611–619.
- Smith KA, 1991. Soil Analysis. 2nd Ed. Marcel Decker, New York. USA.
- Smith SR, 1994. Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge-treated soil, Nickel, Cu and Zn uptake and toxicity to ryegrass. *Environ Pollut* 85:321-327.
- Sposito G, Lund J, and Chang AC, 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Sci Soc Am J* 46:260-264.
- Tiwari KK, Singh NK, Patel MP, Tiwari MR, and Rai UN, 2011. Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India. *Ecotoxicol and Environ Safety* 74: 1670–1677.
- Tuner HA, 2009. Urban Agriculture and Soil Contamination: An Introduction to Urban Gardening. University of Louisville, Environ Finance Center: Serving EPA Region 4, 20p.

- Wu YY, Chen T and Zhang XX, 1989. Pollution ecology of Cd in Zhangshi irrigation at Shenyang. *Acta Ecol Sini* 9: 21-26.
- Wu Sh, Zhou Sh and Li X, 2011. Determining the anthropogenic contribution of heavy metal accumulations around atypical industrial town: Xushe, China. *J of Geochem Expl* 110:92-97.
- Zazoli M, Bazrafshan E, Hazrati A and Tavakkoli A, 2006. Determination and estimation of Cadmium intake from Tarom rice. *J Appl Sci Environ* 10 (3): 147-150.
- Zhao K, Liu X, Xu J and Selim HM, 2010. Heavy metal contaminations in a soil-rice system: Identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields. *J Hazard Mater* 181: 778-787.
- Zhao K, Zhang W, Zhou L, Liu X, Xu J and Huang P, 2009. Modeling transfer of heavy metals in soil-rice system and their risk assessment in paddy fields. *Environ Earth Sci* 59:519-527.
- Zhao YF, Shi XZh, Huang B, Yu DSh, Wang HJ, Sun WX, Oboern I and Blomback K, 2007. Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils of an industry-based pre-urban area in Wuxi, China. *Pedo* 17(1): 44-51.