تأثیر لجن فاضلاب بر پالایش سبز باطله‌های کارخانه معدن طلای موته توسط کینوا (*Chenopodium quinoa* L.)

فاطمه افضلی‌نژاد[۱]، سمیه قاسمی[۲*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۵)

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر لجن فاضلاب بر جذب برخی فلزهای سنگین توسط گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* L.) از باطله‌های کارخانه معدن طلای موته انجام شد. برای این منظور، تأثیر سطوح صفر، ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار لجن فاضلاب بر غلظت، جذب و فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال سرب، کادمیم و نیکل در سه رقم کینوا (Q29، Red carina و Titicaca) بررسی شد. بر اساس نتایج این مطالعه، تأثیر نوع رقم کینوا، سطوح مختلف لجن فاضلاب و اثرات متقابل تیمارها بر غلظت سرب و نیکل ریشه و شاخساره، غلظت کادمیم ریشه و فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال سرب معنی‌دار بود. در رقم Titicaca، کاربرد ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار غلظت نیکل ریشه و شاخساره و غلظت کادمیم ریشه و کاهش معنی‌دار غلظت سرب شاخساره و فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال سرب گردید. در رقم Red carina نیز، غلظت سرب ریشه و شاخساره، فاکتور تغلیظ زیستی سرب، غلظت کادمیم ریشه و غلظت نیکل شاخساره گیاهان تیمارشده با سطح ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود. هم‌چنین، کاربرد لجن فاضلاب باعث کاهش معنی‌دار فاکتور انتقال کادمیم و افزایش جذب کل و فاکتور تغلیظ زیستی نیکل گردید. به‌طور کلی، بیش‌ترین غلظت سرب شاخساره، جذب کل سرب، فاکتور تغلیظ زیستی کادمیم و فاکتور انتقال کادمیم و نیکل در رقم Q29 مشاهده شد. در حالی‌که غلظت کادمیم شاخساره و غلظت نیکل ریشه دو رقم Red carina و Titicaca به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم Q29 بود. بر اساس نتایج این پژوهش، رقم Q29 قابلیت انباشت خوبی برای فلزهای سنگین مورد مطالعه داشته و می‌تواند گونه مناسب برای پالایش خاک‌های آلوده باشد.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی، کینوا، لجن فاضلاب، معدن طلای موته، فلزهای سنگین

افضلی نژاد ف.، قاسمی س. ۱۴۰۰. تأثیر لجن فاضلاب بر پالایش سبز باطله‌های کارخانه معدن طلای موته توسط کینوا (*Chenopodium quinoa* L.). تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۹، شماره ۴. صفحه: ۱۰۲- ۱۱۵.

۱-دانش آموختهکارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

* پست الکترونیک: s.ghasemi@yazd.ac.ir

مقدمه

امروزه معادن یکی از ارکان اصلی و مهم اقتصادی هر کشور می‌باشند. معدن‌کاری، مواد لازم برای حیات و پیشرفت بشر را فراهم می‌کند، اما با افزایش آلودگی‌ها، امکان حیات و استفاده از محیط زیست سالم را از بشر سلب می‌نماید (Cheraghi & Balmaki, 2007). بهره‌برداری از ذخایر معدنی و یا فرآوری کانسنگ‌ها معمولاً با تولید حجم زیادی از باطله‌ها و یا پسماندها، همراه است (Abouian Jahromi *et al.*, 2017). باطله‌ها دارای غلظت بالایی از فلزهای سنگین بوده که در شرایط ویژه محیطی، این عناصر آزاد شده و وارد منابع آب و خاک می‌شوند (Daharazma *et al.*, 2015; Abouian Jahromi *et al.*, 2017). فلزهای سنگین و عناصر سمی، از جمله آلاینده‌های پایدار و غیرقابل تجزیه در خاک بوده و با ورود به زنجیره غذایی انسان و دام‌ها، تهدیدی برای سلامتی انسان می‌باشند (Sarwar *et al.*, 2017; Ashraf *et al.*, 2019). فلزهایی که تجزیه و دفن نشوند، در بدن موجود باقی مانده و به‌طور مستمر انباشته شده و مقدار آن به تدریج زیاد می‌شود که این پدیده به عنوان تغلیظ زیستی شناخته شده است (Phillips & Human, 2015). عناصر سنگین مانند آرسنیک، کادمیم، سرب، کروم و جیوه بسیار سمّی بوده و ورود آن‌ها به زنجیره غذایی و رسیدن به غلظت‌های بحرانی، باعث آسیب جدی به سلامت انسان می‌شود (Das *et al.*, 2016). بنابراین، مدیریت صحیح مواد تولیدی و مواد زائد به جای‌مانده از معادن زیرزمینی و روباز، می‌تواند در رسیدن به توسعه و اقتصاد پایدار مؤثر واقع شود که این موضوع به بهبود کیفیت خاک و آب و در نتیجه ارتقاء سلامت انسان نیز منجر خواهد شد.

در سال‌های اخیر، روش گیاه‌پالایی به عنوان یک فناوری مؤثر و کم‌هزینه برای پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین مورد توجه قرار گرفته است (Asad *et al.*, 2019; Khodaverdiloo *et al.*, 2020). در این روش، از گیاهان سبز برای استخراج، مهار، تخریب و یا تثبیت آلاینده‌ها از خاک و آب استفاده می‌شود (Khodaverdiloo *et al.*, 2020). گیاه‌پالایی فلزهای سنگین در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، دارای محدودیت‌هایی از جمله قابلیت دسترسی کم فلزهای سنگین و رشد نامناسب گیاهان ناشی از کمبود آب، حاصلخیزی کم خاک و دیگر شرایط نامساعد خاک مانند شوری و pH بالا می‌باشد (Khodaverdiloo *et al.*, 2020). از آنجا که گیاهان توانایی جذب فلزهای سنگین به شکل محلول یا آزاد را دارند، بنابراین، قابلیت جذب فلزهای سنگین، مهم‌ترین عامل محدودکننده برای گیاه‌پالایی خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Karimi *et al.*, 2018). برخی روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌توانند در افزایش کارایی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین در این مناطق مؤثر باشند (Naderi *et al.*, 2012). در این میان، می‌توان به استفاده از مواد آلی و اصلاح‌کننده‌های خاک مانند لجن فاضلاب اشاره کرد که می‌توانند قابلیت جذب فلزهای سنگین و هم‌چنین انتقال فلز از ریشه به اندام هوایی را افزایش دهند. در واقع، لجن فاضلاب از طریق بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند pH، تخلخل، جرم ویژه ظاهری، ظرفیت نگهداری آب در خاک و هم‌چنین افزایش مواد آلی خاک، می‌تواند بر افزایش قابلیت جذب فلزهای سنگین توسط گیاهان مؤثر باشد. شرستا و همکاران (Shrestha *et al.*, 2019) نیز با بررسی تأثیر اصلاح‌کننده‌های آلی مختلف بر قابلیت دسترسی فلزهای سنگین کادمیم، سرب، روی، کبالت و نیکل بیان داشتند که اصلاح‌کننده‌های آلی از طریق بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش زیست‌توده گیاه، باعث کارایی گیاه *Panicum virgatum* در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین گردید. هم‌چنین، اگاندیران و همکاران (Ogundiran *et al.*, 2018) مشاهده کردند که با کاربرد کمپوست و بیوچار، پتانسیل گیاه *Moringa oleifera* در گیاه‌پالایی خاک آلوده به سرب افزایش یافت.

فناوری گیاه‌پالایی، مستلزم استفاده از گیاهان انباشت‌گر فلزها به‌منظور پالایش یا تثبیت آلاینده‌های فلزی موجود در خاک می‌باشد. انتخاب گونه گیاهی مناسب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تعیین سرنوشت گیاه‌پالایی و موفقیت یا عدم موفقیت آن است. مطالعات نشان داده‌اند که برخی گونه‌های کنوپودیاسه مانند گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* L) قادر به انباشت مقادیر زیادی از فلزهای سنگین (نیکل، کروم و کادمیم) در بخش هوایی خود می‌باشند (Gupta & Sinha., 2007, Bhargava *et al.*, 2008). کینوا گیاهی یک‌ساله و سازگار با شرایط بیابانی و گرم و اقلیم خشک

بوده که دمای ۴- تا ۳۸ درجه سلسیوس را تحمل می‌کند (FAO, 2011). این گیاه کارایی بالایی در استفاده از آب و تحمل بالا به تنش خشکی داشته و در مناطقی با بارندگی ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر، عملکرد مناسبی دارد (Wilson *et al*., 2002). کینوا بهترین گیاه برای کشت در خاک‌هایی است که شوری بالاتر از ۱۹ دسی‌زیمنس بر متر دارند و این گیاه توانایی رشد و تولید محصول در شرایطی مشابه شوری آب دریا حتی تا ۴۰ دسی‌زیمنس بر متر را دارد (Flowers, 2004) که این خود اهمیت مطالعه این گیاه شورزیست را نشان می‌دهد.

با وجود آن‌که گیاه کینوا پتانسیل حذف فلزات سنگین از خاک‌های آلوده و شور را دارد (Jaikishun *et al*., 2019)، اما مطالعات زیادی در این زمینه انجام نشده است. از سوی دیگر، با توجه به اینکه موضوع بازسازی اکوسیستم معدن طلای موته با استفاده از گیاهان، از جمله مهم‌ترین اولویت‌های پژوهشی بخش تحقیق و توسعه مجتمع طلای موته بوده و برای جلوگیری از خطرهای سرمایه‌گذاری و زیست‌محیطی و اجرای موفقیت‌آمیز طرح گیاه‌پالایی باطله‌های شور معدن طلای موته، لازم است به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از طریق کاربرد ترکیبات ارزان قیمت و قابل دسترس توجه شود و لجن فاضلاب نیز به دلیل هزینه نسبتاً کم و تأثیرگذاری بر رشد گیاه و افزایش بازدهی گیاه‌پالایی، در سطح وسیع برای معدن طلای موته قابل اجرا می‌باشد. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر لجن فاضلاب بر توانایی سه رقم کینوا در پالایش برخی فلزهای سنگین از باطله‌های کارخانه معدن طلای موته انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب شامل صفر، ۲۰ و ۴۰ تن بر هکتار بر جذب برخی فلزهای سنگین توسط سه رقم کینوا، آزمایشی گلدانی در قالب طرح کامل تصادفی به‌صورت فاکتوریل و با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه یزد انجام شد. لجن فاضلاب از تصفیه‌خانه شهر یزد تهیه گردید و پس از هوا خشک کردن و عبور از الک دو میلی‌متری، برخی ویژگی‌های آن تعیین شد (جدول ۱). نمونه خاک نیز از نقاط مختلف باطله‌های سد شماره ۳ کارخانه معدن طلای موته تهیه گردید. منطقه موته در شمال استان اصفهان در مرکز ایران، بین طول‌های جغرافیایی "۳۰ '۳۲ °۵۰ شرقی و "۰۰'۴۵ °۳۳ شمالی و عرض‌های جغرافیایی"۰۰'۴۹ °۵۵ شرقی و "۳۰ '۲۸ °۳۳ شمالی قرار دارد. به‌منظور تعیین برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه (جدول ۱)، نمونه خاک هوا خشک شده و از الک دو میلی متری عبور داده شد. برای اندازه‌گیری pH و قابلیت هدایت الکتریکی لجن فاضلاب و خاک به ترتیب از عصاره ۱ به ۱۰ و عصاره اشباع خاک استفاده شد. pH با استفاده از دستگاه pH متر مدل ۸۲۷ و قابلیت هدایت الکتریکی توسط دستگاه هدایت‌سنج مدل ۴۵۱۰ اندازه‌گیری شد. کربن آلی نیز به روش اکسیداسیون تر در مجاورت بی‌کرومات‌پتاسیم و اسیدسولفوریک غلیظ (Nelson & Sommers, 1986) اندازه‌گیری شد. هم‌چنین غلظت کل سرب، کادمیم و نیکل، بعد از انحلال در تیزاب، توسط دستگاه جذب اتمی مدل Novaa300 تعیین گردید (Marofi *et al*., 2013). درصد نیتروژن کل با استفاده از دستگاه اتوکلتک مدل Behr distilliation unit S4 بر اساس روش کلدال (Bermner & Mulvaney, 1982) تعیین گردید. کربنات کلسیم معادل (CCE) خاک نیز به روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک و تیتراسیون برگشتی با هیدروکسید-سدیم اندازه‌گیری شد (Hesse, 1971). فسفر قابل جذب خاک به روش اولسن با عصاره‌گیر بی‌کربنات‌سدیم در طول موج ۸۲۰ نانومتر و فسفر کل موجود در نمونه لجن فاضلاب نیز به روش رنگ سنجی وانادات-مولیبدات در طول موج ۴۷۰ نانومتر و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Specord 210) اندازه‌گیری شد (Olsen *et al*., 1954). غلظت پتاسیم قابل جذب خاک با عصاره‌گیر استات آمونیوم و پتاسیم کل موجود در لجن فاضلاب بعد از انحلال در اسید تیزاب توسط دستگاه فلیم فتومتر (مدل Jenway PFP7) تعیین گردید Hesse, (1971).

برای کشت گیاه، ابتدا سطوح مختلف لجن فاضلاب با پنج کیلوگرم خاک مخلوط و به گلدان‌ها انتقال یافتند. سپس تعداد ۱۰ عدد بذر کینوا از رقم‌های مختلف در هر گلدان کشت شد. در مطالعه حاضر رقم‌های Q29 ، Titicaca و Red carina که دارای مقادیر متفاوت ساپونین (به‌ترتیب

1. Calcium carbonate equivalents

۵/۸، ۳/۸ و ۴/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بودند، انتخاب شدند. بر اساس مطالعات یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2018)، محتوای ساپونین رقم‌های کینوا بر میزان تحمل آن‌ها به سطوح مختلف تنش، مؤثر می‌باشد. برای هر تیمار سه تکرار در نظر گرفته شد. تعداد کل گلدان‌ها ۲۷ عدد بود. آبیاری در طول دوره رشد، هفته‌ای دو مرتبه تا حد رطوبت ظرفیت مزرعه و به‌صورت وزنی انجام گرفت.

پس از گذشت هشت هفته از رشد گیاه و بعد از رسیدن به مرحله گلدهی، ریشه و شاخساره به‌طور جداگانه برداشت شد. برای اندازه‌گیری غلظت نیکل، کادمیم و سرب در گیاه، ابتدا عصاره‌گیری انجام شد. برای این منظور، یک گرم از نمونه‌های گیاهی پودر شده، توزین شده و در کوره با دمای ۵۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. سپس مقدار پنج میلی‌لیتر محلول اسیدهیدروکلریدریک دو نرمال به نمونه‌ها اضافه شد و پس از صاف کردن با کاغذ صافی به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسید (Benton, 1990 & Case). در این مطالعه به‌منظور ارزیابی توانایی سه رقم کینوا در پالایش خاک سد باطله از فلزهای سنگین، شاخص‌های فاکتور تغلیظ زیستی[1] و هم‌چنین فاکتور انتقال محاسبه گردید. برای تعیین فاکتور تغلیظ زیستی از نسبت غلظت فلزهای سنگین در شاخساره گیاه به غلظت کل این فلزها در خاک استفاده شد. برای تعیین فاکتور انتقال نیز از نسبت غلظت فلزهای سنگین در شاخساره به غلظت فلزهای سنگین در ریشه استفاده شد (Karimi *et al.*, 2018). تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم افزار SPSS Statistucs 20 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Microsoft Excel 2013 استفاده شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های لجن فاضلاب و خاک سد باطله معدن طلای موته

Table 1. Some characteristics of sewage sludge and tailings dam soil of Moteh gold mine

Property	Unit	Sewage sludge		Soil	
		Value	Permissible limit	Value	Permissible limit (SEPAC, 1995)
EC	dS m^{-1}	6.9	-	13.1	-
pH	-	6.5	-	8.01	-
Organic matter	%	47.1	-	1.03	-
N	%	4.02	-	0.04	-
P (Available)	mg kg^{-1}	-	-	20.56	-
K (Available)	mg kg^{-1}	-	-	120.56	-
P	%	3.16	-	-	-
K	%	0.51	-	-	-
CCE	%	-	-	12	-
Total Pb	mg kg^{-1}	3.21	300	100	300
Total Cd	mg kg^{-1}	0.41	34	4.4	3.9
Total Ni	mg kg^{-1}	5.25	420	63	50

EC و CCE به‌ترتیب قابلیت هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم معادل می‌باشند.

EC and CCE are electrical cunductivity and carbonate calcium equilibrium respectively

نتایج و بحث

سرب

تأثیر نوع رقم کینوا بر غلظت سرب ریشه در سطح احتمال ۰/۱ درصد و اثر سطوح مختلف لجن فاضلاب و هم‌چنین اثر متقابل فاکتورها بر غلظت سرب ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، کاربرد لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد، تأثیر معنی‌داری بر غلظت سرب ریشه دو رقم Q29 و Titicaca نداشت، اما در رقم Red carina، با افزایش سطح لجن فاضلاب، غلظت سرب ریشه نیز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۱). به‌طور کلی در تمام سطوح لجن فاضلاب، غلظت سرب ریشه رقم Q29 به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم Titicaca بود.

۱ Bioconcentration Factor

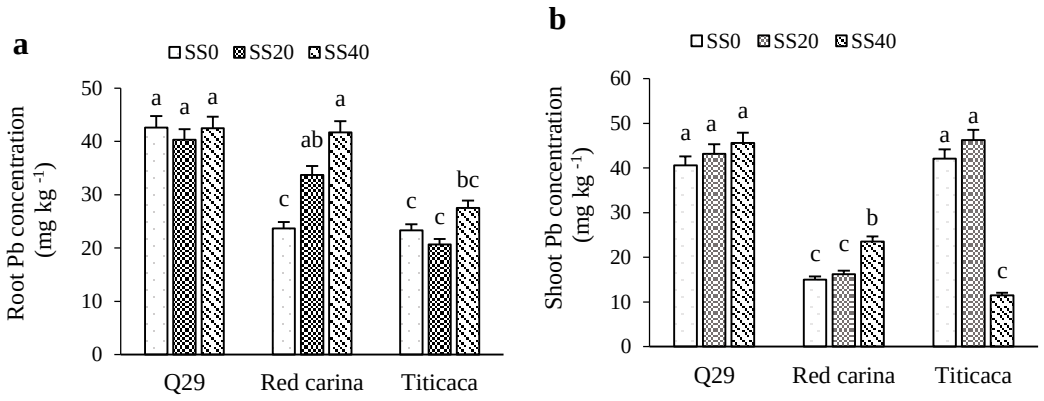
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب بر غلظت، جذب و فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال سرب در سه رقم کینوا

Table 2. Analysis of variance for the effect of different levels of sewage sludge on concentration, uptake and bioconcentration and translocation factor of Pb in three quinoa cultivars

Sources of variation	Degree of freedom	Mean Square				
		Root Pb Concentration	Shoot Pb Concentration	Total Pb uptake	Bioconcentration on factor	Translocation factor
Cultivar (C)	2	727***	1413***	45832***	0.56***	2.026***
Sewage sludge (SS)	2	134*	162***	6801	0.066**	0.862***
C × SS	4	75.7*	499***	8794	0.203***	0.963***
Error	18	23.6	13.9	4404	0.006	0.033
CV(%)		29.54	45.7	53.2	45.83	60.27

*، ** و *** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ و ۰/۱ درصد

*, ** and *** are respectively significant at the probability level of 5, 1 and 0.1%



شکل ۱- تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب (SS) بر غلظت سرب ریشه (a) و شاخساره (b) سه رقم کینوا

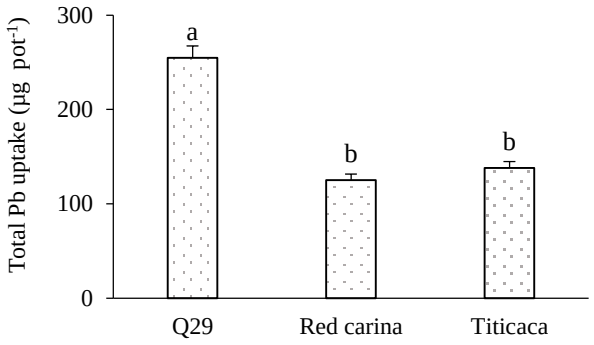
Figure 1. Effect of different levels of sewage sludge (SS) on the root (a) and shoot (b) Pb concentrations of three quinoa cultivars

میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with at least one similar letter are not significantly different, accordind to the Duncan test at 5% probability level.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر نوع رقم کینوا، سطوح مختلف لجن فاضلاب و اثر متقابل فاکتورها بر غلظت سرب شاخساره در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کاربرد لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد، تأثیر معنی‌داری بر غلظت سرب شاخساره رقم Q29 نداشت، اما در رقم Red carina و Titicaca، کاربرد ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب به‌ترتیب باعث افزایش و کاهش معنی‌دار غلظت سرب شاخساره شد (شکل ۱). لجن فاضلاب با تأثیر بر برخی ویژگی‌های خاک مانند کاهش pH و دارا بودن لیگاندهای آلی، می‌تواند باعث افزایش جذب سرب توسط گیاه و انتقال آن به اندام‌های هوایی گیاه شود (Nazari *et al*., 2006). کریمی و همکاران (Karimi *et al*., 2018) نیز گزارش کردند که در خاک‌های آهکی با افزایش زیست‌فراهمی سرب برای گیاهان از طریق راهکارهای مختلفی مانند استفاده از اسیدهای آلی، کلات‌کننده‌ها و همزیستی باکتری‌های محرک رشد گیاه، می‌توان کارایی گیاهان در پالایش سرب را افزایش داد. هم‌چنین، فلاحتی مروست و

همکاران (Falahati Marvast *et al*., 2013) نشان دادند که کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت قابل استفاده و محلول کادمیم، سرب و نیکل در خاک و هم‌چنین افزایش جذب این فلزها توسط گیاه جو شد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که تأثیر نوع رقم کینوا بر جذب کل سرب در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). جذب کل سرب در رقم Q29 به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم Red carina و Titicaca بود (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه جذب کل سرب توسط سه رقم کینوا

Figure 2. Comparison of total Pb uptake by three quinoa cultivars

میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند

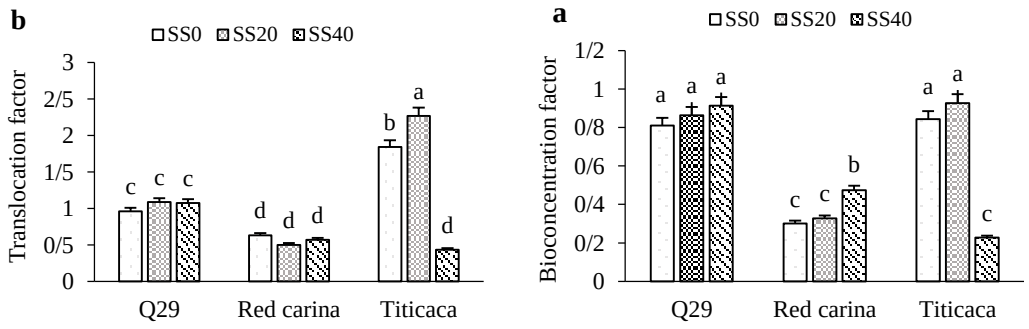
Means with at least one similar letter are not significantly different, accordind to the Duncan test at 5% probability level.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع رقم کینوا، سطوح مختلف لجن فاضلاب و اثر متقابل تیمارها بر فاکتور تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال سرب معنی‌دار بود (جدول ۲). کاربرد لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری بر فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال سرب در رقم Q29 نداشت، اما تیمار ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار فاکتور تغلیظ زیستی سرب در رقم Red carina و کاهش معنی‌دار فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال این عنصر در رقم Titicaca شد (شکل ۳).

فاکتور تغلیظ زیستی، بیانگر توانایی گیاهان برای تحمل و تجمع فلزهای سنگین در اندام‌های گیاهی است و در بررسی فرایندهای جذب فلزها در گیاهان، اهمیت زیادی دارد. چنانچه مقادیر این شاخص کم‌تر از یک باشد گیاه جاذب، بیش‌تر از یک، گیاه ابرجاذب و اگر نزدیک به صفر باشد گیاه دافع می‌باشد (Mortazavi *et al*., 2017) نتایج حاصل از این مطالعه (شکل ۳) نشان داد که مقدار فاکتور تغلیظ زیستی در رقم‌های مختلف بدین ترتیب Q29، Titicaca و Red carina بیش‌تر بود، اما از آن‌جا که مقدار این شاخص در گیاهان مورد مطالعه کم‌تر از یک بود، بنابراین، هر سه رقم در رابطه با فلز سرب به عنوان گیاه جاذب محسوب می‌شوند.

فاکتور انتقال نیز نشان دهنده توانایی گیاهان برای جذب و انتقال فلزها از خاک و سپس ذخیره آن‌ها در اندام‌های گیاهی است. چنانچه شاخص انتقال بین ۰/۱ تا یک باشد، تجمع و دسترسی فلز در گیاه متوسط و اگر این شاخص بزرگ‌تر از یک باشد، فلز مورد نظر تجمع و دسترسی بالایی در گیاه دارد (Kabata-Pendias & Pendias., 2000). بر اساس نتایج این مطالعه (شکل ۳)، مقدار متوسط فاکتور انتقال سرب در رقم‌های Titicaca و Q29 بزرگ‌تر از یک بوده، بنابراین در این گیاهان، فلز سرب تجمع و دسترسی بالایی دارد، اما در رقم Red carina، به دلیل اینکه فاکتور انتقال سرب کم‌تر از یک است، تجمع و دسترسی این عنصر در گیاه متوسط می‌باشد. غلظت بیش‌تر سرب در ریشه رقم Red carina نسبت به شاخساره (شکل ۱) و در نتیجه مقادیر فاکتور انتقال کم‌تر از یک در این گیاهان و هم‌چنین نتایج مربوط به فاکتور تغلیظ زیستی (شکل ۳) نشان دهنده این است که رقم Red carina در تثبیت گیاهی سرب در ریشه، کارایی بیش‌تری داشته است. انتقال سرب از ریشه به شاخساره به دلایل مختلفی از جمله غیر متحرک شدن به وسیله بار منفی پکتین در دیواره سلولی، اندوزش در غشای پلاسمایی و حبس واکوئلی، محدود می‌شود (Karimi *et al*., 2018). کریمی و همکاران (Karimi *et al*., 2018) نیز غلظت بیش‌تر

سرب در ریشه سه گونه گیاه مرتعی نسبت به شاخساره و مقادیر فاکتور انتقال کم‌تر از یک را برای این گیاهان در خاک‌های آهکی آلوده به سرب گزارش کردند. هم‌چنین، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کاربرد ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب باعث کاهش معنی‌دار فاکتور انتقال سرب در رقم Titicaca شد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که اضافه کردن مقادیر زیادی لجن فاضلاب به خاک آلوده به سرب، باعث غیرمتحرک شدن سرب توسط مواد آلی می‌شود. در این راستا، پرز-د-مورا و همکاران (Pérez-de-Mora, *et al*., 2007) گزارش کردند که کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی مانند لجن فاضلاب باعث تثبیت فلزهای سنگین در خاک‌های آلوده مناطق نیمه‌خشک می‌شود. پلاکک و همکاران (Placek *et al*., 2016) نیز مشاهده کردند که کاربرد لجن فاضلاب در خاک آلوده به سرب از طریق کاهش تحرک سرب و جذب کم‌تر آن توسط گیاه، باعث کاهش انتقال سرب به اندام‌های هوایی درخت کاج شد.



شکل ۳- تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب (SS) بر فاکتور تغلیظ زیستی (a) و فاکتور انتقال (b) سرب توسط سه رقم کینوا

Figure 3. Effect of different levels of sewage sludge (SS) on Pb bioconcentration factor (a) and translocation factor (b) by three quinoa cultivars

میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with at least one similar letter are not significantly different, accordind to the Duncan test at 5% probability level.

کادمیوم

تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب بر غلظت کادمیم ریشه در سطح احتمال ۰/۱ درصد و اثر متقابل تیمارها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در رقم Q29، کاربرد لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد، تأثیر معنی‌داری بر غلظت کادمیم ریشه نداشت (شکل ۴). در رقم Red carina، غلظت کادمیم ریشه گیاهان تیمار شده با سطح ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود. در رقم Titicaca نیز، با افزایش سطح لجن فاضلاب، غلظت کادمیم ریشه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری‌که بیش‌ترین غلظت کادمیم ریشه در تیمار۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب مشاهده شد (شکل ۴). وی و همکاران (Wei *et al*., 2010) گزارش کردند که کودهای اصلاح‌کننده از طریق افزایش زیست‌توده گیاه باعث افزایش استخراج گیاهی کادمیم می‌شوند. از سویی دیگر، کاباتاپندیاس و پندیاس (Kabata-Pendias and Pendias, 2000) بیان داشتند که افزایش معنی‌دار گونه‌های با پیوند ضعیف و قابل تبادل کادمیم در خاک‌هایی که لجن فاضلاب دریافت کردند، بر قابلیت دسترسی آن برای گیاه اثر می‌گذارد. (Hejazizadeh *et al*, 2016) نیز نشان دادند که کاربرد لجن فاضلاب کارخانه‌های کاغذ، باعث افزایش معنی‌دار غلظت سرب و کادمیم در ریشه و اندام هوایی آفتابگردان شد.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر نوع رقم کینوا بر غلظت کادمیم شاخساره در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود، اما سطوح مختلف لجن فاضلاب و اثر متقابل تیمارها، تأثیر معنی‌داری بر غلظت کادمیم شاخساره نداشتند (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که غلظت کادمیم شاخساره دو رقم Red carina و Titicaca به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم Q29 بود (جدول ۴). بر اساس نتایج مطالعه حاضر، نوع رقم کینوا، سطوح مختلف لجن فاضلاب و اثرات متقابل آنها، تأثیر معنی‌داری بر جذب کل کادمیم نداشتند (جدول ۳).

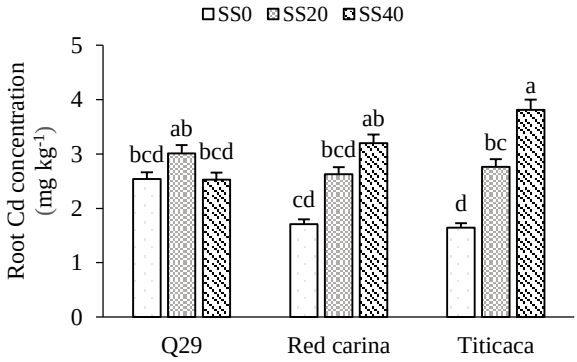
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب بر غلظت، جذب و فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال کادمیم در سه رقم کینوا

Table 3. Analysis of variance for the effect of different levels of sewage sludge on concentration, uptake and bioconcentration and translocation factor of Cd in three quinoa cultivars

Sources of variation	Degree of freedom	Mean Square				
		Root Cd concentration	Shoot Cd concentration	Total Cd uptake	Bioconcentration factor	Translocation factor
Cultivar (C)	2	0.130	5.4***	106	1.35***	1.547**
Sewage sludge(SS)	2	3.49***	0.261	123	0.063	0.974*
C×SS	4	0.98*	0.37	29	0.092	0.256
Error	18	0.32	0.314	50.4	0.08	0.221
CV (%)		30.42	25.25	41.98	25.2	44.73

*، ** و *** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ و ۰/۱ درصد

*, ** and *** are respectively significant at the probability level of 5, 1 and 0.1%



شکل ۴-تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب (SS) بر غلظت کادمیم ریشه سه رقم کینوا

Figure 4. Effect of different levels of sewage sludge (SS) on the root Cd concentration of three quinoa cultivars

میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with at least one similar letter are not significantly different, accordind to the Duncan test at 5% probability level.

جدول ۴- تأثیر نوع رقم کینوا و سطوح مختلف لجن فاضلاب بر غلظت و فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال کادمیم

Table 4. The effect of quinoa cultivar and different levels of sewage sludge on the concentration and bioconcentration and translocation factor of Cd

Treatment		Shoot Cd concentration (mg kg^{-1})	Bioconcentration factor	Translocation factor
Quinoa cultivar type	Q29	2.44^{b}	1.93^{a}	1.70^{a}
	Red carina	3.7^{a}	1.22	0.92^{b}
	Titicaca	3.86^{a}	1.85^{a}	1.53^{a}
Sewage sludge level (ton ha^{-1})	0	3.14^{a}	1.56^{a}	1.73^{a}
	20	3.39^{a}	1.73^{a}	1.35^{ab}
	40	3.47^{a}	1.69^{a}	1.07^{b}

میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with at least one similar letter are not significantly different, accordind to the Duncan test at 5% probability level.

تأثیر نوع رقم کینوا بر فاکتور تغلیظ زیستی در سطح احتمال ۰/۱ درصد و بر فاکتور انتقال کادمیم در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال کادمیم در رقم‌های Titicaca و Q29 به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم Red carina بود (جدول ۴). کاربرد ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد نیز، باعث کاهش معنی‌دار فاکتور انتقال کادمیم شد (جدول ۴).

کاهش فاکتور انتقال کادمیم در گیاه می‌تواند به‌دلیل اثر رقت، توانایی کم گیاه برای تجمع کادمیم و کاهش انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی باشد (Jia *et al*., 2011). بر اساس نظریه وازکوئز و همکاران (Vazquez *et al*., 2009)، کادمیم معمولاً در ریشه گیاهان و توسط دیواره سلولی غیرمتحرک شده و بخش کمی از آن به اندام هوایی منتقل می‌شود. سینگ و همکاران (Singh *et al*., 2004) نیز تجمع بیش‌تر فلزهای سنگین در ریشه را به کمپلکس شدن این فلزها با گروه‌های سولفهیدریل نسبت دادند که مانع از انتقال فلز به اندام هوایی می‌شود. در مطالعه حاضر، فاکتور انتقال کادمیم در رقم‌های Q29 و Titicaca بزرگتر از یک بود، بنابراین در این گیاهان، فلز کادمیم تجمع و دسترسی بالایی دارد. هم‌چنین با توجه به اینکه فاکتور تغلیظ زیستی در گیاهان مورد مطالعه بیش‌تر از یک است، بنابراین، هر سه رقم در رابطه با فلز کادمیم به عنوان گیاه ابرجاذب محسوب می‌شوند.

نیکل

تأثیر نوع رقم گیاه کینوا، سطوح مختلف لجن فاضلاب و اثر متقابل تیمارها بر غلظت نیکل ریشه در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). در رقم‌های Q29 و Red carina، کاربرد لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد، تأثیر معنی‌داری بر غلظت نیکل ریشه نداشت، اما در رقم Titicaca، غلظت نیکل ریشه در گیاهان تیمار شده با سطح ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب، به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سطوح صفر و ۲۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب بود (شکل ۵ الف).

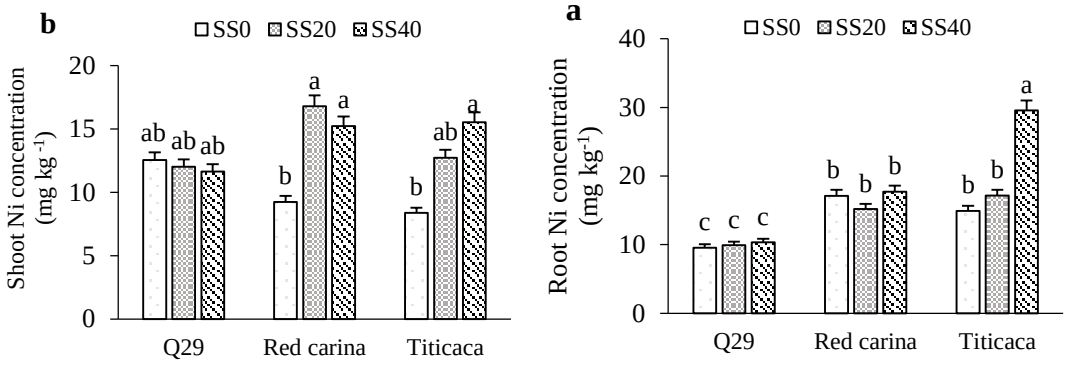
جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب بر غلظت، جذب، فاکتور تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال نیکل در سه رقم کینوا

Table 5. Analysis of variance for the effect of different levels of sewage sludge on concentration, uptake, bioconcentration and translocation factor of Ni in three quinoa cultivars

		Mean square				
Sources of variation	Degree of freedom	Root Ni concentration	Shoot Ni concentration	Total Ni uptake	Bioconcentration factor	Translocation factor
Cultivar (C)	2	258***	8.00	770	0.009	0.56***
Sewage sludge(SS)	2	81.8***	46.4***	4704***	0.051**	0.149*
C×SS	4	55.2***	20.3*	644	0.023	0.096
Error	18	4.04۰	7.22	386	0.008	0.046
CV (%)		38.95	27.7	39.63	27.7	39.44

*، ** و *** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ و ۰/۱ درصد

*, ** and *** are respectively significant at the probability level of 5, 1 and 0.1%



شکل ۵- تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب (SS) بر غلظت نیکل ریشه (الف) و شاخساره (ب) سه رقم کینوا

Figure 5. Effect of different levels of sewage sludge (SS) on the root (a) and shoot (b) Ni concentrations of three quinoa cultivars

میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with at least one similar letter are not significantly different, accordind to the Duncan test at 5% probability level.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب بر غلظت نیکل شاخساره کینوا در سطح یک درصد و اثر متقابل تیمارها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). تأثیر لجن فاضلاب بر غلظت نیکل شاخساره، بسته به نوع رقم کینوا متفاوت بود (شکل ۵). در رقم Q29، کاربرد لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد، تأثیر معنی‌داری بر غلظت نیکل شاخساره نداشت، اما در رقم Red carina، غلظت نیکل شاخساره در گیاهان تیمار شده با سطوح ۲۰ و ۴۰ تن بر هکتارلجن فاضلاب، به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود. در رقم Titicaca نیز، کاربرد ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد، باعث افزایش معنی‌دار غلظت نیکل شاخساره شد (شکل ۵).

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب بر جذب کل نیکل در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵)، به‌طوری‌که با افزایش سطح لجن فاضلاب، جذب کل نیکل توسط کینوا، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۶). تأثیر مثبت کاربرد مواد آلی بر افزایش قابلیت جذب نیکل، توسط ارتیز و آلکانیز (Ortiz & Alkaniz, 2006) نیز گزارش شده است. هم‌چنین، گراناتو و همکاران (Granato *et al*., 2004) نشان دادند که کاربرد مواد زاید جامد آلی در خاک، باعث افزایش قابل توجه غلظت روی و نیکل در برگ ذرت شد.

جدول ۶- تأثیر نوع رقم کینوا و سطوح مختلف لجن فاضلاب بر جذب کل و فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال نیکل

Table 6. The effect of quinoa cultivar type and different levels of wastewater sludge on total uptake and bioconcentration and translocation factor of Ni

Treatment		Total Ni uptake ($\mu g\ pot^{-1}$)	Bioconcentration factor	Translocation factor
Quinoa cultivar type	Q29	68.69[a]	0.459[a]	1.228[a]
	Red carina	80.94[a]	0.459[a]	0.849[b]
	Titicaca	62.80[a]	0.408[a]	0.612[c]
Sewage sludge level ($ton\ ha^{-1}$)	0	47.24[c]	0.336[b]	0.803[b]
	20	72.29[b]	0.461[a]	0.842[ab]
	40	92.89[a]	0.417[a]	1.043[a]

میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with at least one similar letter are not significantly different, accordind to the Duncan test at 5% probability level.

تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب بر فاکتور تغلیظ زیستی و انتقال نیکل معنی‌دار بود (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد سطوح ۲۰ و ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد، باعث افزایش معنی‌دار فاکتور تغلیظ زیستی نیکل در گیاه کینوا گردید (جدول ۶). اصلاح‌کننده‌های آلی به دلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و هم‌چنین افزایش رشد و توسعه ریشه، بر تحرک و قابلیت دسترسی فلزهای سنگین در ریزوسفر تأثیر می‌گذارند (Park, *et al*., 2011). در برخی مطالعات گزارش شده است که با کاربرد لجن فاضلاب به دلیل افزایش غلظت اسیدهای آلی و کربن آلی محلول (Lwina, *et al*., 2018 ;Park, *et al*., 2011) و هم‌چنین کاهش pH خاک ریزوسفری (Park, *et al*., 2011)، قابلیت جذب فلزهای سنگین افزایش می‌یابد. گروبلاک و همکاران (Grobelak, *et al*., 2017) نیز بیان داشتند که لجن فاضلاب کود با ارزشی باشد که از طریق افزایش مقدار نیتروژن، فسفر و کربن در خاک، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و کاهش pH خاک، باعث بهبود رشد و نمو گیاهان در فرآیند گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده می‌شود. نتایج مطالعه حاضر نیز نشان داد که افزایش سطح لجن فاضلاب، باعث بهبود جذب کل نیکل توسط کینوا و در نتیجه افزایش فاکتور تغلیظ زیستی شد (جدول ۶). به‌طور کلی، فاکتور تغلیظ زیستی در گیاهان مورد مطالعه کم‌تر از یک است، بنابراین، هر سه رقم در رابطه با فلز نیکل به عنوان گیاه جاذب محسوب می‌شوند. هم‌چنین، کاربرد ۴۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد، باعث افزایش معنی‌دار فاکتور انتقال نیکل در گیاه کینوا شد (جدول ۶) که این امر می‌تواند به دلیل تأثیر بیش‌تر لجن فاضلاب بر افزایش غلظت نیکل شاخساره در مقایسه با ریشه (شکل ۵) باشد.

نوع رقم کینوا نیز تأثیر معنی‌داری بر فاکتور انتقال نیکل در سطح احتمال ۰/۱ درصد داشت (جدول ۵) و فاکتور انتقال نیکل در رقم‌های مختلف بدین ترتیب Q29، Red carina و Titicaca بیش‌تر بود (جدول ۶). بر اساس نتایج مطالعه حاضر، فاکتور انتقال نیکل در رقم Q29 بزرگ‌تر از یک بود، بنابراین در این گیاه، فلز نیکل تجمع و دسترسی بالایی دارد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر غلظت و جذب فلزهای سنگین، بسته به نوع رقم کینوا متفاوت بود. بر اساس نتایج حاصل از فاکتور تغلیظ زیستی، هر سه رقم مورد مطالعه در رابطه با فلز سرب و نیکل به عنوان گیاه جاذب و در رابطه با فلز کادمیم به عنوان گیاه ابرجاذب محسوب می‌شوند. نتایج فاکتور انتقال نیز نشان داد که فلز سرب و کادمیم در رقم‌های Titicaca و Q29 و فلز نیکل در رقم Q29، تجمع و دسترسی بالایی دارند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که رقم Q29 قابلیت انباشت خوبی برای فلزهای سنگین مورد مطالعه دارد و می‌تواند گونه مناسب برای پالایش خاک‌های آلوده باشد. با توجه به اینکه در این پژوهش، هدف اصلی از کشت کینوا در باطله‌های معدن، حذف فلزهای سنگین و پالایش خاک بوده است، بنابراین توصیه می‌گردد برای انتخاب راهکار مناسب برای دفع گیاهان آلوده، تحقیقات بیش‌تر انجام شود.

Reference

Abouian Jahromi, M., Khodadadi Darban A., Jamshidi Zanjani A., and Sharifizade Moghadam H. 2017. Qualitative mapping of surface soil contamination around Irankou Lead_Zinc mine. *Iranian Journal of Mining Engineering*, 12(37): 65-79 (In Persian)

Asad S., Farooq A.M., Afzal A., and West H. 2019. Integrated phytobial heavy metals remediation strategies for sustainable clean environment-A review. *Chemosphere*, 217: 925-41.

Ashraf S., Ali Q., Zahir Z.A., Ashraf, S., and Asghar, H.N. 2019. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174: 714-27.

Benton J., and Case, V.W. 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples, P 389-428. In: Westerman, R.L. (ed.). Soil testing and plant analysis. 3rd Ed. Book series No. 3. *Soil Science Society of America,* Inc. Madison, WI., USA.

Bremner J.M., and Mulvaney, C.S. 1982. Total Nitrogen. Pp.595-622. In: page, A.L, Miller, R.H., Keeney, R.R. (Eds), Methods of Soil Analysis, Part 2. Aragon Monogr,9,ASA and SSSA, Madison, WI.

Bhargava A., Shukla S., and Ohri D. 2008. Chenopodium: a prospective plant for phytoextractio. *Industrial Crops and Products*, 23, 73–87.

Cheraghi M., Balmaki B. 2007. Investigation of environmental effects of lead and zinc mine of blacksmiths on "Lashgardar" protected area of Hamedan province. *Environmental Sciences and Technology,* 9(3): 175- 183 (In Persian)

Daharazma B., Rahmati Sh., Asghari H.R., Sadeghian M. 2015. Evaluation of the effect of abandoned copper beet copper mine on the concentration of heavy elements in soil and native plants of the region (southwest of Abbasabad). 27(10): 81-94. (In Persian)

Das S., Goswami S., and DasTalukadar A. 2016. Physiological responses of water hyacinth, Eichhornia crassipes Solms, to cadmium and its phytoremediation potential. *Turkish Jiurnal of Biology*, 40: 84-94.

Falahati Marvast A., Hoseinipor A., and Tabatabaei S.H. 2013. Effect of salinity and sewage sludge on heavy metal availability and uptake by barley plant. Journal of Water and Soil *(*Agricultural Sciences and Industries), 27(5): 997-985. (In Persian)

FAO. 2011. Quinoa; an acient crop to contribute to world food security. 63p.

Flowers T.J. 2004 Improving crop salt tolerance. *Journal of Experiment Botany*, 55(396): 307-319.

Granato T.C., Pietz R.I., Knafl G.J., Carlson C.R., Tata J.P., and Lue-Hing C. 2004. Trace element concentrations in soil, corn leaves, and grain after cessation of biosolids applications. *Journal of Environmental Quality,* 33: 2078–2089.

Grobelak A., Placek A., Grosser A., Singh B.R., Almås A.R., Napora A., and Kacprzak M. 2017. Effects of single sewage sludge application on soil phytoremediation. *Journal of Cleaner Production*, 155: 189-197.

Gupta A.K., and Sinha S. 2007. Phytoextraction capacity of the *Chenopodium album* L. grown on soil amended with tannery sludg*e. Bioresource Technology*, 98: 42-44.

Hesse P.R. 1971. A text book of soil chemical analysis. *John Murray*, London.

Hejazizadeh A., Gholamalizadeh Ahangar A., and Ghorbani M. 2016. Effect of biochar on lead and cadmium uptake from applied paper factory sewage sludge by sunflower (*Heliantus annus* L.). *Water and Soil Science,* 26(1/2): 259-271. (In Persian)

Jaikishun S., Li W., Yang Z., and Song S. 2019. Quinoa: In perspective of global challenges. *Agronomy*, 9: 176-190.

Jia Y., Tang S., Wang R., Ju, X., Ding Y., Tu S., and Smith D.L. 2010. Effects of elevated CO_2 on growth, photosynthesis, elemental composition, antioxidant level and phytochelatin concentration in Loliummutiforum and Loliumperenne under Cd stress. *Journal of Hazardous Materials*, 180: 384-394.

Kabata-Pendias, A., and Pendias H. 2000. *Trace element in soils and plants* (3th Ed.).CRC Press. Boca Raton London New York Washington, D.C.

Karimi A., Khodaverdiloo H., and Rasouli-Sadaghiani M.H. 2018. Microbial-enhanced phytoremediation of lead contaminated calcareous soil by *Centaurea cyanus* L. *Clean - Soil, Air, Water*. 46(2): 1700665.

Karimi A., Khodaverdiloo, H., and Rasouli-Sadaghiani M.H. 2018. Plant tolerance, accumulation and remediation of Pb by three rangeland plant species in a calcareous soil in west Azerbaijan province . *Journal of Natural Environment,* 70(4): 907-922. (In Persian)

Karimi A., Khodaverdiloo, H., and Rasouli Sadaghiani, M.H. 2013. Enhanced soil Pb extraction by acroptilon (*Acroptilon Repens*) through inoculation with some arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(3): 193-210. (In Persian)

Khodaverdiloo H., Fengxiang X.H., Hamzenejad Taghlidabada R., Karimi A., Moradi N. and Kazery J.A. 2020. Potentially toxic element contamination of arid and semiarid soils and its phytoremediation. *Arid Land Research and Managment,* 57: 135-165.

Khodaverdiloo H. and Hamzenejad Taghlidabad R. 2014. Phytoavailability and potential transfer of Pb from a salt-affected soil to *Atriplex verucifera*, *Salicornia europaea* and *Chenopodium album. Chemistry and Ecology*, 30(3): 216-226.

Lwina C.S., Seoa B.H., Kima H.U., Owensb J., and Kim K.R. 2018. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality-a critical review. *Soil Science and Plant Nutrition,* 64: 156-167.

Marofi S., Parsafar N., Rahim GH., Dashti F., and Marofi H. 2013. The effects of wastewater reuse on potato growth properties under greenhouse-lysimeteric condition. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10: 133-140.

Mortazavi S., Rahmani G., and Chamani A. 2017. Biomonitoring of heavy metals using *Phragmites australis* in Hashilan wetland, Kermanshah. *Environmental Science and Technology*, 19 (4): 69-67. (In Persian)

Naderi M.R., Danesh Shahraki A., and Naderi R. 2013. Some enhancer methods of heavy metals phytoremediation efficiency. *Hyuman and Environment*, 10(22): 38-28. (In Persian)

Nazari M., Shariatmadari H., Afioni M., Mobli M., and Rahili Sh. 2006. Effect of industrial sewage-sludge and effluents application on concentration of some elements and dry matter yield of Wheat, Barley and Corn. *Journal Of Science And Technology Of Agriculture And Natural Resources Source* , 10(3): 110-97. (In Persian)

Nelson D.W., and Sommers L.E. 1986. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp.539-579. In: Page AL (ed). Methods of soil analysis. Part 2. Am. Soc. Agron., Madison, WI.USA.

Ogundiran M.B., Mekwunyei N.S., and Adejumo S.A. 2018. Compost and biochar assisted phytoremediation potentials of *Moringa oleifera* for remediation of lead contaminated soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2): 2206-2213.

Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., and Dean C.A. 1954. Estimation of available phosphorous in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U.S. Department of Agricultur Circular,* No. 939, 19(1945).

Ortiz O., and Alkaniz J.M. 2006. Bioaccumulation of heavy metals in Dactylis glomerata L. growing in a calcareous soil amended with sewage sludge. *Journal of Bioresource Technology*, 97: 545-552.

Park J. H., Lamb D., Paneerselvam P., Choppala G., Bolan N., Chung J.W. 2011. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials,* 185: 549-574.

Phillips D. and Human L. 2015. Wetland plants as indicators of heavy metal contamination. *Marine Pollution Bulletin*, 15: 227-232.

Pérez-de-Mora A., Burgos P., Cabrera F., and Madejón E. 2007. "In Situ" amendments and revegetation reduce trace element leaching in a contaminated soil. *Water, Air and Soil Pollution*, 185: 209-222

Placek A., Grobelak A., and Kacprzak M. 2016. Improving the phytoremediation of heavy metals contaminated soil by use of sewage sludge. *International Journal of Phytoremediation*, 18: 605-618.

Sarwar, N., Imran, M. Shaheen, M. R Ishaque, W. Kamran, M. A Matloob, A. Rehim, A.and Hussain S. 2017. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere,* 171: 710-21.

SEPAC 1995. State Environmental Protection Administration of China, Beijing. Chinese environmental quality standards for soils.

Singh R.P., and Agrawal, M. 2010. Biochemical and physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) grown on different sewage sludge amendments rates. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,* 84(5): 606-612.

Singh S., Saxena R., Pandey K., Bhatt K., and Sinha S. 2004. Response of antioxidants in sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on different amendments of tannery sludge: its metal accumulation potential. *Chemosphere*, 57: 1663-1673.

Shrestha P., Bellitürk K., and Görres J.H. 2019. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil by Switchgrass: A comparative study utilizing different composts and coir fiber on pollution remediation, plant productivity, and nutrient leaching. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16: 1261-1276.

Vazquez S., Goldsbrough P., and Carpena R.O. 2009. Comparative analysis of the contribution of phytochelatins to cadmium and arsenic tolerance in soybean and white lupen. *Plant Physiology and Biochemistry,* 47: 63-67.

Wei S., Li Y., Zhoua Q., Srivastavac M., Chiud S., Zhane J., Wua Z., and Sun T. 2010. Effect of fertilizer amendments on phytoremediation of Cd-contaminated soil by a newly discovered hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Journal of Hazardous Materials,* 176: 269-273.

Wilson C., Redd J.J., and Abo-Kassem E. 2002. Effect of mixed-salt salinity on growth and ion relations of a quinoa and a wheat variety. *Journal of Plant Nutrition*, 25(12): 2689-2704.

Yang X.E., Long X.X., Calvert D.V., and Stofella P.J. 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Znhyperaccumulating plant species (*Sedium alfredii Han*ce). *Plant Soil*, 259: 181-189.

Effect of sewage sludge on the phytoremediation of Muteh gold factory tailings by quinoa (*Chenopodium quinoa* L.)

Fatemeh Afzalinejad[1], Somayeh Ghasemi[2*]

(Receive: December 2020 Accept: January 2021)

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of sewage sludge on the uptake of some heavy metals by Quinoa (Chenopodium quinoa L.) from the tailings of Mouteh Gold Mine. For this purpose, the effects of 0, 20 and 40 ton ha-1 sewage sludge on the concentration, uptake, bioconcentration and translocation factor of Pb, Cd and Ni in the three cultivars of Quinoa (Q29, Red carina and Titicaca) were investigated. According to the results, the effect of Quinoa cultivar, different levels of sewage sludge and the interaction effects of treatments on the Pb and Ni concentration of roots and shoots, root Cd concentration and bioconcentration and translocation factor of Pb were significant. In the Titicaca cultivar, application of 40 ton ha-1 of sewage sludge significantly increased root and shoot Ni concentration and root Cd concentration, and significantly decreased shoot Pb concentration and bioconcentration and translocation factor o Pb. In the Red carina cultivar, the concentration of root and shoot Pb, biological accumulation factor of Pb, root Cd concentration and shoot Ni concentration of plants treated with 40 ton ha-1 of sewage sludge were significantly higher than control treatment. Also, application of sewage sludge significantly reduced translocation factor of Cd and increased total uptake and biological accumulation factor of Ni. In general, the highest shoot Pb concentration, total Pb uptake, biological accumulation factor of Cd, and translocation factor of Cd and Ni were observed in cultivar Q29. Whereas, shoot Cd and root Ni concentrations of the Red carina and Titicaca cultivars were significantly higher than the Q29 cultivar. Based on the results, Q29 cultivar has good accumulation ability for the studied heavy metals and can be a suitable species for the remediation of contaminated soils.

Keywords: Heavy metals, Mouteh gold mine, Phytoremediation, Quinoa, Sewage sludge

Afzalinejad F. and Ghasemi S. 2022. Effect of sewage sludge on the phytoremediation of Muteh gold factory tailings by quinoa (Chenopodium quinoa L.). *Applied Soil Research*, 9(4): 102- 115.

1. Former M. Sc. Student, Soil Science Department, Faculty of Natural Resources, University of Yazd, Iran.
2. Associate Professor, Soil Science Department, Faculty of Natural Resources, University of Yazd, Iran
*Corresponding Author Email: s.ghasemi@yazd.ac.ir