Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2019.272322.668081 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۱، فروردین ۱۳۹۹ (ص ۲۳۰-۲۱۷)

Effect of Cadmium and Lead Contamination on Biological Quality of Soil and Rapeseed (*Brassica napus*) Growth

ZEINAB AZADBAKHT[1], ALI BEHESHTI AL AGHA[1*], DANIYAL KAHRIZI[2], MAHIN KARAMI[1]
1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.
2. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.
(Received: Feb. 19, 2019- Revised: Sep. 2, 2019- Accepted: Sep. 7, 2019)

ABSTRACT

Cadmium and lead are heavy metals and cause toxic effects on plants. Soil, as one of the components of the ecosystem of the plant's growing environment and the habitat of diverse organisms, is encountered with a variety of biological stresses. Cadmium and lead have toxic and potential effects on the activity and composition of living organisms. Microbial parameters can be used to evaluate the quality of contaminated soils. The purpose of this study was to evaluate the effects of cadmium and lead contamination on soil quality and plant parameters in order to evaluate phytoremediation of rapeseed. This experiment was conducted in a completely randomized design with three replicates to investigate the effect of cadmium levels (0, 3, 5 and 10 mg/kg soil) and lead levels (0, 100, 300 and 600 mg/kg soil) on rapeseed plant (Brassica napus) in greenhouse conditions. Stem and root length, some physiological characteristics, cadmium and lead concentrations in shoot and root and some biological parameters of soil were evaluated. Based on the results of this study, increasing soil contamination of lead and cadmium lead to a significant increase ($P < 0.05$) in the concentration of these elements in the shoot and root and also in the metabolic coefficient (qco2). Cadmium and lead decreased significantly ($P < 0.05$) plant height, microbial biomass carbon (MBC), microbial respiration and substrate-induced respiration (SIR). Therefore, the elements of cadmium and lead cause changes in rapeseed and microorganisms in the soil.

Keywords: Soil contamination, Microbial biomass, Metabolic coefficient, Heavy metals.

* Corresponding Author's Email: beheshti@razi.ac.ir
www.SID.ir

Archive of SID

تأثیر آلودگی کادمیم و سرب بر کیفیت زیستی خاک و رشد گیاه کلزا (*Brassica napus*)

زینب آزادبخت[۱]، علی بهشتی آل آقا[۱*]، دانیال کهریزی[۲]، مهین کرمی[۱]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۳۰- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۶/۱۱- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۱۶)

چکیده

کادمیم و سرب جزء فلزهای سنگین بوده و باعث بروز اثرات سمی در گیاهان می‌شود. خاک به عنوان یکی از اجزای اکوسیستم محیط رشد گیاه و زیستگاه موجودات زنده متنوع، با انواع تنش‌های زیستی روبرو است. کادمیم و سرب اثرات سمی و بالقوه‌ای بر فعالیت و ترکیب موجودات زنده خاک دارند. پارامترهای میکروبی می‌توانند به منظور ارزیابی کیفیت خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرند. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر آلودگی کادمیم و سرب بر پارامترهای کیفیت خاک و گیاه به منظور بررسی گیاه‌پالایی کلزا بود. این آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی با بررسی اثر سطوح کادمیم (۰، ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و سرب (۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در سه تکرار روی گیاه کلزا (*Brassica napus*) در شرایط گلخانه‌ای انجام گردید. طول ساقه و ریشه، برخی خصوصیات فیزیولوژیک گیاه، غلظت کادمیم و سرب در اندام هوایی و ریشه و نیز برخی پارامترهای بیولوژیک خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، افزایش آلودگی سرب و کادمیم خاک موجب افزایش معنی‌دار ($P<۰/۰۵$) غلظت این عناصر در اندام هوایی و ریشه و نیز ضریب متابولیک (qco2) گردید. کادمیم و سرب موجب کاهش معنی‌دار ($P<۰/۰۵$) ارتفاع گیاه، کربن بیومس میکروبی (MBC)، تنفس میکروبی و تنفس برانگیخته با سوبسترا (SIR) شدند. پس عناصر کادمیم و سرب باعث تغییراتی در کلزا و ریزجانداران خاک می‌شوند.

واژه های کلیدی: آلودگی خاک، بیومس میکروبی، ضریب متابولیک، فلزهای سنگین.

مقدمه

کیفیت خاک توانایی خاک به منظور کارکرد یک اکوسیستم با حفظ حاصلخیزی، کیفیت محیط زیست و تقویت سلامتی گیاهان و موجودات زنده تعریف می‌شود. هرگونه تغییر مدیریتی و انجام عملیات کشاورزی بر خاک می‌تواند کیفیت خاک را تحت تأثیر قرار دهد. در طی دو دهه گذشته تمرکز بر ویژگی‌های بیولوژیک و بیوشیمیایی به‌منظور بررسی کیفیت خاک افزایش یافته است (Sokouti., 2015). ویژگی‌های میکروبی خاک از شاخص‌های مهم کیفیت آن به شمار می‌آیند و به همین دلیل کیفیت و سلامت خاک با استفاده از خواص میکروبی نیز قابل ارزیابی می‌باشد. ریزجاندارن خاک نقش مهمی در افزایش زیست فراهمی عناصر غذایی، تجزیه مواد آلی، بهبود و ارتقاء رشد گیاه و حاصلخیزی خاک دارند. با این حال، موجودات خاک‌زی در معرض انواع تنش‌های زیستی و غیرزیستی در محیط خاک قرار دارند (Sadeghi *et al*, 2018). برخی از شاخص‌های زیستی از جمله تنفس میکروبی و کربن زیست توده میکروبی (MBC) توسط پژوهش‌گران مختلف برای ارزیابی تأثیر آلودگی فلزهای سنگین بر فعالیت میکروبی خاک پیشنهاد شده است. تنفس میکروبی از مهم‌ترین شاخص‌های زیستی خاک است که در اثر آلودگی خاک‌ها به فلزهای سنگین تغییر می‌کند (Zhang *et al*., 2010). از ویژگی‌های مهم فلزهای سنگین می‌توان به غیرقابل تجزیه و سمی‌بودن و نیز داشتن آثار زیان‌بار فیزیولوژیکی بر جانداران در غلظت‌های کم اشاره نمود (Azadbakht *et al*., 2018). فلزهای سنگین از طریق تشکیل ترکیب با سوبسترا، قابلیت فراهمی آن را کاهش داده و یا اینکه میکروارگانیسم‌ها را از بین می‌برند و بدین ترتیب تنفس کاهش می‌یابد. تنفس می‌تواند نشان دهنده شدت آلودگی خاک باشد (Dayani and Raiesi, 2011). فلزها به طور مداوم از طریق فعالیت‌های کشاورزی مانند کاربرد طولانی مدت فاضلاب‌های شهری در اراضی کشاورزی، استفاده از مواد شیمیایی، فعالیت‌های صنعتی، دفع پسماندها، سوزاندن بقایا و دود حاصل از وسایل نقلیه به خاک اضافه می شوند. سمیت فلزهای سنگین بر کیفیت زیستی خاک، رشد گیاه و سلامت انسان اثر منفی می‌گذارند (Zhu *et al*., 2018). در بین فلزهای سنگین، کادمیم دارای اهمیت ویژه‌ای است، چرا که به راحتی

* نویسنده مسئول: beheshti@razi.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

توسط سیستم ریشه‌ای گیاه جذب شده و سمیت آن برای گیاه ۲ تا ۲۰ برابر سایر فلزهای سنگین می‌باشد (Nazari *et al*., 2014). از علائم عمومی ناشی از جذب مقادیر اضافی کادمیم در گیاهان می‌توان به کاهش و توقف رشد ریشه، چوب پنبه‌ای شدن، تداخل با جذب و انتقال طبیعی عناصر غذایی، کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فعالیت‌های آنزیمی به‌ویژه آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز اشاره نمود(Zhu *et al*., 2018). سرب یکی دیگر از فلزات سنگین با اهمیت و از عوامل آلوده کننده محیط زیست است. این عنصر در خاک نه تنها در فعالیت‌های زیستی خاک نقشی ندارد، بلکه به دلیل اثر سمیت می‌تواند تعداد، زیست‌توده، تنوع و سطح فعالیت میکروبی را تحت تأثیر قرار دهد (Zhang *et al*., 2015). همچنین سرب باعث بروز تغییر در شاخص‌های فیزیولوژیک رشد گیاهان و در نهایت کاهش عملکرد آن‌ها نیز می‌گردد. از علائم عمومی ناشی از جذب مقادیر اضافی سرب در گیاه می‌توان به کاهش درصد جوانه‌زنی، زرد شدن گیاه، ممانعت از رشد ریشه و فعالیت آنزیم‌ها، اختلال در تغذیه معدنی و تعادل آب گیاه، کاهش میزان فتوسنتز و کاهش توده خشک گیاه اشاره نمود (Ferreyroa *et al*., 2017). فتوسنتز تعیین کننده اصلی رشد و عملکرد گیاهان است و توانایی حفظ آن در شرایط تنش‌های محیطی برای حفظ ثبات عملکرد مهم است (Chaghakaboodi *et al*., 2012). عوامل محدود کننده فتوسنتز به دو دسته روزنه‌ای که منجر به کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن به فضای بین سلولی در اثر کاهش هدایت روزنه‌ای می‌شوند و عوامل غیرروزنه‌ای که فتوسنتز را از طریق اثر مستقیم بر فرآیندهای بیوشیمیایی فرآوری کربن محدود می‌کنند، تقسیم می‌شوند (Hosseinzade *et al*., 2014).

کلزا (*Brassica napus*) از مهم‌ترین گیاهان روغنی خانواده شب بوئیان (*Brassicaceae*) است. در ایران، این محصول در مناطق وسیعی از مازندران، گلستان، مناطق سرد و معتدل کشور کشت می‌شود (Zirgoli and Kahrizi, 2015; Kahrizi and Allavarand, 2012). کلزا گیاهی یک‌ساله و دارای پتانسیل بالای جذب و استخراج فلزهای سنگین از خاک‌های آلوده می‌باشد (Tabatabaei and Ansari., 2016). Ehsan *et al*. (2014) در پژوهشی با بررسی اثر سطوح کادمیم بر گیاه کلزا بیان کردند کادمیم باعث کاهش طول ساقه و ریشه، سطح و تعداد برگ، کاهش زیست توده گیاه و همچنین کاهش کلروفیل و میزان فتوسنتز می‌شود. Azevedo *et al*. (2005) بیان کردند که کاربرد کادمیم سبب کاهش رشد آفتابگردان و کاهش تعداد و اندازه برگ‌ها و همچنین ایجاد کلروز (زردی) و نکروز (بافت مردگی) در برگ‌ها شده است. Lacalle *et al*. (2018) در پژوهشی با بررسی اثر کادمیم بر شاخص‌های تحت کشت گیاه کلزا دریافتند که آلودگی خاک باعث کاهش تنوع میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌های خاک می‌شود. Zhang *et al*. (2010) گزارش کردند که کربن زیست توده میکروبی خاک همبستگی بسیار بالایی با غلظت سرب در خاک داشته و با افزایش سطوح سرب در خاک کربن زیست‌توده میکروبی به شدت کاهش می‌یابد. Khan *et al*. (2010) نیز مقدار کربن زیست توده میکروبی خاک در خاک‌های آلوده به سرب را کمتر از خاک‌های غیرآلوده گزارش نمودند.

Aghababaei *et al*. (2014) با بررسی زیست توده میکروبی در خاک‌های آلوده شده به کادمیم در کشت آفتابگردان به این نتیجه دست یافتند که آلودگی کادمیم خاک موجب کاهش فعالیت میکروبی، سرعت و میزان کلی تنفس خاک می‌گردد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر سطوح مختلف کادمیم و سرب بر شاخص‌های کیفیت بیولوژیک خاک و برخی خصوصیات گیاه کلزا کشت شده در این خاک می‌باشد.

Liu *et al*. (2003) گزارش کردند که تجمع غلظت های ناچیز فلزهای سمی در دانه و روغن آفتابگردان، خطرآلودگی زنجیره‌های غذایی را به حدا قل رسانده و ازطرف دیگر، امکان استفاده از روغن آن در مصارف صنعتی نیز وجود خواهد داشت.

Turan and Esring (2007) در پژوهشی با بررسی میزان تجمع سرب و کادمیوم درگیاه کلزا به این نتیجه رسیدند که میزان تجمع سرب و کادمیم در اندام هوایی بیشتر از ریشه و دانه کلزا و در روغن وجود نداشت. آنان همچنین اظهار نمودند که فاکتور انتقال سرب و کادمیوم از ریشه به اندام هوایی بالاتر از یک و از اندام هوایی به دانه کلزا کمتر از یک بود. بنابراین نتیجه گرفتند که گیاه کلزا توانایی تجمع فلزهای سرب و کادمیوم را در اندام هوایی دارد.

Park *et al*. (2012) اعلام نمودند که کلزا یک گیاه با پتانسیل بالای جذب و استخراج فلزهای سنگین از خاک‌های آلوده می‌باشد که به علت انتقال بسیار کم فلزهای سنگین به دانه و عدم وجود آن در روغن استحصال شده، می‌توان علاوه بر پالایش خاک از روغن آن نیز استفاده نمود.

بر اساس نتایج و گزارش‌های فوق، علت استفاده از گیاه کلزا در این تحقیق به جهت توانایی آن در گیاه پالایی می‌باشد. با توجه به گزارش‌هایی که از برخی گیاهان دانه روغنی بیش انباشتگر کشت شده در مناطق آلوده به فلزهای سنگین ارائه گردید، مشخص شده است که تجمع عناصر سنگین در اندام‌های هوایی بسیار ناچیز بوده و در روغن وجود نداشته است. پس می‌توان کشت کلزا را با هدف خوراکی در مناطق آلوده انجام داد. البته برای اطمینان بیشتر بررسی‌های بیشتر از سوی سازمان غذا و دارو

www.SID.ir

Archive of SID

لازم می‌باشد. بر این اساس در این تحقیق اثرات آلودگی کادمیم و سرب بر کیفیت بیولوژیکی خاک و رشد گیاه کلزا مورد بررسی قرار گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

ماده گیاهی این تحقیق کلزا رقم اکاپی بود که از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه تهیه گردید. نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری از مزرعه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی برداشته شد. پس از هوا خشک کردن نمونه‌های خاک و عبور از الک ۲میلی‌متری، برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آن از قبیل pH و EC در عصاره گل اشباع، درصد کربن آلی به روش والکی و بلاک (Walkley and Black, 1934)، مقدار فسفر خاک به روش اولسن و سومرس (Olsen and Sommers, 1982)، نیتروژن کل به روش کجلدال (Bremner and Mulvancey, 1982)، پتاسیم به روش استات آمونیوم (Chapman,1965)، کربنات کلسیم به روش تیتراسیون (Loeppert and Suarez, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (Rowell, 1994)، کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون (Devis and Freitas,1970) و درصد بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder,1986) اندازه‌گیری شدند. برای آلوده کردن خاک، غلظت آلاینده با توجه به حدود غلظت مجاز کادمیم و سرب در خاک انتخاب شد. ابتدا با استفاده از نمک نیترات کادمیم و نیترات سرب محلول کادمیم و سرب با غلظت‌های مورد نظر (۳، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم برکیلوگرم کادمیم) و (۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر میلوگرم سرب) تهیه و جهت آلوده کردن جرم مخصوصی از خاک مقدار محلول محاسبه شد. سپس جرم محاسبه شده نمک به صورت اسپری به ۳ کیلوگرم خاک اضافه شد و کاملا با آن مخلوط گردید. نمونه‌های خاک به مدت ۱۴ روز با آب مقطر به منظور تثبیت فلزهای سنگین در حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند.گلدان‌های پلاستیکی مورد استفاده در این آزمایش دارای قطر دهانه ۱۶/۵ سانتی‌متر بودند. در بخش فوقانی گلدان‌ها به اندازه ۳-۲ سانتی‌متر جهت آبیاری خالی گذاشته شد. پس از این، بذور گیاه کلزا به گلدان‌ها انتقال داده شد. به این ترتیب بذور کلزا درون هر گلدان به عمق حدود ۳-۲ سانتی‌متر و به فاصله ۵-۳ سانتی‌متر از یکدیگر توسط میله شیشه‌ای حفر و کشت گردید. بعد از سپری شدن فصل رشد که حدود ۶ ماه به طول انجامید، اندام‌های هوایی و ریشه گیاه برداشت و مقدار جذب عناصر سنگین، برخی صفات مرفولوژیک، مقدار ماده خشک و ارتفاع گیاه تعیین شد.

اندازه‌گیری تبادلات گازی

به منظور اندازه‌گیری میزان فتوسنتز در واحد سطح برگ (میکرومول دی‌اکسیدکربن بر مترمربع در ثانیه)، هدایت روزنه‌ای (میلی‌مول بر متر بر ثانیه) مقاومت روزنه‌ای (متر مربع در ثانیه در مول)، میزان تعرق (میلی‌مول آب بر مترمربع بر ثانیه) و غلظت دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای (میکرومول بر مول) از دستگاه فتوسنتزمتر (LCI manual) در ساعت ۹ صبح و در شدت نور معادل۷۰۰-۴۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه استفاده شد، هر برگ درون اتاقک اندازه‌گیری (چمبر) طوری قرار داده شد که سطح فوقانی برگچه به طرف بالا قرارگیرد. هدایت مزوفیلی (میلی‌مول دی‌اکسیدکربن در مترمربع در ثانیه) از تقسیم فتوسنتز به غلظت دی‌اکسیدکربن درون روزنه‌ای (Venora and Calcagno,1991) محاسبه گردید.

اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در گیاه

مقدار ۰/۵ گرم از نمونه‌های ساقه گیاه خشک آسیاب‌شده درکروزه چینی ریخته و در کوره الکتریکی با درجه حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. نمونه‌ها به مدت ۴ الی ۱۲ ساعت در این درجه حرارت نگه داشته شدند. سپس مقدار ۲/۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ مولار افزوده و بعد از اتمام فعل و انفعالات محتویات کروزه را از کاغذ صافی به داخل بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری صاف شدند (Tüzen, 2003). غلظت کادمیم و سرب در عصاره‌ها توسط دستگاه جذب اتمی قرائت (مدلAA220 ساخت شرکت Varian استرالیا) شد.

معدنی شدن کربن آلی (تنفس خاک)

برای اندازه‌گیری تنفس میکروبی از روش اندرسون (Anderson, 1982)استفاده شد. به این منظور، معادل ۵۰ گرم خاک عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متر را درون جارهای پلاستیکی ریخته و به رطوبت حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه[1]رسانده شدند. سپس یک بشر حاوی ۲۰ میلی‌لیتر سود (NaOH)۰/۵ مولار درون ظرف‌ها قرار داده شد و بلافاصله جارها در انکوباتور ۱± ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. سپس بشر شیشه‌ای خارج و با افزودن محلول کلریدباریم ۵ درصد و رسوب یون بی‌کربنات تولید شده، با اسید کلریدریک ۰/۲۵ نرمال تیتر گردید. در نهایت میزان دی‌اکسید کربن تولید شده یا همان کربن آلی معدنی شده از طریق معادله زیر محاسبه و برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم بیان شد.

$$C_t = (B-S)\times N\times E\times 1000/W$$

که در آن (C_t) کربن آلی معدنی‌شده بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم ، B میلی‌لیتر اسید مصرفی برای نمونه‌های شاهد ،

1- Field Capacity

www.SID.ir

Archive of SID

S میلی‌لیتر اسید مصرفی برای نمونه‌های خاک، E وزن اکی‌والان (۲۲ برای CO_2 و ۶ برای کربن)، N نرمالیته اسید، W وزن خاک خشک و عدد ۱۰۰۰ ضریب تبدیل گرم به کیلوگرم خاک می‌باشد.

تنفس ناشی از سوبسترا[1]

به منظور اندازه‌گیری تنفس ناشی از سوبسترا، ۱ میلی‌لیتر محلول گلوکز ۱ درصد به عنوان سوبسترای آلی قابل دسترس به هر کدام از نمونه‌ها افزوده شد و بلافاصله ۲۰ میلی‌لیتر سود ۰/۵ نرمال درون جارهای حاوی خاک قرار داده شد. سپس جارها به مدت ۶ ساعت در انکوباتور ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها طبق روشی که در بخش تنفس توضیح داده شد با اسید کلریدریک تیتر گردید و میزان کربن معدنی‌شده ناشی از سوبسترای افزوده‌شده برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (Alef and Nannipieri, 1995) محاسبه گردید.

کربن بیومس میکروبی(MBC)

برای اندازه‌گیری کربن بیومس میکروبی از روش تدخین با کلروفرم- انکوباسیون استفاده شد. به این صورت که کربن بیومس میکروبی از اختلاف کربن معدنی‌شده خاک در نمونه‌های تدخین-نشده و تدخین‌شده طی ۱۰ روز انکوباسیون (Horwath and Paul, 1994) به دست آمد. اختلاف بین کربن متصاعد شده از نمونه‌های تدخین شده و تدخین نشده به عنوان بیومس کربن تعیین گردید:

$$MBC = F_C/k_C$$

که در آن MBC کربن توده زنده میکروبی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)، F_C اختلاف مقدار CO_2-C متصاعد شده از خاک تدخین شده و تدخین نشده بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم و k_C ضریب بازیافت یا راندمان تجزیه کربن میکروبی است که معادل ۰/۴۵ می‌باشد. برای محاسبه ضریب یا کسرمتابولیک(qCO2)، از تقسیم تنفس پایه بر کربن زیست توده میکروبی (Anderson and Domsch, 1990) استفاده گردید.

آنالیزهای آماری

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS9.1 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای ترسیم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به برخی از ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی مهم خاک در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده میگردد خاک مورد مطالعه با میانگین pH برابر ۷/۵ در شمار خاک‌هایی با واکنش قلیایی ضعیف قرار دارد. هدایت الکتریکی ۰/۳ نشان‌دهنده غیرشور بودن و قابل کشت بودن خاک مورد مطالعه می‌باشد. بیش‌ترین ذرات خاک را ذرات سیلت تشکیل داده و بافت خاک نیز Silty clay loam است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

خصوصیات خاک	واحد	نتایج
pH خاک	-	۷/۵
بافت خاک	-	لومی رسی
هدایت الکتریکی	دسی‌زیمنس بر متر	شنی
کربن آلی خاک	درصد	۰/۳
کربنات کلسیم	درصد	۰/۷۲
ازت	درصد	۵/۹۵
فسفر	میلی‌گرم بر کیلوگرم	۱/۲
پتاسیم	میلی‌گرم بر کیلوگرم	۰/۴
کلسیم	میلی‌گرم بر کیلوگرم	۲۰۰/۶۷
منیزیم	میلی‌گرم بر کیلوگرم	۲۴
ظرفیت تبادل	میلی اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم	۸/۱۶
کاتیونی	خاک	۱۵/۲۸
کادمیم	میلی‌گرم بر کیلوگرم	۰/۳۸
سرب	میلی‌گرم بر کیلوگرم	۹/۵۰

غلظت کادمیم و سرب در گیاه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که میزان انباشت این عناصر در اندام هوایی و ریشه گیاه کلزا به طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت کادمیم و سرب در خاک می‌باشد. نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳) نشان داد که در شرایط تنش کادمیم و سرب میزان انباشت این دو عنصر در گیاه شاهد کمترین و در گیاه تحت تنش ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب بیشترین مقدار را داشت. در شرایط تنش کادمیم، اختلاف بین تیمارهای ۳ و ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم معنی‌دار نبود. وجود غلظت‌های بالای فسفات و یون‌های کربنات-بیکربنات و همچنین pH نسبتاً بالای فضاهای بین سلولی ریشه موجب می‌شود که سرب بلافاصله پس از ورود به درون ریشه گیاه، به شکل فسفات‌ها یا کربنات‌ها رسوب کند. این امر در نهایت موجب کاهش جابه‌جایی سرب به سمت اندام هوایی می‌شود (Naderi er al., 2014). Kabata-Pendias و Pendias (2001) بیان کردند که کادمیم جذب شده توسط گیاه کلزا بیشتر در ریشه تجمع می‌یابد. آنان همچنین اظهار داشتند که تجمع کادمیم در ریشه ممکن است به علت تشکیل پیوند بین کادمیم و سولفیدریل

1- Substrate-Induced Respiration

www.SID.ir

Archive of SID

و پروتئین‌هایی به نام فیتولکتین باشد. Liu *et al.* (2010) نیز بیان کردند که با مصرف سرب و ایجاد آلودگی در خاک میزان جذب و انتقال سرب به دانه در ارقام مختلف برنج بسیار اندک بود و عمدتاً در ریشه تجمع یافت.

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف کادمیم و سرب بر طول ساقه، ریشه و میزان انباشت این عناصر دراندام هوایی و ریشه کلزا

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		طول ساقه	طول ریشه	اندام هوایی	ریشه
کادمیم	۳	۱۴/۷۰^{ns}	۴/۸۳*	۴۱/۹۵**	۲۶۱/۶۲**
خطا	۸	۲۲/۴۱	۰/۳۹	۰/۲۹	۰/۹۳
ضریب تغییرات	-	۱۰/۵۶	۴/۱۰	۸/۸۰	۸/۰۴
سرب	۳	۵۴/۹۷*	۵/۵۱**	۳۶۴/۷۹**	۳۲۱۴۹/۶۱**
خطا	۸	۱۴/۰۰	۱/۴۶	۱/۴۰	۸۴/۳۵
ضریب تغییرات	-	۸/۲۰	۷/۹۶	۵/۵۷	۹/۵۰

ns، * و: به ترتیب غیرمعنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.**

صفات مرفولوژیک

طول ساقه و ریشه

نتایج تجزیه واریانس در گیاه کلزا (جدول ۲) نشان دادکه اختلاف بین تیمارهای مختلف کادمیم با گیاه شاهد برای صفت طول ساقه معنی‌دار نبود در حالی که برای صفت طول ریشه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد وجود داشت. همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری طول ساقه و ریشه درگیاه کلزا نشان داد که در شرایط تنش سرب، برای هر دو صفت اندازه‌گیری شده به ترتیب اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱درصد وجود داشت. نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳) نشان داد اختلاف طول ساقه کلزا بین شاهد (۵۰/۳۳ سانتی‌متر) و سطوح ۱۰۰ (۴۶/۶۶ سانتی‌متر) و ۳۰۰ (۴۵/۳۳ سانتی‌متر) میلی‌گرم درکیلوگرم سرب از نظر آماری معنی‌دار نبود؛ اما اختلاف بین شاهد و سطح ۶۰۰ میلی‌گرم برکیلوگرم سرب (۴۰/۰۰ سانتی‌متر) در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. میانگین طول ساقه گیاه شاهد در تیمار سرب برابر با ۵۰/۳۳ سانتی‌متر و در بالاترین غلظت به کار رفته سرب (۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) برابر با ۴۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد که کاهش ۲۱ درصدی را نشان می‌دهد. در شرایط تنش کادمیم اختلاف طول ریشه بین شاهد (۴۸/۰۱) و سطوح ۵ (۴۳/۸۱) و ۱۰ (۴۲/۹۷) میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم معنی‌دار بود در حالی که اختلاف بین تیمارهای شاهد و سطح ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و همچنین تیمارهای ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم از نظر آماری معنی‌دار نبود. در شرایط تنش سرب اختلاف طول ریشه بین شاهد و سطح ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و نیز اختلاف بین تیمارهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب معنی‌دار نبود. در شرایط تنش سرب میانگین طول ریشه در بالاترین غلظت به کار رفته (۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب) نسبت به گیاه شاهد ۱۸درصد کاهش یافت.

کاهش رشد ممکن است به طور کلی به علت از دست رفتن اتساع سلولی و نیز کاهش فعالیت میتوزی و یا مهار طویل شدن سلول‌ها باشد. همچنین کادمیم در سلول‌ها از طریق تأثیر بر دیواره‌های سلولی و تیغه میانی و افزایش پیوند عرضی بین ترکیبات دیواره سلولی باعث مهار گسترش سلولی می‌شود (Cenkci *et al.*,2010). کاهش جذب عناصری مانند آهن و روی، آسیب به غشای سلولی ریشه و نشت یونی، افزایش تولید رادیکال های آزاد، اثر سوء بر فتوسنتز و تنفس از جمله دلایل احتمالی کاهش پارامترهای رشدی در برخی تیمارها می‌باشد Mahler). (*et al*, 2006)این یافته با نتایج تحقیقات پژوهشگرانی مانند (Mihalescu *et al.*, 2010; Ferreyroa *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2018) مطابقت دارد.

صفات فیزیولوژیک

غلظت دی‌اکسیدکربن

نتایج تجزیه واریانس در گیاه کلزا (جدول ۴) نشان داد که بین تیمارهای مختلف کادمیم (۳، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با گیاه شاهد از نظر غلظت دی‌اکسید کربن روزنه اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. اما بین تیمارهای مختلف سرب (۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با گیاه شاهد اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱درصد وجود دارد. با افزایش غلظت کادمیم و سرب غلظت داخلی دی‌اکسید کربن روزنه برگ افزایش می‌یابد. مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۵) نشان داد در شرایط تنش سرب، اختلاف بین سطوح ۳۰۰ (۳۶۱/۳۳) و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب (۳۷۴/۳۳) از نظر آماری معنی‌دار نبود. در شرایط تنش کادمیم و سرب میانگین هدایت غلظت دی‌اکسید کربن در گیاه کلزا در بالاترین غلظت به کار رفته (۱۰و۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم

www.SID.ir

Archive of SID

کادمیم و سرب) نسبت به گیاه شاهد به ترتیب ۲ و ۲۷ درصد افزایش یافت که این افزایش غلظت در شرایط تنش کادمیم معنی‌دار نبود. با کاهش هدایت روزنه‌ای، میزان CO_2 داخل سلولی افزایش یافت که نشان می‌دهد سلول‌های مزوفیلی در استفاده از CO_2ناتوان هستند. افزایش در CO_2 داخل سلولی با وجود کاهش در هدایت روزنه‌ای را می‌توان به کاهش ظرفیت فتوسنتزی کلروپلاست نسبت داد. بنابراین در صورتی که کاهش فتوسنتز با افزایش یا ثبات غلظت دی‌اکسیدکربن اتاقک روزنه همراه باشد می‌توان گفت که عوامل غیر روزنه‌ای محدود کننده فتوسنتز هستند(Burrage, 2004 ;Halder and). غلظت زیاد کادمیم در محیط رشد، جذب آهن توسط گیاه را مختل کرده و سمیت کادمیم بر فرآیندهای اصلی گیاه نظیر فتوسنتز، تکثیر سلولی و جذب آب توسط ریشه‌های گیاه اثر می‌گذارد. سمیت کادمیم به طور کلی شامل اختلال در نسبت دی‌اکسید کربن و تعرق، کاهش مقاومت در مقابل بیماری‌ها، جذب عناصر غذایی توسط گیاه، کاهش تعرق، کاهش راندمان آب مصرفی، ممانعت از فتوسنتز و کاهش نفوذپذیری دیواره سلولی می‌شود (Kabata- Pendias, 2001).

جدول ۳. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف کادمیم و سرب بر طول ساقه، ریشه و میزان انباشت این عناصر در گیاه کلزا

عناصر	غلظت(mg/kg)	طول ساقه(cm)	طول ریشه(cm)	اندام هوایی	ریشه
کادمیم	۰	۴۸/۰۱^{a}	۱۷/۰۰^{a}	۰/۲۰^{a}	۰/۲۳^{a}
	۳	۴۴/۵۰^{a}	۱۵/۵۰^{a}	۷/۲۸^{b}	۱۱/۷۱^{b}
	۵	۴۳/۸۱^{a}	۱۴/۸۳^{bc}	۷/۹۸^{b}	۱۲/۰۰^{b}
	۱۰	۴۲/۹۷^{a}	۱۴^{c}	۸/۷۰^{c}	۲۳/۶۶^{c}
سرب	۰	۵۰/۳۳^{a}	۱۷/۰۰^{a}	۵/۲۷^{a}	۷/۵۰^{a}
	۱۰۰	۴۶/۶۶^{ab}	۱۵/۵۰^{a}	۲۰/۵۰^{b}	۵۸/۸۳^{b}
	۳۰۰	۴۵/۳۳^{ab}	۱۴/۸۳^{bc}	۲۶/۱۶^{c}	۷۰/۳۳^{C}
	۶۰۰	۴/۰۰^{b}	۱۴^{c}	۳۲/۰۰^{d}	۲۴۷/۰۰^{d}

در هر ستون حرف مشابه نشانه عدم وجوداختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

میزان تعرق

نتایج تجزیه واریانس در گیاه کلزا (جدول ۴) نشان داد که بین تیمارهای مختلف کادمیم (۳، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سرب (۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با گیاه شاهد اختلاف معنی‌داری به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱درصد وجود دارد. مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۵) نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم و سرب، میزان تعرق کاهش می‌یابد، اختلاف بین شاهد (۱/۶۸) و سطوح ۳(۱/۵۷) و ۵ (۱/۴۰) میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و نیز اختلاف بین شاهد (۱/۷۷) و سطح ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب (۱/۵۶) و همچنین اختلاف بین سطوح ۳۰۰ (۰/۸۱) و ۶۰۰(۰/۵۸) میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. در شرایط تنش کادمیم و سرب میانگین میزان تعرق در گیاه کلزا در بالاترین غلظت به کار رفته (۱۰و۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و سرب) نسبت به گیاه شاهد به ترتیب ۴۰ و ۶۰ درصد کاهش یافت. فلزهای سنگین موجب بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش تعرق می‌شوند. Soltani *et al*. (2006) بیان کردند که کادمیم باعث بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش تعرق می‌شود.

هدایت مزوفیلی

نتایج تجزیه واریانس در گیاه کلزا (جدول ۴) نشان داد که بین تیمارهای مختلف کادمیم (۳، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با گیاه شاهد برای صفت ذکر شده اختلاف معنی‌داری وجود ندارد؛ اما بین تیمارهای مختلف سرب (۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با گیاه شاهد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد وجود دارد. با افزایش غلظت کادمیم و سرب هدایت مزوفیلی کاهش یافت. مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۵) نشان داد که در شرایط تنش سرب، اختلاف بین سطوح ۳۰۰ (۰/۰۱۴) و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب (۰/۰۱۱) از نظر آماری معنی‌دار نبود. در شرایط تنش کادمیم و سرب میانگین هدایت مزوفیلی در گیاه کلزا در بالاترین غلظت به کار رفته (۱۰ و۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و سرب) نسبت به گیاه شاهد به ترتیب ۱۱و ۵۹ درصد کاهش یافت که این کاهش هدایت در شرایط تنش کادمیم معنی‌دار نبود. میزان کمتر فتوسنتز و فرآوری دی‌اکسیدکربن در حضور مقادیر بالای دی‌اکسیدکربن اتاقک زیر روزنه‌ای به مفهوم پایین بودن میزان هدایت مزوفیلی و عدم توانایی سلول‌های مزوفیل در استفاده از دی‌اکسیدکربن می‌باشد. کاهش هدایت مزوفیلی احتمالاً به‌دلیل افزایش مقاومت مزوفیلی در اثر کاهش فعالیت آنزیم‌های کربوکسیله کننده و رابیسکو اکتیواز و یا کاهش کارایی انتقال کربن است (Mojtabaie Zamani *et al*., 2015).

www.SID.ir

Archive of SID

میزان فتوسنتز

نتایج تجریه واریانس حاصل از اندازه‌گیری طول ساقه و ریشه در گیاه کلزا (جدول ۴) نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم و سرب در خاک میزان فتوسنتز به طور معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) کاهش یافت. مقایسه میانگین داده‌ها در گیاه کلزا (جدول ۵) نشان داد که اختلاف بین شاهد (۷/۵۶) و سطوح ۳ (۷/۴۰) و ۵ (۷/۲۶) میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم از نظر آماری معنی‌دار نبود ولی اختلاف بین شاهد و سایر سطوح سرب در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. در شرایط تنش کادمیم و سرب میانگین فتوسنتز در گیاه کلزا در بالاترین غلظت به کار رفته (۱۰و۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و سرب) نسبت به گیاه شاهد به ترتیب ۹ و ۴۰ درصد کاهش یافت. کادمیم میل ترکیبی شدیدی با گروه‌های سولفیدریل، هیدروکسیل و لیگاندهای حاوی نیتروژن دارد. در نتیجه این عنصر، بسیاری از آنزیم‌های مهم را غیرفعال کرده که منجر به اختلال در فتوسنتز، تنفس و سایر فرآیندهای متابولیک در گیاه می‌گردد. کادمیم با اختلال در فعالیت آنزیم مؤثر در چرخه تثبیت دی‌اکسیدکربن، اثر مخرب بر واکنش‌های وابسته به نور و مستقل از نور دارد و ممانعت از فعالیت آنزیم روبیسکو، تثبیت دی‌اکسیدکربن و فتوسنتز در گیاه می‌شود (Torres *et al*, 2000). تنش سرب می‌تواند با کاهش تثبیت کربن سبب اختلال در فتوسنتز شود. Rasouli Sadaghiani *et al*. (2016) با بررسی تأثیر کادمیم بر برخی ویژگی‌های گیاه خارزن بابا، اظهار کردند که با افزایش غلظت کادمیم در خاک، در همه تیمارها مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل وکارتنوئید در گیاه خارزن بابا به طور معنی‌داری کاهش یافت.

هدایت روزنه‌ای

نتایج تجزیه واریانس در گیاه کلزا (جدول ۴) نشان داد که بین تیمارهای مختلف کادمیم (۳، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سرب (۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با گیاه شاهد به ترتیب اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد وجود دارد و با افزایش غلظت کادمیم و سرب هدایت روزنه‌ای کاهش می‌یابد. مقایسه میانگین داده‌ها در گیاه کلزا (جدول ۵) نشان داد که بیشترین اختلاف بین نمونه‌های شاهد (تیمار صفر) و نمونه‌های ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب می‌باشد. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اختلاف بین شاهد (۰/۰۲۸) و سطوح ۳ (۰/۰۲۷) و ۵ (۰/۰۲۶) میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم از نظر آماری معنی‌دار نبود. اما اختلاف بین شاهد و سایر سطوح سرب در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. در شرایط تنش کادمیم و سرب میانگین هدایت روزنه‌ای در گیاه کلزا در بالاترین غلظت به کار رفته (۱۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و سرب) نسبت به گیاه شاهد به ترتیب ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش یافت. با افزایش غلظت سرب، به دلیل افزایش مقاومت روزنه‌ای و بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و تعرق مشاهده گردید. در شرایط آلودگی خاک روزنه‌های گیاهان بسته شده و عبور و مرور گازها متوقف می‌شود، در این شرایط فتوسنتز نیز کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت کادمیم، هدایت روزنه‌ای کاهش یافت. لذا احتمال کاهش فتوسنتز به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای وجود دارد (Wise *et al*., 1990). فتوسنتز به مختل شدن جابجایی گازها از روزنه ها بسیار حساس است و کادمیم باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود (Soltani *et al*., 2006). Bazzaz *et al*. (1975) گزارش کردند که یک رابطه بسیار قوی بین استفاده از سرب و کاهش فتوسنتز وجود دارد که به طور عمده از بسته شدن روزنه‌ها منتج می‌شود. از سوی دیگر، جدا از بسته شدن روزنه‌ها، انتظار می‌رود این کاهش شدید فتوسنتز در نتیجه آسیب شدید سازمان داخلی کلروپلاست، از جمله غشای تیلاکوئید، استروما و گرانا باشد که پس از به کارگیری سرب، حل شده و قابل مشاهده نیست. کاهش هدایت روزنه‌ای میزان دسترسی سلول‌های فتوسنتزکننده را به دی‌اکسید کربن، به عنوان فاکتور اصلی اجزای فتوسنتزکننده کاهش می‌دهد(Sisakht Nejad and Zolfaghari, 2015).

مقاومت روزنه‌ای

نتایج تجزیه واریانس در گیاه کلزا (جدول ۴) نشان دادکه با افزایش غلظت کادمیم و سرب در خاک، مقاومت روزنه‌ای به طور معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) افزایش یافت. مقایسه میانگین داده‌ها در گیاه کلزا (جدول ۵) نشان داد که بیشترین اختلاف بین نمونه‌های شاهد (تیمار صفر) و نمونه‌های ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب می‌باشد. همچنین اختلاف بین غلظت‌های ۳ و ۵ و نیز سطوح ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم از نظر آماری معنی‌دار نبود. در شرایط تنش سرب نیز اختلاف بین شاهد و غلظت ۱۰۰ و نیز سطوح ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. در شرایط تنش کادمیم و سرب میانگین مقاومت روزنه‌ای در گیاه کلزا در بالاترین غلظت به کار رفته (۱۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و سرب) نسبت به گیاه شاهد به ترتیب۶۰ و ۵۰ درصد افزایش یافت. حساس‌ترین شاخص برای بررسی وضعیت فیزیولوژیکی گیاه به‌ویژه تحت شرایط تنش، بررسی رفتار روزنه‌ها می‌باشد. تنش‌های محیطی سبب بسته شدن روزنه و افزایش مقاومت روزنه‌ای می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف کاربرد کادمیم و سرب بر برخی فرآیندهای فتوسنتزی گیاه کلزا

		میانگین مربعات					
منبع تغییرات	درجه آزادی	غلظت CO_2	تعرق	هدایت روزنه‌ای	مقاومت روزنه	هدایت مزوفیلی	فتوسنتز
کادمیم	۳	۱۲/۳۰^{ns}	۰/۲۶۴*	۰/۰۰۱۴*	۳/۸۶**	۰/۰۰۰۰۰۲۹۰^{ns}	۰/۲۴۱۱**
خطا	۸	۱۰۰/۴۱	۰/۰۴۶	۰/۰۰۰۲	۰/۳۶	۰/۰۰۰۰۰۰۱۲۳	۰/۰۳۴۱
ضریب تغییرات	-	۳/۷۰	۱۵/۲۶	۹/۳۳	۹/۸۷	۴/۱۲	۲/۵۳
سرب	۳	۷۹۲۱/۸۸**	۰/۹۹۹**	۰/۰۰۵۴**	۱۳/۵۷**	۰/۰۰۰۱۴۷۳۶**	۵/۰۱۹**
خطا	۸	۱۰۱/۷۵	۰/۰۸۱	۰/۰۰۰۱	۰/۶۰۲	۰/۰۰۰۰۰۲۵۷	۰/۱۳۹
ضریب تغییرات	-	۳/۱۱	۲۴/۰۳	۸/۶۸	۱۱/۲۷	۸/۴۹	۶/۳۸

ns، * و: به ترتیب غیرمعنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد**

جدول ۵. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف کادمیم و سرب بر برخی فرآیندهای فتوسنتزی در گیاه کلزا

عناصر	غلظت (میلی‌گرم/ کیلوگرم)	غلظت CO_2 (میکرومول بر مول)	تعرق (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه)	هدایت روزنه‌ای (میلی‌مول برمترمربع‌ثانیه)	مقاومت روزنه (مترمربع در ثانیه در مول)	هدایت مزوفیلی (میلی‌مولCO_2 در مترمربع در ثانیه)	فتوسنتز (میکرمولCO_2 برمترمربع در ثانیه)
کادمیم	۰	۲۷۰^{a}	۱/۶۸^{a}	۰/۲۰^{a}	۳/۰۵^{a}	۰/۰۲۸^{a}	۷/۵۶^{a}
	۳	۲۷۱/۶۶^{a}	۱/۵۷^{a}	۰/۱۸^{a}	۵/۷۱^{b}	۰/۰۲۷^{a}	۷/۴۰^{a}
	۵	۲۷۳^{a}	۱/۴۰^{ab}	۰/۱۷^{ab}	۸/۱۶^{bc}	۰/۰۲۶^{a}	۷/۲۶^{a}
	۱۰	۲۷۵^{a}	۱/۰۰^{b}	۰/۱۴^{b}	۷/۷۲^{c}	۰/۰۲۵^{a}	۶/۹۰^{b}
سرب	۰	۲۷۳^{a}	۱/۷۷^{a}	۰/۲۰^{a}	۴/۹۳^{a}	۰/۰۲۷^{a}	۷/۴۴^{a}
	۱۰۰	۲۸۶/۶۶^{a}	۱/۵۶^{a}	۰/۱۷^{b}	۵/۷۹^{ab}	۰/۲۱^{b}	۶/۲۲^{b}
	۳۰۰	۳۶۱/۳۳^{b}	۰/۸۱^{b}	۰/۱۴^{c}	۶/۹۸^{b}	۰/۰۱۴^{c}	۵/۲۸^{c}
	۶۰۰	۳۷۴/۳۳^{b}	۰/۵۸^{b}	۰/۱۰^{d}	۹/۸۱^{c}	۰/۰۱۱^{c}	۴/۴۳^{d}

در هر ستون حرف مشابه نشانه عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

شاخص‌های کیفیت بیولوژیک خاک

معدنی شدن کربن یا تنفس میکروبی(CO2-C)

نتایج تجزیه واریانس درخاک تحت کشت گیاه کلزا (جدول ۶) نشان داد که سطوح مختلف کادمیم و سرب خاک باعث کاهش معنی‌دار (سطح احتمال ۵ و ۱ درصد) تنفس میکروبی طی دوره انکوباسیون می‌شود. همچنین نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط تنش کادمیم اختلاف بین تیمارهای شاهد و سطح ۳ و ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم معنی‌دار نبود. در شرایط تنش سرب کاهش تنفس پایه از غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب شروع شد و در غلظت ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به کمترین مقدار خود رسید (جدول ۷). شکل‌های (۱) و (۲) به ترتیب اثر سطوح مختلف کادمیم و سرب بر روند معدنی شدن تجمعی کربن طی ۵۶ روز انکوباسیون (۸ هفته) در خاک تحت کشت گیاه کلزا را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در طی دوره انکوباسیون بیشترین تنفس تجمعی در خاک شاهد (سطح صفر کادمیم و سرب) و کمترین آن در سطح ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب مشاهده می‌شود. سرعت معدنی شدن کربن یکی از شاخص‌های میکروبیولوژیک حساس به حضور عناصر سنگین است که نشان دهنده میزان کربن معدنی‌شده در یک دوره زمانی مشخص است. این پارامتر به میزان فراهمی سوبسترا بستگی دارد و عناصر سنگین این سوبسترا را از دسترس میکروارگانیسم‌های تجزیه کننده خارج می‌سازند. لذا این پارامتر با افزایش سطوح آلودگی کاهش می‌یابد (Dayani and Raiesi, 2011). کاهش تنفس میکروبی در سطح بالای فلزهای سنگین می‌تواند به دلیل کاهش بیشتر زیست توده ریشه گیاه و نیز برهمکنش فلزها و سمیت یونی باشد که بر مسیر متابولیکی سلول‌های میکروبی تاثیر می‌گذارد (Kazemalilou *et al.*, 2013; Karimi and Khodaverdiloo., 2014).

مطالعات متعددی از Landi *et al.*, 2000; Nwachukwu and (Pulford, 2011; Aghababaei *et al.*,2014) کاهش تنفس میکروبی در خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین را گزارش کرده‌اند.

تنفس ناشی از سوبسترا(SIR)

نتایج تجریه واریانس در گیاه کلزا (جدول ۶) نشان داد که سطوح مختلف کادمیم و سرب در خاک باعث کاهش معنی‌دار (در سطح احتمال ۱ درصد) تنفس برانگیخته می‌شود. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در خاک تحت کشت گیاه کلزا (جدول ۷) نشان

www.SID.ir

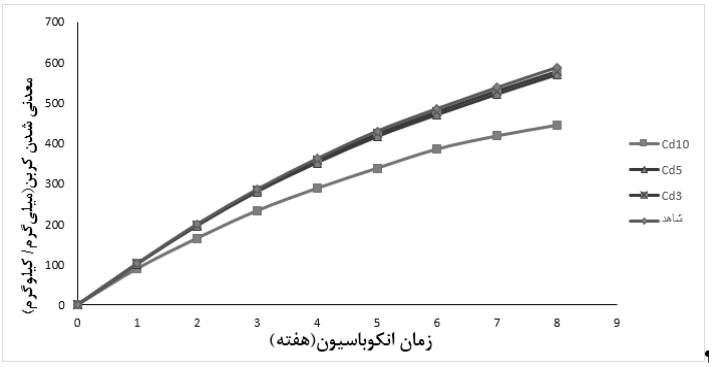
Archive of SID

داد که بیشترین اختلاف بین نمونه‌های شاهد (تیمار صفر) و نمونه ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و نیز سطح ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب می‌باشد. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اختلاف بین شاهد و سطوح ۳ و ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و نیز اختلاف بین شاهد و سطوح ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب از نظر آماری معنی‌دار نبود. تنفس ناشی از سوبسترا به حضور عناصر سنگین بسیار حساس است و این عناصر، سرعت معدنی شدن کربن سوبسترا را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در حقیقت پس از افزودن سوبسترای سهل‌الوصول برای میکروارگانیسم‌ها، عناصر سمی باعث ایجاد تأخیر در رشد نمائی ریز جااندارن فعال می‌شوند. فلزهای سنگین از طریق تشکیل کمپلکس با سوبسترا قابلیت فراهمی آن را کاهش داده و یا این که میکروارگانیسم‌ها را از بین می‌برند و بدین ترتیب تنفس کاهش می‌یابد(Morawska-Ploskonka and Niklinsks, 2013). این نتیجه با یافته‌های محققانی مانند Brookes., 1995; Landi *et al.*, 2000; Dai *et al*., 2004; Dayani and Raiesi., 2011) مطابقت دارد.

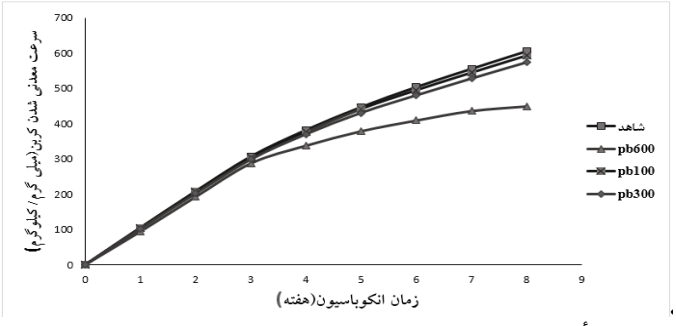
جدول ۶- تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف کادمیم و سرب بر شاخص‌های کیفیت خاک تحت کشت گیاه کلزا

منابع تغییرات	درجه آزادی	تنفس پایه	تنفس تجمعی	تنفس برانگیخته	کربن بیومس میکروبی	ضریب متابولیک
کادمیم	۳	۹۷/۳۳*	۱۳۵۹۵/۳۴**	۱۴۶/۶۷**	۵۲۶/۰۳**	۰/۰۰۲۶**
خطا	۸	۱۹/۸۶	۰/۰۰۵	۱۸/۱۵	۲۲/۹۵	۰/۰۰۰۴
ضریب تغییرات	-	۴/۱۶	۰/۰۱	۲/۹۳	۳/۲۶	۲/۹۰
سرب	۳	۱۸۳/۸۱**	۱۵۳۵۹/۳۰**	۳۰/۱۱**	۰/۰۱۶۰*	۱۲۸۶/۳۲**
خطا	۸	۰/۵۶	۰/۰۰۵	۶/۸۵	۰/۰۰۰۹	۲۲/۹۵
ضریب تغییرات	-	۰/۶۹	۰/۰۱	۱/۸۰	۳/۸۰	۳/۴۲

****و*: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.**



شکل۱. تأثیر سطوح مختلف کاربرد کادمیم بر روند معدنی شدن کربن خاک



شکل۲. تأثیر سطوح مختلف کاربرد سرب بر روند معدنی شدن کربن خاک

کربن بیوماس میکروبی (MBC)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان داد که سطوح مختلف کادمیم و سرب در خاک باعث کاهش معنی‌دار کربن بیومس میکروبی (به ترتیب با سطح احتمال ۱ و ۵ درصد) می‌شود. نتایج مقایسه میانگین در خاک تحت کشت گیاه کلزا نشان داد (جدول ۷) که در شرایط تنش کادمیم و سرب مقدار کربن بیومس میکروبی در خاک شاهد بیشترین و در خاک تحت تنش ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب کمترین مقدار را داشت. در شرایط تنش کادمیم، اختلاف بین شاهد و غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمییم معنی‌دار بود اما بین شاهد و سایر سطوح از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. در شرایط تنش سرب، بین نمونه شاهد و

www.SID.ir

Archive of SID

غلظت ۱۰۰میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب از اختلاف معنی‌داری دیده نشد؛ اما اختلاف بین نمونه شاهد و سایر سطوح معنی‌دار بود. آلودگی کادمیم و سرب خاک بر فعالیت بیولوژیکی تأثیر گذاشته و باعث کاهش کربن زیست توده میکروبی در خاک شده است. به گونه‌ای که درشرایط تنش کادمیم و سرب مقدار کربن بیومس میکروبی در بالاترین غلظت به‌کار رفته (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب) نسبت به شاهد به ترتیب ۱۸و ۲۹ درصد کاهش یافت. بیومس میکروبی یکی از شاخص‌های حساس به حضور عناصر سمی است و کاهش آن با افزایش غلظت فلزهای سنگین شاید به این علت است که اندازه جمعیت‌های میکروبی خاک در حضور کادمیم کاهش می‌یابد (Kizilkaya and Askin, 2002). Xiao *et al*. (2017) گزارش کردند که مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در خاک آلوده به نیکل به شدت کاهش می‌یابد. این نتیجه با بعضی یافته‌ها Dayani and Khodaverdiloo., (2014 Raiesi., 2011; Karimi and) مطابقت دارد.

شاخص ضریب متابولیکی (qCO_2)

ضریب متابولیکی عبارت است از میزان تنفس خاک (یا کربن تجزیه شده برای تولید انرژی) به ازای هر واحد بیومس میکروبی(کربن مصرف شده برای رشد و تشکیل سلول‌های جدید) در واحد زمان (Anderson and Domsch.,1990). خاکی که qCO2 بالایی دارد نشان دهنده شرایط محیطی ناپایدار و یا شرایط نامناسب خاک است. نتایج تجزیه واریانس در خاک تحت کشت گیاه کلزا (جدول ۶) نشان داد که در شرایط تنش کادمیم و سرب برای شاخص اندازه‌گیری شده به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد وجود داشت. نتایج مقایسه میانگین (جدول ۷) نشان داد که در شرایط تنش کادمیم و سرب با افزایش غلظت کادمیم و سرب، کسر متابولیکی افزایش می‌یابد. مقدار کربن بیومس میکروبی در خاک شاهد کمترین و درخاک تحت تنش ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب بیشترین مقدار را داشت. در شرایط تنش کادمیم اختلاف بین شاهد و غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم معنی‌دار است اما اختلاف بین شاهد و سایر سطوح از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. در شرایط تنش سرب نیز اختلاف بین نمونه شاهد و غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب از لحاظ آماری معنی‌دار نبود اما اختلاف بین نمونه شاهد و سایر سطوح معنی‌دار بود. آلودگی کادمیم و سرب خاک باعث افزایش کسر متابولیکی در خاک شده است. به گونه‌ای که در شرایط تنش کادمیم و سرب مقدار کسر متابولیکی در خاک تحت کشت گیاه کلزا در بالاترین غلظت بکار رفته (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب) نسبت به شاهد به ترتیب ۷ و ۸ درصد افزایش یافت. در خاک‌های آلوده به عناصر سمی فعالیت متابولیکی و راندمان مصرف کربن توسط میکروارگانیسم‌ها تغییر می‌کند. بدین صورت که میکروارگانیسم‌ها در شرایط استرس به ازای هر واحد سوبسترای آلی اضافه، کربن کمتری را صرف بیومس جدید می‌کنند و اغلب برای تأمین انرژی لازم برای ادامه حیات، مقداری کربن مصرف می‌کنند. در خاک‌های آلوده کارایی متابولیکی در تبدیل سوبسترای آلی به بیومس کاهش می‌یابد و قسمت اعظم کربن برای تولید انرژی مصرف می‌گردد (Bunemann *et al*., 2006). اضافه کردن عناصر سمی به خاک سبب از بین رفتن بخش زیادی از میکروب‌های خاک می‌شود و در نتیجه باعث افزایش تنفس ناشی از تجزیه سلول‌های میکروبی کشته‌شده توسط میکروارگانیسم‌های باقیمانده می‌شود. نتایج این یافته با بعضی از گزارش‌های قبلی (Kazemalilou *et al*.,2013; Carmo, 2001; Berard *et al*., 2016) مطابقت دارد و با نتایج تحقیق ارائه شده توسط Hattori (1992) همخوانی نداشت. وی کاهش مقادیر کسر متابولیک در خاک‌های آلوده را این‌گونه توضیح داد که میکروارگانیسم‌ها در خاک‌های آلوده از سوبستراهای مختلف استفاده می‌کنند که این باعث افزایش کربن بیومس میکروبی می‌شود.

جدول ۷. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف کادمیم و سرب بر شاخص‌های کیفیت خاک تحت کشت گیاه کلزا

عناصر	غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	تنفس پایه	تنفس برانگیخته	کربن بیومس میکروبی	کسر متابولیک
کادمیم	۰	۱۱۱/۳۷^{a}	۱۴۹/۶۰^{a}	۱۵۶/۰۰^{a}	۰/۷۱۶
	۳	۱۰۹/۶۳a	۱۴۸/۸۶^{a}	۱۵۳/۰۲	۰/۷۱۲^{a}
	۵	۱۰۸/۹۰	۱۴۸/۱۳^{a}	۱۵۱/۰۳^{a}	۰/۷۲۰^{a}
	۱۰	۹۸/۶۳^{b}	۱۳۴/۹۳^{b}	۱۲۷/۱۹^{b}	۰/۷۷۰^{b}
سرب	۰	۱۱۲/۱۶^{a}	۱۴۶/۶۶^{ab}	۱۵۷/۰۰^{a}	۰/۷۳۵^{a}
	۱۰۰	۱۰۸/۰۳	۱۴۶/۶۶^{ab}	۱۵۳/۰۲^{a}	۰/۷۴۵^{a}
	۳۰۰	۱۰۶/۰۳^{c}	۱۴۵/۲۰^{b}	۱۳۸/۱۲^{b}	۰/۷۹۹^{b}
	۶۰۰	۹۵/۳۳^{d}	۱۴۰/۸۰^{c}	۱۱۱/۲۹^{c}	۰/۸۹۵^{c}

در هر ستون حرف مشابه نشانه عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که کادمیم و سرب در گیاه کلزا به عنوان عوامل بازدارنده بر روی رشد طول ساقه و ریشه موثر بوده‌اند. با افزایش غلظت سرب و کادمیم، میزان انباشت این عناصر در اندام هوایی و ریشه گیاه کلزا به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت. غلظت بالای کادمیم و سرب در ریشه گیاه کلزا و میزان کم آن در اندام هوایی، حاکی از پایین بودن فاکتور انتقال در این گیاه است. بالا بودن غلظت سرب و کادمیم ریشه گیاه مورد مطالعه و اندک بودن فاکتور انتقال در آن بیانگر کارایی بیشتر این گیاه جهت استفاده در تکنیک تثبیت گیاهی می‌باشد. در این پژوهش اکثر شاخص‌های کیفیت بیولوژیک خاک در بالاترین غلظت به‌کار رفته کادمیم و سرب (به ترتیب ۱۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش یافتند، به جز کسر متابولیک که در هر دو مورد افزایش یافت. همچنین تنش کادمیم و سرب، به‌صورت معنی‌داری سبب افزایش مقاومت روزنه‌ای و غلظت دی‌اکسیدکربن و کاهش پارامترهای تعرق، هدایت روزنه‌ای، هدایت مزوفیلی و فتوسنتز در گیاه کلزا شد.

REFERENCES

Aghababaei, F., Raiesi, F., & Hosseinpur, A. (2014). The combined effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on microbial biomass and enzyme activities in a calcareous soil spiked with cadmium. Applied Soil Ecology, 75, 33-42. (in Farsi)

Alef, K. & Nannipieri, P. 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press, London, UK.

Anderson, J. P. (1982). Soil respiration. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, (methods of soil an2), 831-871.

Anderson, T. H., & Domsch, K. H. (1990). Application of eco-physiological quotients (qCO2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. Soil Biology and Biochemistry, 22(2), 251-255.

Azadbakht, Z., Beheshti Ale Agha, A., Kahrizi, D. & Karami, M. (2018). Study of the reaction of camelina sativa to the presence of heavy elements of cadmium and lead. The 1st International Conference and 3rd National Conference on Sustainable Management of Soil and Environment Resources. 4-5 September 2018. Kerman, Iran.

Azevedo, H., Glória Pinto, C. G., Fernandes, J., Loureiro, S., & Santos, C. (2005). Cadmium effects on sunflower growth and photosynthesis. Journal of Plant Nutrition, 28(12), 2211-2220.

Bazzaz, F. A., Carlson, R. W., & Rolfe, G. L. (1975). Inhibition of corn and sunflower photosynthesis by lead. Physiologia Plantarum, 34(4), 326-329.

Bérard, A., Capowiez, L., Mombo, S., Schreck, E., Dumat, C., Deola, F., & Capowiez, Y. (2016). Soil microbial respiration and PICT responses to an industrial and historic lead pollution: a field study. Environmental Science and Pollution Research, 23(5), 4271-4281.

Bremner J. M., & Mulvaney C. S. (1982). Nitrogen total. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, (methods of soil an2), 595-624.

Brookes, P. C. (1995). The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. Biology and Fertility of soils, 19(4), 269-279.

Bunemann¸ E. K.¸ Schwenke. G. D.¸ & Van Zwieten¸ L.(2006). Impact of agricultural input on soil organisms. A review. Soil Research, 44: 379-406.

Carmo, J. D. (2001). Impacto da aplicação de biossólidos nas atividades microbianas do solo (Doctoral dissertation, M. Sc. Dissertation. Universidade de Sao Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, Brasil).105 pp.

Cenkci¸ S.¸ Cioerci¸ I. H.¸ Yildiz¸ M.¸ Oezay¸ C.¸ Bozdao¸ A.¸ & Terzi¸H. (2010). Lead contamination reduces chlorophyll biosynthesis and genomic template stability in Brassica rapa L. Environmental and Experimental Botany. 67: 467-473.

Chaghakaboodi, Z., Kahrizi, D. & Zebarjadi, A. (2012). Heritability and genetic advance in rapeseed (Brassica napus L.). Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding, 1(2): 16-21.

Chapman H. D. (1965). Total exchangeable bases. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, (methods of soil anb), 902-904.

Dai, J., Becquer, T., Rouiller, J. H., Reversat, G., Bernhard-Reversat, F., & Lavelle, P. (2004). Influence of heavy metals on C and N mineralisation and microbial biomass in Zn-, Pb-, Cu-, and Cd-contaminated soils. Applied Soil Ecology, 25(2), 99-109.

Dayani L., & Raiesi F. (2011). The Role of Compost in Alleviating Cadmium Effects on Microbial Respiration and Biomass, and Phosphatase Activity in Soil. Journal of Water and Soil 25(1), 161-173.[in Farsi].

Devis J. & Freitas.(1970) . Calcium plus Magnesium and Calcium in Physical and Chemical Methods of Soil & Water Analysis. Food andAgriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, Soil Bulletin .10 : 212-217.

Ehsan, S., Ali, S., Noureen, S., Mahmood, K., Farid, M., Ishaque, W., ... & Rizwan, M. (2014). Citric acid assisted phytoremediation of cadmium by Brassica napus L. Ecotoxicology and Environmental Safety, 106, 164-172.

Ferreyroa, G. V., Lagorio, M. G., Trinelli, M. A., Lavado, R. S., & Molina, F. V. (2017). Lead effects on Brassica napus photosynthetic organs. Ecotoxicology and Environmental Safety, 140,

www.SID.ir

Archive of SID

123-130

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis 1 (No. methodsofsoilan1, pp. 383-411). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.

Halder, K. P., & Burrage, S. W. (2004). Effect of drought stress on photosynthesis and leaf gas exchange of rice grown in nutrient film technique (NFT). Pakistan Journal of Biological Sciences, 7(4), 563-565.

Hattori, H. (1992). Influence of heavy metals on soil microbial activities. Soil Science and Plant Nutrition, 38(1), 93-100.

Horwath, W.R., & Paul, E.A. (1994). Microbial biomass. In: D.R. Buxton (Ed), Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America, Madison, Wis, 753-773.

Hosseinzade, S.R., Cheniany, M.,& Salimi, A. (2014). Effects of foliar application of methanol on physiological characteristics of chickpea (Cicer arietinum L.) under drought stress. Iranian Journal of Pulses Research, 5: 71-82. (In Farsi).

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants, 3rd edn CRC Press. Boca Raton, FL, USA.

Kahrizi, D., Allahvarand T. (2012). Estimation and Interrelationships of Genetic Variability Parameters of Some Morpho-phenological Traits in Spring Rapeseed (Brassica napus L.). Asian Journal of Biological Sciences, 5(7): 358-364.

Karimi, A. & Khodaverdiloo, H. (2014). Soil Biological Quality as Influenced by Lead (Pb) Contamination under Centaurea (Centaurea cyanus) Vegetation. Soil Management and Sustainable Production, 4(1), 127-143. (in Farsi).

Kazemalilou S., Rasouli-Sadaghiani M.H., Khodaverdiloo H. & Barin M. (2013). Soil Cd Contamination and Evaluation of It's Effects on Soil Biological Quality and Plant Growth. Water and Soil Science,1(1). (In Farsi).

Khan, S., Hesham, A. E. L., Qiao, M., Rehman, S., & He, J. Z. (2010). Effects of Cd and Pb on soil microbial community structure and activities. Environmental Science and Pollution Research, 17(2), 288-296.

Kizilkaya, R. and Aşkin, T., (2002). Influence of cadmium fractions on microbiological properties in Bafra plain soils. Archives of Agronomy and Soil Science, 48(3), 263-272.

Lacalle, R. G., Gómez-Sagasti, M. T., Artetxe, U., Garbisu, C., & Becerril, J. M. (2018). Brassica napus has a key role in the recovery of the health of soils contaminated with metals and diesel by rhizoremediation. Science of The Total Environment, 618, 347-356.

Landi, L., Renella, G., Moreno, J. L., Falchini, L., & Nannipieri, P. (2000). Influence of cadmium on the metabolic quotient, L-: D-glutamic acid respiration ratio and enzyme activity: microbial biomass ratio under laboratory conditions. Biology and Fertility of Soils, 32(1), 8-16.

Liu, J., Cao, C., Wong, M., Zhang, Z., & Chai, Y. (2010). Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake. Journal of Environmental Sciences, 22(7), 1067-1072.

Liu J.G., Li K.Q., Xu J.K., Zhang Z.J., Ma T.B., Lu X.L., Yang J.H., and Zhu Q.S. (2003). Lead toxicity, uptake, and translocation in different rice cultivars. Plant Science, 165: 793-802.

Loeppert R. H., and Suarez L. 1996. Carbonate and gypsum. In 'Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. (Ed. DL Sparks) pp. 437–474. Soil Science Society of America: Madison, WI.

Mahler, B. J., Van Metre, P. C., & Callender, E. (2006). Trends in metals in urban and reference lake sediments across the United States, 1970 to 2001. Environmental Toxicology and Chemistry, 25(7), 1698-1709.

Mihalescu, L. A., Mare-Rosca, O. E., Marian, M., & Bildar, C. F. (2010). Research on the growth intensity of the Zea mays L. plantlets aerial parts under cadmium treatment. Analele Universitatii din Oradea, Fascicula Biologie, 147-151.

Mojtabaie Zamani, M., Nabipour, M., & Meskarbashee, M. (2015). Effect of heat stress during grain filling on photosynthesis and grain yield of bread wheat (Triticum aestivum L.) genotypes. Iranian Journal of Crop Sciences, 17(1). (In Farsi).

Morawska-Płoskonka, J., & Niklińska, M. (2013). Effects of Soil Moisture and Nickel Contamination on Microbial Respiration Rates in Heavy Metal-Polluted Soils. Polish Journal of Environmental Studies, 22(5).

Naderi, M. R., Danesh-Shahraki, A., & Raiesi, F. (2014). Evaluation the Efficiency of Six Sunflower Cultivars in Phytoextraction of Lead from a Pb-bearing Soil for Long Term. Majallah-i āb va Khāk, 28(3), 596-604. (in Farsi).

Nazari M., Fallah S., Kiani Sh. & Jalilian J. (2014). Effect of chemical and biological fertilizers combination on cadmium concentration and growth parameters of fenugreek medicinal plant in cadmium-polluted soil, J. of Soil Management and Sustainable Production, 4(3), (in Farsi).

Nwachukwu¸ O. I.¸ & Pulford¸ I. D. (2011). Microbial respiration as an indication of metal toxicity in contaminated organic materials. Journal of Hazardous Materials¸ 185(2-3), 1140-1147.

Olsen S.R. & Sommers L.E. (1982). Phosphorus. In: A.L. Miller (Ed), Methods of soil analysis, part 2. Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America, Madison, 403-430.

Park J.¸ Kim J.Y.¸ and Kim K. W.¸(2012). Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals using Brassica napus. Geosystem Engineering. 15(1),10-18.

Rasouli Sadaghiani, M.R., & Kazemalilou, H. K. M. B. S. (2016). Influence of PGPR Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and some Physiological Parameters of Onopordon acanthium in a Cd-Contaminated Soil. Journal of Water and Soil, 30(2), 542-554. (in Farsi).

www.SID.ir

Archive of SID

Rowell, D.L. 1994. Mesurement of the composition of soil solution. Soil science methods and Application, Part7. 146p.

Sadeghi, E., Raiesi, F., & Hosseinpour, A. (2018). Interactive effects of salinity and cadmium pollution on microbial respiration and biomass in a calcareous soil treated with plant residue. Journal of Water and Soil, 31(6). (in Farsi).

Sisakht Nejad, M., & Zolfaghari, R. (2015). The Effect of Water Stress on Gas Exchange in Two Iranian Oak Species (Quercus brantii) and Vyvl (Quercus libani). Zagros Forests Research, 1(2), 15-31.

Sokouti, R. (2015). Application of soil quality index in assessing rangeland productivity. Journal of Watershed Engineering and Management. 6(4), 302-311. (In Farsi).

Soltani I, F., Ghorbanli, M.L. & Manouchehr, K.K., (2006). Effect of cadmium on photosynthetic pigments, sugars and malondialdehyde content in (Brassica napus L.). Iran Biology Journal. 9(2), 134-136. (in Farsi).

Tabatabaei, S. A., & Ansari, O. (2016). Effect of Cu (SO4) Stress and Plant Growth Regulators on Germination Characteristics and Biochemical Changes of Brassica napus. Iranian Journal of Seed Research, 3(1), 109-121.(in Farsi).

Torres, E., Cid, A., Herrero, C., & Abalde, J. (2000). Effect of cadmium on growth, ATP content, carbon fixation and ultrastructure in the marine diatom Phaeodactylum tricornutum Bohlin. Water, Air, and Soil Pollution, 117(1-4), 1-14.

Turan M., & Esring A. (2007). Phytoremediation based on canola (Brassica napus L.) and Indian mustard (Brassica juncea L.) planted on spiked soil by aliquot amount of Cd, Cu, Pb, and Zn. Plant Soil Environment. 53(1),7-15

Tüzen, M. (2003). Determination of heavy metals in soil, mushroom and plant samples by atomic absorption spectrometry. Microchemical Journal, 74(3), 289-297.

Venora, G., & Calcagno, F. (1991). Study of stomatal parameters for selection of drought resistant varieties in Triticum durum DESF. Euphytica, 57(3), 275-283.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37(1), 29-38.

Wise, R. R., Frederick, J. R., Alm, D. M., Kramer, D. M., Hesketh, J. D., Crofts, A. R., & Ort, D. R. (1990). Investigation of the limitations to photosynthesis induced by leaf water deficit in field-grown sunflower (Helianthus annuus L.). Plant, Cell & Environment, 13(9), 923-931.

Xiao, X. Y., Wang, M. W., Zhu, H. W., Guo, Z. H., Han, X. Q., & Zeng, P. (2017). Response of soil microbial activities and microbial community structure to vanadium stress. Ecotoxicology and Environmental Safety, 142, 200-206.

Zhang, F. P., Li, C. F., Tong, L. G., Yue, L. X., Li, P., Ciren, Y. J., & Cao, C. G. (2010). Response of microbial characteristics to heavy metal pollution of mining soils in central Tibet, China. Applied Soil Ecology, 45(3), 144-151.

Zhang, J., Wang, L. H., Yang, J. C., Liu, H., & Dai, J. L. (2015). Health risk to residents and stimulation to inherent bacteria of various heavy metals in soil. Science of the Total Environment, 508, 29-36.

Zhu, G., Xiao, H., Guo, Q., Song, B., Zheng, G., Zhang, Z. & Okoli, C. P. (2018). Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in wasteland of the downstream of a lead-zinc mining area in Guangxi, Southwest China. Ecotoxicology and Environmental safety, 151, 266-271.

Zirgoli, MH., & Kahrizi, D. (2015). Effects of end-season drought stress on yield and yield components of rapeseed (*Brassica napus* L.) in warm regions of Kermanshah Province. *Biharean Biologist*, *9*:133-140.

www.SID.ir