

اثر منابع پتاسیم بر جذب و کاهش تنش کادمیوم توسط کلزا (*Brassica napus* L.)

زهرا قربانپور^۱، احمد غلامعلی زاده آهنگر^{۱*}، امیر لکزیان^۲، ابوالفضل عباسپور^۳

۱. گروه علوم مهندسی خاک دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل

۲. گروه علوم مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد.

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۰۵

چکیده

کادمیوم از فلزات سنگین و عنصری سمی برای گیاهان است که از طریق فعالیت‌های مختلف بشر وارد خاک می‌شود. به منظور بررسی تأثیر استفاده از کودهای کلرور و سولفات پتاسیم بر جذب کادمیوم و ارتقای گیاه‌پالایی آن توسط گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) رقم مدنا، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ سطح پتاسیم (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم) از منابع کلرور و سولفات پتاسیم به‌طور جداگانه و ۳ سطح کادمیوم (صفر، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم) از منبع نیترات کادمیوم در سه تکرار، در گلخانه مرکز تحقیقات مشهد انجام شد. با توجه به نتایج تجزیه واریانس اثرات کادمیوم و کودهای پتاسیم و برهمکنش آن‌ها بر مقدار کادمیوم ریشه و اندام هوایی، وزن خشک و پتاسیم ریشه اثری معنی‌دار داشت ($p < 0.01$). همچنین بر اساس نتایج، اثرات اصلی کودهای پتاسیم و کادمیوم بر وزن خشک و پتاسیم اندام هوایی اثر معنی‌داری داشت ($p < 0.01$). در حالی که اثر برهمکنش آن‌ها بر وزن خشک و پتاسیم اندام هوایی معنی‌دار نشد. همچنین کاربرد کادمیوم نشان داد که با افزایش کادمیوم، پتاسیم اندام هوایی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و در تمام سطوح پتاسیم کاهش معنی‌داری را نشان دادند. در این بررسی بین کودهای پتاسیم تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به طوری که بالاترین مقدار جذب کادمیوم با مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم به‌صورت کلرور پتاسیم به دست آمد. بنابراین بر اساس نتایج آزمایش گلخانه‌ای با مصرف کود کلرور پتاسیم کارایی گیاه‌پالایی بهبود یافت اگرچه تداوم تحقیقات در شرایط مزرعه ضروری به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: فلز سنگین کادمیوم، کود پتاسیم، گیاه‌پالایی، گیاه کلزا

مقدمه

کارآمدترین روش‌های پیشنهادی در زمینه آلودگی‌زدایی فلزات سنگین از خاک روش گیاه‌پالایی است (Kramer, 2005). گزارش‌هایی در مورد استفاده از کودهای پتاسیم به همراه گیاهان برای جذب کادمیوم و ارتقای گیاه‌پالایی وجود دارد (Khosravi et al., 2009). یون کادمیوم می‌تواند سریعاً به شکل کمپلکس‌های پایدار با کلرور درآید. کلرورها بسیار متحرک بوده و در شرایط خاص می‌توانند فاکتور مهمی در توزیع کادمیوم خاک باشند (Wu et al., 2002). بینگ‌هام و همکاران (Bingham et al., 1986) برای اولین بار پژوهشی در مورد اثر کلرور و سولفات پتاسیم بر فراهمی کادمیوم انجام

آگاهی در مورد آلاینده‌های خاک و توجه بیشتر به راهکاری مناسب برای کاهش آن‌ها، ضرورتی انکارناپذیر است (Sharma and Dubey, 2005). از جمله آلاینده‌های موجود فلزهای سنگین هستند که به‌طور طبیعی، یا بر اثر فعالیت‌های انسان وارد محیط می‌شوند. مهم‌ترین منابع طبیعی ورود فلزهای سنگین به طبیعت هوازدگی کانی‌ها، فرسایش و فعالیت آتشفشانی است. در مورد منابع بشری، می‌توان به استخراج و فرآوری کانی‌ها به‌خصوص سنگ فسفات، فرآیندهای صنعتی و به کار بردن لجن فاضلاب و کودهای فسفاتی اشاره کرد (Sabiha-Javied et al., 2009). یکی از

افزایش یافته در نتیجه مقدار جذب زیاد می‌شود (Brown et al., 1994). هدف از این پژوهش بررسی استفاده از کودهای پتاسیم (کلرور و سولفات پتاسیم) بر جذب کادمیوم و تأثیر تنش کادمیوم بر گیاه کلزا (*Brassica napus*. L) رقم مدنا است.

مواد و روش‌ها

قبل از کاشت گیاه کلزا نمونه خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری که معمولاً به‌عنوان خاک زراعی استفاده می‌شود، تهیه گردید. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک پس از گذراندن از الک ۲ میلی‌متری اندازه‌گیری شد (جدول ۱). بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Or, 2002)، ماده آلی به روش والکی و بلک (Walkley and Black., 1934)، درصد ظرفیت زراعی، پ‌هاش، قابلیت هدایت الکتریکی^۱ در عصاره ۱:۱ خاک به آب (Ehyaee and Asgharzadeh, 1996)، نیتروژن کل به روش کج‌دال (Page et al., 1982)، فسفر به روش اولسن (Olsen et al., 1954)، پتاسیم قابل دسترس از روش عصاره-گیری با استات آمونیوم (Helmke and Spark, 1996)، تعیین مقدار کادمیوم قابل دسترس در خاک با روش لیندزی و نورول (Lindsay and Norvell, 1978) توسط دستگاه جذب اتمی شیماتزو (مدل AA-670) اندازه‌گیری شد. جهت کشت گلخانه‌ای مقادیر مورد نیاز کادمیوم (سه سطح صفر، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم) از منبع نترات کادمیوم به خاک‌ها افزوده شد (Mohamadiyan et al., 2016). نمونه‌های تیمار شده تا حد رطوبت ظرفیت زراعی مرطوب شده و نمونه‌های خاک به مدت ۲ ماه در رطوبت ظرفیت زراعی نگهداری شد. ابتدا خاک درون نایلون‌های مخصوص ریخته شد و سپس تیمارها که شامل ۴ سطح کودهای پتاسیم (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک) از منابع کلرور و سولفات پتاسیم بود به خاک هر نایلون اعمال و کاملاً مخلوط شدند. پس‌از این مدت نمونه‌ها هوا خشک و پس از کوبیدن به درون گلدان‌های ۳ کیلوگرمی منتقل گردید (Black and Evans, 1965). آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و با ۷۲ گلدان اجرا شد.

از گیاه کلزا رقم مدنا برای کشت استفاده شد. برای این منظور در ابتدا ۸ عدد بذر در گلدان‌ها کشت شد. پس از ظهور

دادند و به این نتیجه رسیدند که آنیون‌های کلرور و سولفات پتاسیم جذب کادمیوم را توسط برگ چغندر افزایش می‌دهد. اسپارو و همکاران (Sparrow et al., 1994) نشان دادند که استفاده از کودهای کلرور و سولفات پتاسیم سبب جذب بیشتر کادمیوم در غده سبب‌زمینی شد. در پژوهشی اثر تیمارهای کودی سولفات و کلرور و نترات پتاسیم بر روی گیاه گندم آزمایش و نتیجه گرفته شد که پایین‌ترین نسبت ضریب انتقال کادمیوم در سطح سولفات و نترات و بالاترین ضریب انتقال کادمیوم در سطح کلرور است که علت آن را تشکیل گونه‌های کمپلکس محلول کلرور کادمیوم و انتقال بیشتر این کمپلکس‌ها به سمت ریشه گیاه می‌توان ذکر کرد (Zhao et al., 2003). در بررسی دیگری که یئو و همکاران (Ueno et al., 2005) انجام دادند دریافتند که با مصرف کلرور پتاسیم آزادسازی کادمیوم تجمع یافته در خاک افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش سو و همکاران (Su et al., 2007) نشان دادند که با مصرف کود سولفات پتاسیم، جذب کادمیوم توسط اندام هوایی گندم افزایش و آلودگی خاک با این فلز کاهش یافت. گائو و همکاران (Gao et al., 2011) در بررسی اثر کلرور پتاسیم بر غلظت‌های کادمیوم و روی در دانه گندم به این نتیجه رسیدند که افزودن کلرور پتاسیم سبب افزایش غلظت کادمیوم و روی در دانه گندم شده است. در تحقیق دیگری پژوهشگران با اعمال تیمارهای صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم در گیاهان شاهدانه، کتان، کرچک و بادام‌زمینی، گزارش دادند که بیشترین غلظت کادمیوم در ریشه شاهدانه و بادام‌زمینی مشاهده شد (Shi and Cai, 2009). در پژوهشی که بر جذب کادمیوم و روی در تربچه و شاهی انجام شد این نتیجه به دست آمد که با افزایش سطوح کادمیوم در خاک، مقدار کادمیوم در غده تربچه نیز افزایشی معنی‌دار یافت (Mohammadi et al., 2006). هائو و همکاران (Hao et al., 2012) در تحقیقی که انجام دادند به این نتیجه دست یافتند که کاربرد کلرور پتاسیم غلظت و ضریب تراکم زیستی کادمیوم را در گیاه آفتابگردان به‌طور محسوسی افزایش داد. در یک بررسی مشخص شد که مقدار جذب فلز کادمیوم و روی توسط گیاه در شرایطی که از کلرور پتاسیم استفاده شده بود، افزایش یافت. محققین از این بررسی چنین استدلالی داشتند که به علت تشکیل کمپلکس-های محلول کادمیوم کلرور تحرک و زیست‌فراهمی کادمیوم

1. Electrical Conductivity

خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت اندازه‌گیری شد (Black and Evans, 1965). نمونه‌ها برای تجزیه و اندازه‌گیری غلظت پتاسیم و کادمیوم آسیاب، پس از هضم، غلظت پتاسیم با استفاده از دستگاه شعله نوری (مدل B3/8) و غلظت کادمیوم توسط دستگاه جذب اتمی شیماتزو (مجهز به کوره گرافیتی مدل AA-670) اندازه‌گیری شد.

گیاهچه، بذرهاى کلزا به ۴ عدد در هر گلدان کاهش یافت. گلدان‌ها به روش توزین و با آب مقطر تا رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی آبیاری شدند. کودهای پرمصرف موردنیاز گیاه کلزا (نیتروژن، فسفر، پتاسیم) بر اساس آزمون خاک به نمونه‌ها افزوده شد (Khosravi et al., 2009). پس از دو ماه، بخش هوایی و ریشه به‌طور جداگانه در هر گلدان برداشت گردید. وزن خشک ریشه‌ها و اندام هوایی پس از شستشو و

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده برای کشت گلخانه‌ای

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the used soil in greenhouse cultivation

Cd	K _{ava}	P _{ava}	Mn _{ava}	Fe _{ava}	Zn _{ava}	Cu _{ava}	OM	N _{total}	رس سیلت شن			Soil texture	FC	EC	pH
									Sand	Silt	Clay				
------(mg.kg ⁻¹)-----									-----%-----						
0.61	119	6.4	4.32	2.12	0.48	0.74	1.5	0.06	28	48	24	لوم (Loam)	22	3.22	8

سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرور پتاسیم و سولفات پتاسیم در تیمار ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته است (شکل ۲).

در تیمار ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرور پتاسیم و سطح ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات پتاسیم نسبت به شاهد غلظت کادمیوم ریشه را افزایش داد (شکل ۱). عابدی و همکاران (Abedi et al., 2015) در تحقیقی بیان داشتند که غلظت کادمیوم در ریشه گوجه‌فرنگی و کاهو بیشتر از ساقه بوده است. کادمیوم توسط ریشه جذب می‌شود و به اندام هوایی انتقال می‌یابد، این نتیجه با نتایج میرلز و همکاران (Mireles et al., 2004) و عابدی و همکاران (Abedi et al., 2001) که بالا بودن غلظت عناصر سنگین (Cd, Pb, As, Ni) را در ریشه گیاه نسبت به اندام هوایی گزارش کرده بودند مطابقت دارد. هم‌چنین، سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هر دو کود نسبت به سطح شاهد باعث افزایش معنی‌دار غلظت کادمیوم اندام هوایی شده است (شکل ۲).

کمترین مقدار کادمیوم ریشه و اندام هوایی در سطح شاهد (بدون کادمیوم) و بیشترین مقدار کادمیوم در سطح ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم با کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرور پتاسیم به دست آمد (شکل‌های ۱ و ۲).

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری -MSTAT C و SPSS و مقایسه میانگین تیمارها و گروه‌بندی آن‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام گرفت. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار اکسل ترسیم گردید.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثرات کادمیوم و کودهای پتاسیم و برهمکنش آن‌ها، بر میزان پتاسیم و کادمیوم ریشه و وزن خشک ریشه اثر معنی‌داری ($P < 0.01$) داشته است. هم‌چنین اثر کودهای پتاسیم و کادمیوم و برهمکنش آن‌ها، اثر معنی‌داری بر کادمیوم اندام هوایی داشت ($P < 0.01$).

نتایج نشان داد که اثرات اصلی کودهای پتاسیم و کادمیوم اثر معنی‌داری ($P < 0.01$) بر وزن خشک و پتاسیم اندام هوایی داشت، در صورتی‌که اثر برهمکنش آن‌ها بر وزن خشک و پتاسیم اندام هوایی معنی‌دار نشد.

در تیمار ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، کاربرد سطوح ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرور پتاسیم و سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات پتاسیم نسبت به شاهد باعث افزایش غلظت کادمیوم ریشه گیاه شده است (شکل ۱). هم‌چنین غلظت کادمیوم اندام هوایی نیز در

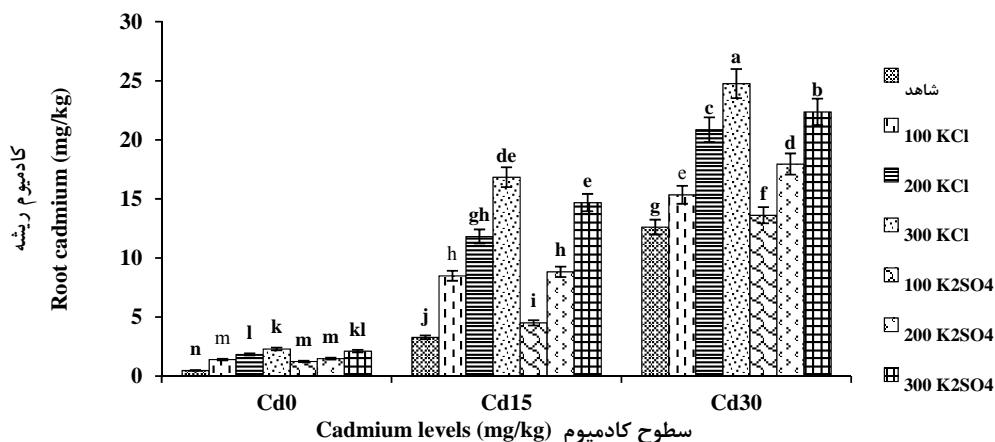
جدول ۲. میانگین مربعات برای خصوصیات اندازه‌گیری شده در گیاه تحت تأثیر کادمیوم و پتاسیم

Table 2. Mean squares for measurements characteristics under effects of Cd and K in plant

منابع تغییرات S.O.V	df	کادمیوم ریشه Cd of roots	کادمیوم اندام هوایی Cd of shoots	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	پتاسیم ریشه Root potassium	پتاسیم اندام هوایی Shoot potassium
Cd کادمیوم	2	28953.48**	8078.30**	1.602**	27.842**	614.816**	480.10**
K پتاسیم	7	1499.44**	157.35**	0.289**	0.258**	13.489**	23.41**
کادمیوم*پتاسیم Cd*K	14	380.99**	43.96**	0.038**	0.001ns	4.770**	2.29ns
خطا Error	46	146.00	8.69	0.021	0.003	0.939	2.23
ضریب تغییرات (%) C.V%	-	7.25	8.62	10.258	2.669	6.586	9.68

ns و ** به ترتیب معنی‌داری در ۵ و ۱ درصد و غیر معنی‌دار.

*, ** and ns: Significant at 5 and 1% probability levels respectively and not significant.



شکل ۱. اثر برهمکنش کادمیوم و سطوح پتاسیم از دو منبع مختلف بر غلظت کادمیوم ریشه.

Fig. 1. Effect of interactions of cadmium and potassium levels from two different sources on root cadmium concentration.

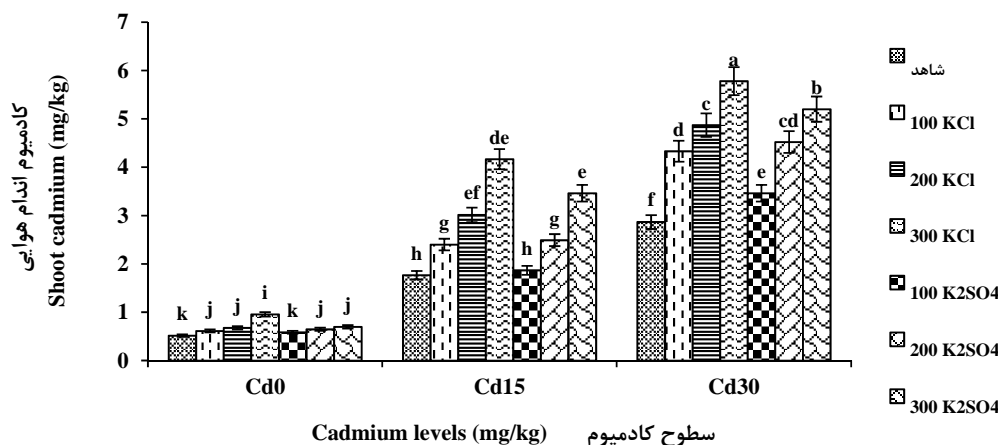
با کادمیوم محلول خاک تشکیل دهد و تشکیل این کمپلکس-های کلر کادمیوم موجب افزایش تحرک و جذب کادمیوم توسط گیاه می‌شوند (Grant et al., 1999).

برخی مطالعات نشان داد که استفاده از کودهای پتاسیم به صورت کلرور پتاسیم سبب افزایش جذب کادمیوم می‌شود (Zhao et al., 2003). در یک بررسی مشخص شد که افزودن کلرور پتاسیم به خاک سبب شد که حلالیت کادمیوم به طور معنی‌داری افزایش یافت (Nascimento et al., 2004).

به طور کلی زیست‌فراهمی کادمیوم خاک تحت تأثیر عوامل مختلف خاکی است که این عوامل توزیع کادمیوم بین فاز جامد و محلول و تشکیل گونه‌های یونی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Cui et al., 2004). واکنش خاک مهم‌ترین فاکتور در کنترل ضریب توزیع کادمیوم در خاک است یون کلر بسته به غلظت در محلول خاک می‌تواند کمپلکس‌های مختلفی را

مقدار جذب فلز کادمیوم توسط گیاه در شرایطی که از کلرور پتاسیم استفاده شده بود، افزایش یافت، آن‌ها بیان داشتند به علت کمپلکس‌های محلول کادمیوم کلرور تحرک و زیست-فراهمی کادمیوم افزایش یافته در نتیجه مقدار جذب زیاد می‌شود (Brown et al., 1994). گزارش شد که چون کادمیوم می‌تواند به‌آسانی در محدوده اسیدیته معمول خاک‌های کشاورزی به‌صورت محلول درآید بنابراین افزودن کود سولفات پتاسیم می‌تواند به علت اسیدی‌تر کردن خاک در افزایش جذب کادمیوم توسط گیاه مؤثر باشد (Schmidt, 2003). این نتایج با نتایج سو و همکاران (Su et al., 2007)، ثواقبی و ملکوتی (Savaghebi and Malakuti, 2000) و همکاران (Zhao et al., 2003) مطابقت دارد. همچنین گزارش شده که یون سولفات می‌تواند با Cd^{2+} تشکیل کمپلکس و زوج یون بدهد و کارایی جذب زوج یون $CdSO_4$ از محلول غذایی برابر Cd^{2+} بوده است (McLaughlin et al., 1998).

گزارش شده که تجمع کادمیوم در ذرت بعد از افزودن نمک کلرور پتاسیم به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است (Nigam et al., 2001). نمک کلرور سدیم نسبت به نمک سولفات و نمک نیترات سدیم فراهمی عنصر کادمیوم را در خاک و گیاه به مقدار بیشتری افزایش می‌دهد (Norvell et al., 2000). در مطالعه‌ای اثر شوری کلرور و سولفات پتاسیم بر جذب کادمیوم توسط برگ چغندر بررسی شد. چنین نتیجه گرفته شد که افزایش سطوح کلرور سبب افزایش چشم‌گیری در میزان کادمیوم در برگ شد (Bingham et al., 1986). گزارش شده است که کلرید پتاسیم زدایش و رهاسازی کادمیوم در خاک را نیز افزایش می‌دهد (Sakurai and Huang, 1996). گزارش شده است که فرم کود پتاسیمی مصرفی، غلظت کادمیوم را در ریشه و اندام هوایی گندم افزایش می‌دهد. آنیون‌های کلرور و سولفات به علت تشکیل کمپلکس با کادمیوم غلظت این فلز را در گیاه افزایش می‌دهند (Zhao et al., 2003). در یک بررسی مشخص شد که



شکل ۲. اثر برهمکنش کادمیوم و سطوح پتاسیم از دو منبع مختلف بر غلظت کادمیوم اندام هوایی.

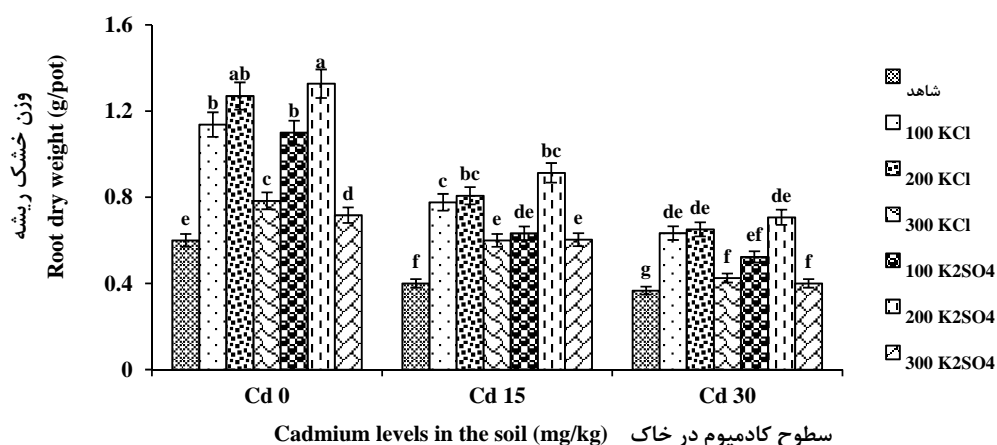
Fig. 2. Effect of interactions of cadmium and potassium levels from two different sources on shoot cadmium

در سطح صفر پتاسیم (شاهد)، با افزایش مقدار کادمیوم، وزن خشک ریشه کاهش یافت، به‌طوری‌که سطح صفر کادمیوم افزایش معنی‌داری را نسبت به سایر سطوح کادمیوم نشان دادند (شکل ۳). هنگام استفاده از کودهای پتاسیم سطوح (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرور و سولفات پتاسیم) در تمامی سطوح کادمیوم کاهش معنی‌داری

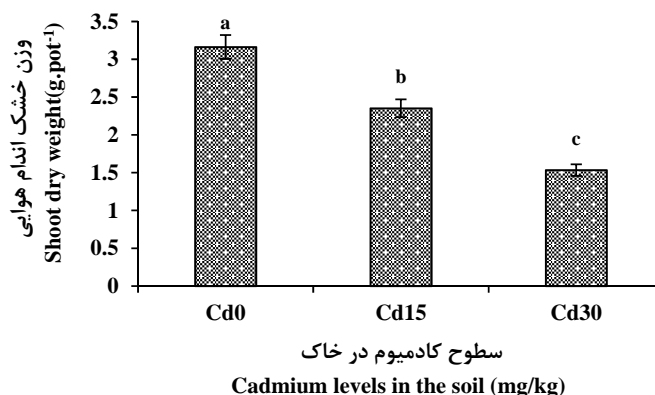
نتایج اثرهای متقابل سطوح کودهای پتاسیم و کادمیوم بر وزن خشک ریشه نشان داد، در تیمار صفر (شاهد)، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم با افزودن سطوح پتاسیم، وزن خشک ریشه نسبت به شاهد افزایش یافت که این افزایش در تمام سطوح کاربرد کودهای پتاسیم معنی‌دار بود (شکل ۳).

تیمار صفر کادمیوم (شاهد) و کمترین مقدار نیز در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم به دست آمد (شکل ۴). افزایش مقادیر مختلف کودهای پتاسیم در این آزمایش از لحاظ آماری اثر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی داشت. به طوری که تیمارهای کلرور پتاسیم و سولفات پتاسیم سطوح ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم نسبت به شاهد افزایش داشت اما ۳۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک از دو منبع سولفات و کلرور پتاسیم به مقدار کمتری افزایش داشت (شکل ۵).

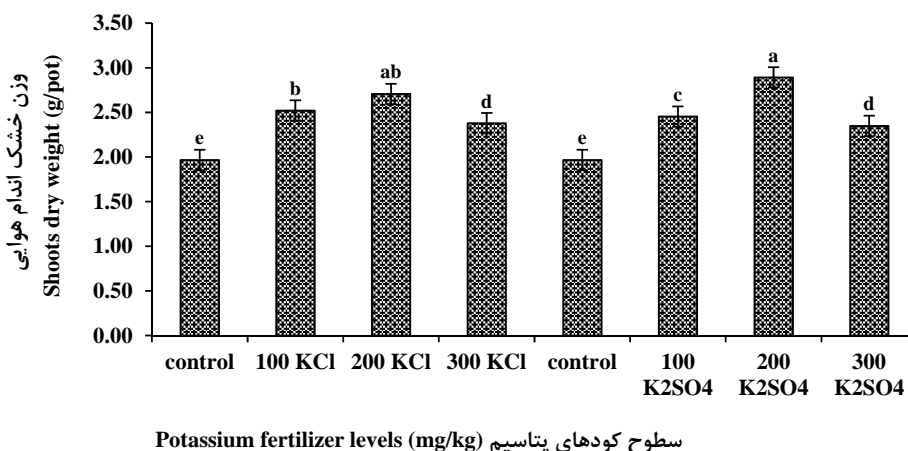
در وزن خشک ریشه مشاهده شد که این کاهش با افزایش سطح کادمیوم افزایش یافت (شکل ۳). بیشترین میزان وزن خشک ریشه به تیمار صفر کادمیوم (شاهد) در سطح ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات پتاسیم و کمترین میزان وزن خشک ریشه به تیمار ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم در سطح صفر پتاسیم (شاهد) مشاهده شد (شکل ۳). وزن خشک ریشه با افزودن مقادیر ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک، به طور معنی‌داری از لحاظ آماری کاهش یافت. بیشترین وزن خشک اندام هوایی در



شکل ۳. اثر برهمکنش کادمیوم و سطوح پتاسیم از دو منبع مختلف بر وزن خشک ریشه. Fig. 3. Effect of interactions of cadmium and potassium levels from two different sources on root dry weight.



شکل ۴. تأثیر سطوح کادمیوم بر وزن خشک اندام هوایی کلزا. Fig. 4. The effect of cadmium levels on shoot dry weight in Canola.



شکل ۵. تأثیر سطوح پتاسیم از دو منبع مختلف بر وزن خشک اندام هوایی کلزا

Fig. 5. The effect of potassium levels from two different sources on shoot dry weight in Canola

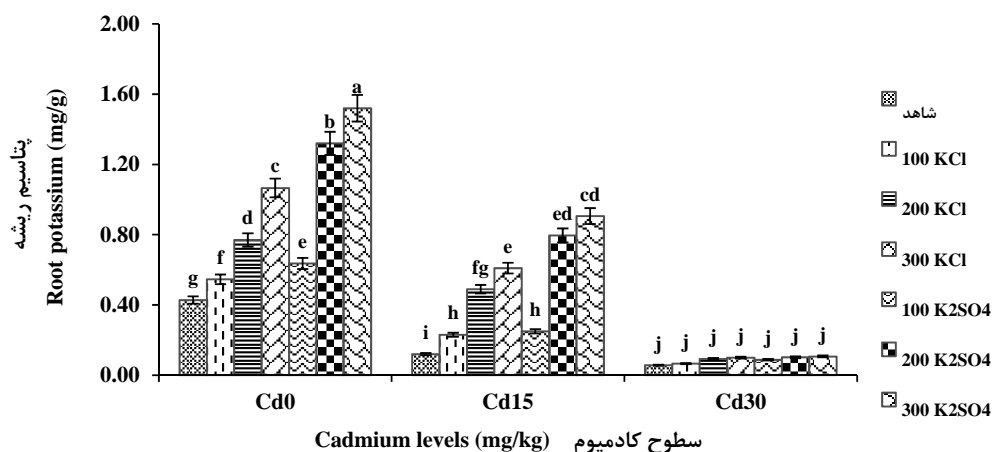
(1997) نشان داد کاهش رشد یکی از اثرات اولیه غلظت‌های سمی کادمیوم بر گیاهان است که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد. افزایش جذب کادمیوم موجب بروز عوارض نامطلوب در فیزیولوژی و متابولیسم گیاه شده و در نتیجه تولید ماده خشک کاهش یافت. با مصرف پتاسیم غلظت و جذب پتاسیم اندام هوایی نیز افزایش معنی‌داری نشان داد که نتایج در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. بررسی انجام‌شده نشان داد که اثرات کودهای پتاسیم و کادمیوم و برهمکنش آن‌ها، در تیمارهای شاهد (سطح صفر کادمیوم) و ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، بین سطوح مختلف کودهای پتاسیم از لحاظ جذب پتاسیم در ریشه اختلاف معنی‌داری دارند (شکل ۶). به طوری که بیشترین میزان جذب پتاسیم ریشه در تیمار شاهد (سطح صفر کادمیوم)، در سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات پتاسیم مشاهده شد (شکل ۶). در تیمار ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، بین سطوح مختلف کودهای پتاسیم از لحاظ میزان جذب پتاسیم ریشه اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۶).

در سطح صفر پتاسیم (شاهد)، با افزایش سطح کادمیوم، پتاسیم ریشه کاهش یافت، به طوری که سطح صفر میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم افزایش معنی‌داری را نسبت به سایر سطوح کادمیوم نشان دادند (شکل ۶). به هنگام استفاده از کودهای پتاسیم به مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هم از منبع کلرور و هم سولفات، در تمامی سطوح کادمیوم کاهش معنی‌داری در پتاسیم ریشه مشاهده شد که

علت کاهش عملکرد ماده خشک در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم را می‌توان به جذب بیشتر کادمیوم در این تیمار مربوط دانست. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که بهترین سطح کود پتاسیم که اثر مثبتی بر روی وزن خشک اندام هوایی داشته تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات پتاسیم است (شکل ۵). در مطالعه‌ای مشخص شد که وجود آنیون‌هایی مثل کلرور باعث بالا رفتن غلظت کادمیوم در گیاهانی مثل جو، چغندر قند، تربچه، آفتابگردان و سورگوم شد و به علت مسمومیت این گیاهان با فلز سنگین مقدار زیست‌توده نسبت به شاهد کاهش یافته بود (Mclaughlin et al., 1998). در یک بررسی که در آن اثر کود سولفات پتاسیم بر میزان جذب کادمیوم توسط گیاه ذرت، سورگوم و آفتابگردان مطالعه شده بود. مشخص شد که زیست‌توده گیاه ذرت نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری نداشت اما زیست‌توده گیاه سورگوم نسبت به شاهد ۳۰٪ و زیست‌توده گیاه آفتابگردان نسبت به شاهد ۱۱٪ کاهش یافت (Wenger et al., 2000). گزارش شده که افزایش برخی از کودها که واکنش خاک را پایین می‌برند (کودهای نیتروژنی آمونیومی و سولفات‌ها و فسفات‌ها و حتی کلات‌ها) سبب کاهش زیست‌توده آفتابگردان می‌شوند و پس از چند روز علائم کلرور و نکروزه شدن در گیاه آشکار می‌شود که علت آن را افزایش حلالیت عناصر سنگین در خاک آلوده و در نتیجه تجمع فلز سنگین در اندام هوایی آفتابگردان ذکر کرده‌اند (Davies, 1990). نتایج بررسی کوستا و اسپیتز (Costa and Spitz,

نسبت به شاهد شد (Keck, 1978). در تحقیقی که گومز و همکاران (Gomes et al., 2012) انجام دادند مشاهده کردند با افزایش سطح کادمیوم میزان عناصر نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، روی و منگنز در گیاه اکالیپتوس نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری یافت.

این کاهش با افزایش سطح کادمیوم افزایش یافت (شکل ۶). در تحقیقی نشان داده شد که بعد از در معرض قرار گرفتن نیم‌ساعته ریشه گیاه یولاف با سولفات کادمیوم، از جذب پتاسیم توسط ریشه، نسبت به شاهد تا ۸۰ درصد جلوگیری می‌گردد و همچنین پیش تیمار دوساعته اجزای ریشه با سولفات کادمیوم مانع جذب ۱۵ درصدی پتاسیم در ریشه

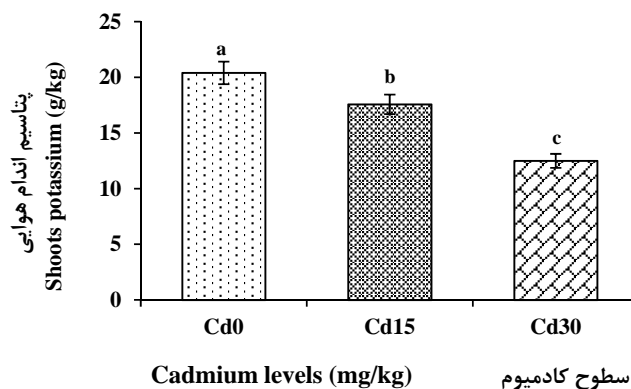


شکل ۶. اثر برهمکنش کادمیوم و کودهای پتاسیم بر غلظت پتاسیم در ریشه.

Fig. 6. Effect of interactions of cadmium and potassium fertilizers on root potassium concentration.

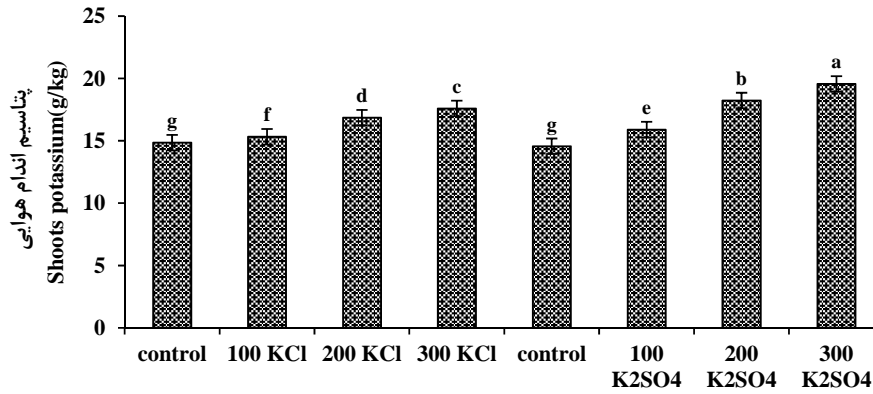
کیلوگرم کادمیوم به دست آمد (شکل ۷). بررسی سطوح کودهای پتاسیم نشان داد که افزودن کودهای پتاسیم باعث افزایش جذب پتاسیم اندام هوایی شد، به طوری که بیشترین میزان پتاسیم اندام هوایی در سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات پتاسیم مشاهده گردید (شکل ۸).

همچنین نتایج تیمار کادمیوم نشان داد که با افزایش کادمیوم، پتاسیم اندام هوایی به طور معنی‌داری کم شد و تمام سطوح آن کاهش معنی‌داری را نشان دادند (شکل ۷). بیشترین میزان پتاسیم اندام هوایی در سطح صفر کادمیوم و کمترین میزان پتاسیم اندام هوایی در سطح ۳۰ میلی‌گرم در



شکل ۷. تأثیر کاربرد کادمیوم بر غلظت پتاسیم در اندام هوایی کلزا

Fig. 7. The effect of application of cadmium on shoot potassium concentration in Canola.



سطوح کودهای پتاسیم (mg/kg) Potassium fertilizer levels

شکل ۸. تأثیر کاربرد سطوح پتاسیم از دو منبع مختلف بر غلظت پتاسیم در اندام هوایی کلزا
 Fig. 8. The effect of application of potassium levels from two different sources on shoot potassium concentration in Canola

کادمیوم ظرفیت بافری پتاسیم خاک را تا ۲۰ درصد کاهش داده و آلودگی خاک با کادمیوم از طریق تغییر سینتیک جذب و ظرفیت بافری و توزیع پتاسیم بین فرم‌های مختلف، قابلیت جذب پتاسیم را کاهش می‌دهد (Savaghebi and Malakuti, 2000).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این بررسی نشان داد که مصرف کود پتاسیمی از هر دو منبع سولفات پتاسیم و کلرید پتاسیم می‌تواند در افزایش کارایی گیاه‌پالایی خاک آلوده به کادمیوم و تنش کادمیوم مؤثر باشد ولی تأثیر کود کلرور پتاسیم در این زمینه بیشتر است که می‌تواند ناشی از تشکیل گونه‌های محلول کلر کادمیوم و افزایش غلظت کادمیوم محلول و جذب آن توسط گیاه باشد.

سمیت کادمیوم باعث کمبود پتاسیم در داخل گیاه می‌گردد. معمولاً عناصر سنگین در جذب و انتقال عناصری مانند کلسیم، منیزیم، پتاسیم و فسفر در گیاه دخالت دارد (Das et al., 2000). پتاسیم باوجود اینکه در ساختمان بافت‌ها شرکت ندارد اما نقش‌های مهمی را در بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیک از قبیل فتوسنتز، حفظ آماس، هدایت روزنه‌ای، تنظیم اسمزی، فعالیت آنزیمی، توسعه سلولی را ایفا می‌کند (Mengel and Kirkby, 1987; Marschner, 1995). گزارش شده که با افزایش غلظت کادمیوم در خاک فعالیت کلسیم، منیزیم و پتاسیم در محلول خاک به ترتیب $Ca < Mg < K$ زیاد شده در نتیجه نسبت پتاسیم به مجموع کلسیم و منیزیم و عامل شدت پتاسیم و هم‌چنین ظرفیت بافری پتاسیم خاک کاهش می‌یابد. با مصرف پتاسیم نسبت آن در فازهای تبادلی و محلول افزایش می‌یابد (Yang and Skogley, 2008). در بررسی دیگر گزارش گردیده که

منابع

Abedi, K.J., Afyuni, M., Mostafazdeh, B., Bagheri, M.R., 2001. Influence of treated waste water and irrigation systems on soil physical properties in Isfahan province. In: Ragab, R., Pearce, G., Kim, J.C., Nairizi, S., Hamdy, A. (eds.), Proceeding of International Workshop on Wastewater Reuse Management, 52nd IEC Meeting and 1st Asian Regional Conference of

the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Seoul, Korea, pp. 165-173.
 Abedi, K.J., Matin, N., Javahery Tehrani, M., 2015. Uptake of cadmium by cress, lettuce and tomato in Cd-contaminated soil. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture. 6(1), 41-53. [In Persian with English Summary].

- Black, C.A., Evans D.D., 1965. Methods of Soil Analysis. Part 1 and 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI. USA.
- Bingham, F.T., Garrison, S., Strong J.E., 1986. The effect of sulfate on the availability of cadmium. *Soil Science*. 141, 172-177.
- Brown, S. ., Chaney, R.L., Angle, J. S., Baker, A. J. M., 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc and cadmium-contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*. 23, 1151-1157.
- Costa, G., Spitz, E., 1997. Influence of cadmium on soluble carbohydrates, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus*. *Journal of Plant Sciences*. 128, 131-140.
- Cui, Y., Dong, Y., Li, H., Wang, Q., 2004. Effect of elemental sulphur on solubility of soil heavy metals and their uptake by maize. *Environment International*. 30, 323-328.
- Das, P., Rout, R., Samantaray, S., 2000. Studies on cadmium toxicity in plants: A Review. *Environmental Pollution*. 98, 29-36.
- Davies, B. E., 1990. Applied soil trace element. *Field Crops Research*. 4, 451-459.
- Ehyaee, M., Asgharzadeh, A., 1996. Description of the methods of chemical analysis. Technical publication No. 983. Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran. [In Persian].
- Gao, X., Mohr, R.L., McLaren, D.L., Grant, C.A., 2011. Grain cadmium and zinc concentrations in wheat as affected by genotypic variation and potassium chloride fertilization. *Field Crops Research*. 122, 95-103.
- Gee, G.W., Or, D., 2002. Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C., (eds.), *Methods of soil analysis. Part, 4, Physical Methods*, Soils Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, pp. 255-293.
- Gomes, M.P., Marques, T.C.L.L.S.M., Carneiro, M.M.L.C., Soares, A.M., 2012. Anatomical characteristics and nutrient uptake and distribution associated with the Cd-phytoremediation capacity of *Eucalyptus canaldulenses* Dehnh. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 12, 481-495.
- Grant, C., Bailey, L., McLaughlin, M., Singh, B., 1999. Management factors which influence cadmium concentration in crops. In: McLaughlin, M., Singh, B., (eds.), *Cadmium in Soils and Plants*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 151-198.
- Hao, X.Z., Zhou, D.M., Li, D.D., Jiang, P., 2012. Growth, cadmium and zinc accumulation of ornamental sunflower (*Helianthus annuus* L.) in contaminated soil with different amendments. *Pedosphere*. 22(5), 631-639.
- Helmke, P.H., Spark, D.L., 1996. Potassium. In: Sparks, D.L., et al. (eds.), *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America. Inc. American Society of Agronomy. Inc. Madison, WI. pp. 551-574.
- Keck, R. W., 1978. Cadmium alteration of root physiology and potassium ion fluxes. *Plant Physiology*. 62(1), 94-96.
- Khosravi, F., Savaghebi, Gh. R., Farahbakhsh, M., 2009. Effect of potassium chloride on Cd uptake by canola and sunflower in a polluted soil. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology)*. 23(3), 28-35. [In Persian with English Summary].
- Kramer, U., 2005. Phytoremediation novel approaches to cleaning up polluted soils. *Current Opinion in Biotechnology*. 16, 133-141.
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42, 421-428.
- Marschner, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press, San Diego, USA. 889p.
- McLaughlin, M.J., Lambrechts, R.M., Smolders, E., Smart, M.K., 1998. Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard: II. Effects due to sulfate addition to soil. *Journal of Plant and Soil*. 202, 217-222.
- Mengel, K., Kirkby, E., 1987. *Principle of Plant Nutrition*. 4th ed. International Potash Institute, IPI, Bern. Switzerland. 685p.
- Mireles, A., Solis, C., Andrade, E., Lagunas-Solar, M., Pina, C., Flocchini, R.G., 2004. Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico City. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 219-220, 187-190.
- Mohammadi, M., Shiravani, S., Fotovat, A., Haghnia, Gh. H., 2006. Radishes and cress compared the absorption of zinc and cadmium and study their interactions. *Proceedings of the International Conference on Soil, Environment and Sustainable Development*, College of Agriculture and Natural Resources publications

- Tehran University, Karaj, Iran. pp: 317-318. [In Persian].
- Mohamadiyan, Z., Gholamalizade Ahangar, A., Ghorbani, M., Mohkami, Z., 2016. The effect of potassium fertilizers on lead and cadmium phytoremediation. *Journal of Water and Soil Conservation*. 23(3), 273-287. [In Persian with English Summary].
- Nascimento, C.W.A., Amarasiriwardena, D., Xing, B., 2006. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil. *Environmental Pollution*. 140, 114-123.
- Nigam, R., Srivastava, Sh., Prakash, S., Srivastava, M. M., 2001. Cadmium mobilization and plant availability: The impact of organic acids commonly extruded from roots. *Plant and Soil*. 203, 107-117.
- Norvell, W.A., Wu, J., Hopkins, D.G., Welch, R.M., 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium. *Soil Science Society of America Journal*. 64, 2162-8.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Wattenberg, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture. USA. NO. 939, 19p.
- Page, A.L., Miller, R.H., Do. Keeney, R., 1982. *Method of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological properties*. 2nd ed. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Publisher, Madison, USA.
- Sabiha-Javied, T., Mehmood, M.M., Chaudhry, M., Tufail, N., 2009. Heavy metal pollution from phosphate rock used for the production of fertilizer in Pakistan. *Irfan Microchemical Journal*. 91, 94-99.
- Sakurai, K., Huang, P. M., 1996. Influence of potassium chloride on desorption of Cd sorbed on hydroxyaluminosilicate-montmorillonite complex. *Soil Science and Plant Nutrition*. 42(3), 475-481.
- Savaghebi, Gh.R., Malakuti, M.G., 2000. The effects of interaction of cadmium and potassium on dry matter production on concentration and uptake cadmium and potassium in wheat. *Journal of Soil and Water*. 12(9), 44-53. [In Persian with English Summary].
- Schmidt, U., 2003. Enhancing phytoremediation: The effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals. *Journal of Environment Quality*. 32, 1939-1954.
- Sharma, P., Dubey, R.S., 2005. Lead toxicity in plants. *Plant Physiology*. 17, 35-52.
- Shi, G., Cai, O., 2009. Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops. *Biotechnology Advances*. 27, 555-561.
- Sparrow, L., Salardini, A.A., Bishop, A., 1994. Field studies of Cd in potatoes response of Cu., Russet Burband. *Australian Journal of Agricultural Research*. 45(1), 243-249.
- Su, Ch., Sun, L., Heng Sun, T., Ch, L., Guo, G., 2007. Interaction between cadmium, Lead and potassium sulfate in a Soil-Plant system. *Journal of Environmental Geochemistry and Health*. 29(5), 435-446.
- Ueno, D., Ma, J.F., Iwashita, T., Zhao, F.J., Grath, S.P., 2005. Identification of the form of Cd in the leaves of a superior Cd-accumulating ecotype of *Thlaspi caerulescens* using ¹¹³Cd-NMR. *Journal of Planta*. 221, 928-936.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. Chromic acid titration for determination of soil organic matter. *Soil Science*. 63, 251.
- Wenger, K., Keller, A., Attinger, W., 2000. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd from calcareous soils. *Environmental Science and Technology*. 34, 1778-1783.
- Wu, J., Norvell, W.A., Hopkins, D.G., Welch, R.M., 2002. Spatial variability of grain cadmium and soil characteristics in a durum wheat field. *Soil Science Society of America Journal*. 66, 268-75.
- Yang, J., Skogley, E., 2008. Copper and cadmium effects on potassium adsorption and buffering capacity. *Soil Science Society of America*. 54, 739-744.
- Zhao, Zh. Q., Zhu, Y. G., Li, H. Y., Smith, S. E., Smith, F. A., 2003. Effects of forms and rates of potassium fertilizers on cadmium uptake by two cultivars of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environment International*. 29(7), 973-978.