

## تأثیر تیمارهای نانو سیلیسیم بر برخی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و تغذیه‌ای چچم (*Lolium perenne*) در خاک آلوده به فلزهای سنگین (سرب، روی، کادمیوم)

محبوبه میرزاخانی<sup>۱</sup>، بابک متشعزاده<sup>۲\*</sup>، حسین میرسید حسینی<sup>۲</sup> و رضا مالمیر<sup>۱</sup>  
۱ و ۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲۴ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۲)

### چکیده

سیلیسیم یک عنصر غذایی ضروری برای برخی گیاهان علفی و عنصری سودمند برای بهبود رشد و رویارویی با تنش‌های زنده و غیرزنده به شمار می‌رود. این پژوهش روی خاک آلوده طبیعی به فلزهای سنگین از شهرک صنعتی روی در زنجان انجام گرفت و طی آن تأثیر کاربرد ذرات نانو سیلیس بر پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی و تغذیه‌ای چچم (*Lolium perenne*) بررسی شد. تیمار نانو سیلیس در شش سطح ۱۰۰ (NS<sub>1</sub>)، ۲۰۰ (NS<sub>2</sub>)، ۵۰۰ (NS<sub>3</sub>)، ۱۰۰۰ (NS<sub>4</sub>)، ۲۰۰۰ (NS<sub>5</sub>) و تیمار شاهد (NS<sub>0</sub>) برحسب میلی‌گرم نانو سیلیس بر کیلوگرم خاک گلدان در قالب طرح کامل تصادفی و پنج تکرار در گلخانه اجرا شد. به‌منظور اضافه کردن نانو سیلیسیم به خاک، دروایه (سوسپانسیون) آن تهیه و با مقدار مشخصی آب که بر پایه ظرفیت مزرعه تعیین شده بود، مخلوط و با استفاده از پیپت، قطره‌قطره به خاک اضافه شد. پس از گذشت دوره کاشت و داشت گیاه چچم، اندام‌های هوایی گیاه برداشت و غلظت عنصرهای سنگین (سرب، روی و کادمیوم) و عنصرهای غذایی (فسفر، پتاسیم و سیلیسیم) در اندام‌های هوایی اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، کاربرد سیلیسیم بر جذب عنصرهای آلاینده کادمیوم و روی و عنصرهای غذایی پتاسیم، فسفر و سیلیسیم در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین کاربرد سیلیسیم در خاک، جذب آلاینده‌های روی و کادمیوم را در گیاه افزایش داد. همچنین بیشترین میزان جذب سیلیسیم در اندام‌های هوایی چچم، در تیمار NS<sub>5</sub> گزارش شد که نسبت به سطوح دیگر کاربرد نانو و شاهد، تفاوت معنی‌داری نشان داد. در مجموع کاربرد سیلیسیم، سبب بهبود وضعیت رشد گیاه، جذب عنصرهای غذایی و مقاومت به تنش شد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی فلزهای سنگین، پاسخ‌های تغذیه‌ای، تنش، چچم، سیلیسیم، عنصرهای غذایی.

## Effect of nano-silicon treatments on some physiological and nutritional responses of *Lolium perenne* in soils contaminated with heavy metals (Pb, Cd and Zn)

Mahboubeh Mirzakhani<sup>1</sup>, Babak Motesharezadeh<sup>2\*</sup>, Hossein Mirseyeh Hosseini<sup>2</sup> and Reza Malmir<sup>1</sup>

1, 2. Former M. Sc. Student and Associate Professor, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Nov. 15, 2017 - Accepted: Apr. 22, 2018)

### ABSTRACT

Silicon is an essential nutrient element for some herbaceous plants and a useful element for improving the growth and to encounter with biotic and abiotic stresses. This research was carried out on natural contaminated soil with heavy metals from Zanjan Industrial Town. The effect of nano-silicon particles application on morpho-physiological and nutritional responses of *Lolium perenne* was investigated. Nano-silicon treatments were selected in six levels of 100 (NS<sub>1</sub>), 200 (NS<sub>2</sub>), 500 (NS<sub>3</sub>), 1000 (NS<sub>4</sub>), 2000 (NS<sub>5</sub>), and control treatment (NO) (in mg/kg). Experiments were carried out in a completely randomized design in greenhouse conditions. Nano Silicon added to soil by usage of pipette method. After the planting and cropping stages of *Lolium perenne*, the aboveground parts, the concentration of heavy elements (lead, zinc and cadmium) and nutrient elements (phosphorus, potassium and silicon) were measured. Results showed that application of silicon on the adsorption of cadmium and zinc and nutrient elements of potassium, phosphorus, and silicon was significant at 5% level. Also, the application of silicon in soil increased the absorption of zinc and cadmium contaminants in the plant. The highest amount of silicon adsorption in *Lolium perenne* was observed in NS<sub>5</sub> treatment, which showed a significant difference compared to other levels of nano and control treatment. In general, application of silicon improved plant growth and increased the uptake of nutrients in the contamination/stress of the heavy metals.

**Keywords:** Heavy metals pollution stress, *Lolium perenne*, nutrient element, nutritional response, silicon.

\* Corresponding author E-mail: moteshare@ut.ac.ir

## مقدمه

سیلیسیم با مقدار متوسط ۲۸/۸ درصد وزنی دومین عنصر فراوان پوسته زمین بعد از اکسیژن است (Tubaña & Heckman, 2015). بررسی‌ها نشان داده است، سیلیسیم عنصر سودمند برای بسیاری از گونه‌های گیاهی از جمله: گندم، برنج، ذرت و خیزران است و ضروری بودن آن برای گیاهان C4 مانند برخی رقم‌های برنج و نیشکر و ذرت و سورگوم به اثبات رسیده و اثر بهبوددهنده آن نیز سبب شده جزو عنصرهای غذایی سودمند طبقه‌بندی شود. پژوهشگران در آخرین بازنگری تعریف عنصرهای ضروری، ملاک ضروری بودن را، حضور در بخشی از یک مولکول و نیز جلوگیری از بروز ناهنجاری‌های رشد و تولیدمثل عنوان کردند و بنابراین سیلیسیم بی‌شک یک عنصر ضروری برای گیاهان عالی بشمار می‌رود (Epstein & Bloom, 2005). سیلیسیم گیاه را در برابر تنش‌های مختلف مانند فلزهای سنگین، بیماری‌ها، تابش خورشید و خشکسالی حفظ می‌کند (Imtiaz *et al.*, 2016). اسید سیلیسیک می‌تواند با فلزهای سنگین (کادمیوم، سرب، روی و جیوه) به شکل ترکیب‌های پیچیده (کمپلکس) محلول و سیلیکات‌های فلزهای سنگین کم محلول ترکیب شود (Datnoff *et al.*, 2001). به نظر می‌رسد سیلیس بی‌شکل نخستین منبع سیلیسیم در دسترس برای گیاهان باشد (Adrees *et al.*, 2015). گیاهان و ریز موجودات، سیلیسیم را به صورت مونوسیلیسیک اسید یا آنیون آن جذب می‌کنند (Matychenkov *et al.*, 2016). مقدار  $H_4SiO_4$  آزاد شده از اشکال مختلف  $SiO_2$  بستگی به ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی خاک دارد (Tubaña & Heckman, 2015). مقدار سیلیسیم موجود در بافت‌های همه گیاهان رشد یافته در خاک از ۰/۱ تا ۱۰ درصد وزنی گیاه متفاوت است (Adrees *et al.*, 2015). در حال غلظت سیلیسیم در بافت‌های گیاهی بسته به ویژگی‌های جذب و انتقال سیلیسیم در بین گونه‌ها و نژادگان (ژنوتیپ)‌های درون گونه‌ها متفاوت است (Adrees *et al.*, 2015; Imtiaz *et al.*, 2016).

آلودگی خاک به فلزهای سنگین به نوع و شیمی مواد مادری اولیه خاک بستگی دارد. با این حال

فعالیت‌های انسان منجر به تجمع غلظت بسیار بیشتر آن‌ها نسبت به مقادیر طبیعی این فلزها در منابع خاک شده است (Mirsal, 2008). فلزهای سنگین برخلاف آلاینده‌های آلی به‌طور کلی تغییرناپذیر، تجزیه‌ناپذیر و در خاک پایدار هستند (Adriano *et al.*, 2004). نتایج بررسی‌های Lombi *et al.* (2002)، Akmal *et al.* (2005)، Castaldi *et al.* (2005) اثرگذاری‌های منفی آلودگی فلزهای سنگین در رشد گیاه و همچنین در اندازه، ساختار و تنوع کارکردی جمعیت میکروبی خاک را نشان داده است. فلزهای سنگین کادمیوم، سرب، کروم، مس، منگنز و روی سهم عمده‌ای در آلودگی خاک دارند، در میان فلزهای سنگین کادمیوم، سرب نقش زیستی (بیولوژیکی) دارند و برای رشد گیاه ضروری نیستند در حالی که دیگر فلزها مانند مس، روی و منگنز در میزان کم برای رشد طبیعی گیاه لازم‌اند اما در غلظت‌های بالاتر از حد نیاز برای گیاهان و حیوانات به‌شدت سمی هستند (Adrees *et al.*, 2015).

طراحی، ساخت، توسعه و استفاده از محصولات که اندازه آن‌ها در بازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر قرار دارند را نانوفناوری (تکنولوژی) گویند. در حقیقت اینجا صحبت از ریز شدن است که این کار تماس بیشتر، فعالیت بیشتر و افزایش مساحت را ممکن می‌سازد. نانو یک مقیاس جدید در فناوری‌ها و یک رویکرد جدید در همه رشته‌هاست (Moradi *et al.*, 2008). در پالایش آلاینده‌ها به کمک ذرات نانو (نانو ریمیدیشن) از آن‌ها برای پاک‌سازی انواع آلاینده‌ها از محیط استفاده می‌شود. این روش برای پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی، فاضلاب، خاک، رسوبات و دیگر محیط‌های حاوی فلزهای سنگین استفاده می‌شود (U.S.EPA., 2014). Chen *et al.* (2010) در نتایج بررسی‌های خود بیان می‌کنند، جذب یا تثبیت فلزهای سنگین به‌وسیله نانو ذرات در خاک فناوری زیست سازگار هستند که تا حد زیادی برای از بین بردن آلاینده‌های آلی و فلزهای سنگین از آب‌و خاک آلوده بررسی می‌شوند. گیاهان در آغاز به تنش فلزهای سنگین با تجمع این فلزها در اندام‌های مختلف خود پاسخ می‌دهند.

در جاده شهرک صنعتی روی زنجان به صورت تصادفی از عمق ۳۰-۰ سانتی متر تهیه شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، درصد رطوبت اشباع خاک و ویژگی‌های شیمیایی {ظرفیت تبادل کاتیونی، pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل، کربنات و بی‌کربنات، پتاسیم قابل جذب، سدیم محلول، فسفر قابل جذب، سیلیسیم، کلسیم و منیزیم، کلر، نیتروژن کل، سرب، روی، کادمیوم، آهن، مس و منگنز قابل استخراج با DTPA و سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج با اسید نیتریک} به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و گزارش شد (Linsay & Norvell, 1978; Ali-ehyae & Behbahanizadeh, 1994). نانو سیلیسیم با فرمول شیمیایی  $\text{SiO}_2\text{-Nano}$  با خلوص ۹۹/۵ درصد (با توجه به نتایج پراش پرتو ایکس شکل A-۱، نشان‌دهنده حضور تنها دو عنصر سیلیسیم (۴۱/۹۰ درصد وزنی) و اکسیژن (۵۸/۱۰ درصد وزنی) در ماده است) از شرکت شیمیایی پاسارگاد نوین تهیه شد. ویژگی ذرات نانو سیلیس با استفاده از تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) بررسی و تأیید شد به طوری که اندازه ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر است (شکل A-۱). ویژگی‌های ریخت‌شناسی نانو سیلیس در شکل ۱ ارائه شده است. به منظور اضافه کردن نانو سیلیسیم به خاک‌ها دروایه (سوسپانسیون) آن تهیه شد، به این صورت که مقدار مورد نظر نانو سیلیسیم برای هر گلدان محاسبه شد و با مقدار مشخصی آب که بر پایه ظرفیت زراعی خاک تعیین شده بود، مخلوط شد و پس از آن دروایه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه روی همزن برقی (استر) قرار گرفتند و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه فراصوت (اولتراسونیک) با توان ۲۰۰ وات و دور ۰/۵ قرار داده شدند. دروایه‌های تهیه شده با استفاده از پیپت قطره‌قطره به خاک‌ها اضافه و به خوبی با خاک مخلوط شدند. به منظور جلوگیری از ته‌نشینی نانو ذرات و حفظ پراکندگی همگن ذرات نانو، دروایه‌ها باید به طور مداوم هم زده شوند که این کار به کمک همزن برقی انجام گرفت (Schimel & Holden, 2011).

با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین (Adrees *et al.*, 2015; Matichenkov *et al.*, 2015; Rasouli *et*

گیاه *Lolium perenne* L. معروف به چچم دائمی (چندساله) نوعی چمن از راسته گندم‌سانان و خانواده غلات (پوآسه) است (Reader's Digest, 2001). در بررسی ۱۷۵ گونه گیاهی که در یک نوع خاک رشد کرده بودند، بر پایه پاسخ گیاهان به جذب سیلیسیم، دو گروه گیاهان را از هم تشخیص دادند، گروه گیاهان انباشت‌کننده سیلیسیم، که میزان جذب سیلیسیم در آن‌ها، به میزان زیادی بیشتر از جذب آب بوده و گروه گیاهان غیر انباشت‌کننده که میزان جذب سیلیسیم در این گیاهان همانند یا کمتر از آب است. در میان گیاهان سیلیسیم دوست گیاه مرتعی چچم چندساله (چمن یارندی) با قابلیت جذب بیش از ۳ درصد سیلیسیم به‌عنوان یک بیش انباشتگر انتخاب شده است (Hodson *et al.*, 2005). نتایج چندین بررسی نشان داده است، *Lolium perenne* به دلیل تحمل سطوح بالای آلودگی خاک گونه گیاهی مناسبی برای گیاه پالایی است (Lambrechts *et al.*, 2013; Taghizadeh *et al.*, 2012). پژوهشگران در بررسی تأثیر نیترات سرب بر جوانه‌زنی و استقرار سه رقم چمن (برموداگراس، رایگراس و کنتاکی بلوگرس) دریافتند، سرب جوانه‌زنی بذرها را افزایش اما بر رشد ریشه‌چه تأثیر با‌دارندگی داشت. بیشترین تجمع سرب در ریشه بود و بین سه رقم مورد بررسی، چمن رایگراس به‌عنوان یک گیاه پوششی و سوپر جاذب در مکان‌های آلوده به سرب معرفی شد (Taghizadeh *et al.*, 2012). استقرار پوشش گیاهی در خاک از نظر کاهش تحرک آلاینده از طریق آبشویی و فرسایش خاک سودمند است و باعث افزایش تنوع زیستی می‌شود، همچنین منظره زیبا و دلنشینی به وجود می‌آورد. در میان گیاهان مناسب برای گیاه پالایی *Lolium perenne* به نظر می‌رسد انتخاب بسیار خوبی باشد. این گیاه، به‌عنوان گیاهی با تولید زیست‌توده بالا شناخته می‌شود (Elouear *et al.*, 2014). این پژوهش، با هدف بررسی برخی پاسخ‌های فیزیولوژیکی و تغذیه‌ای چچم در برابر تنش فلزهای سنگین در شرایط گلخانه‌ای اجرا شد.

## مواد و روش‌ها

برای اجرای این پژوهش، در آغاز خاک طبیعی آلوده به فلزهای سنگین از شهرک صنعتی روی زنجان واقع

می‌تواند ۳۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم در هر هکتار باشد و البته روش‌های جدید کاشت به دنبال کاهش هزینه بذر مصرفی در هر هکتار است (سازمان پارک‌ها و فضای سبز تهران، ۲۰۰۶). بذرهای خلوص ۹۶ درصد و قوه نامیه ۸۰ درصد داشت. کود اوره (۴۶ درصد) به مقدار ۱۰۸/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم یکبار در دوره رویشی به گلدان‌ها اضافه شد. پس از گذشت ۵ هفته در تاریخ (۱۳۹۵/۳/۲۱)، گیاهان از فاصله ۵ سانتی‌متری سرزنی و برداشت شدند و برای اندازه‌گیری غلظت عنصرهای غذایی فسفر، پتاسیم، سیلیسیم و فلزهای سنگین سرب، روی و کادمیوم در اندام‌های هوایی گیاه، از روش سوزاندن ۱ گرم نمونه خشک اندام‌های هوایی گیاه در کوره الکتریکی با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس و به مدت ۴ ساعت استفاده شد، به طوری که نمونه‌ها پس از خروج از کوره و ترکیب با ۱۰ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ مولار و قرار گرفتن در حمام بن ماری و در نهایت با عبور دادن محتویات از کاغذ صافی درون بالون ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری صاف و عصاره نمونه‌ها به دست آمد، سپس با استفاده از دستگاه جذب اتمی Shimadzu AA670 غلظت فلزهای سرب، روی، کادمیوم، در نمونه‌های به دست آمده، اندازه‌گیری و برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شد (Cottenie, 1980). غلظت عنصرهای پتاسیم (درصد)، فسفر (درصد)، سیلیسیم (درصد)، به ترتیب با دستگاه نورسنج شعله‌ای (فلیم فتومتر) مدل ELE، طیف‌سنج نوری (اسپکتروفتومتر) مدل Shimadzu UV 3100، و در نهایت سیلیسیم با روش رنگ‌سنجی (رنگ زرد) و دستگاه طیف‌سنج نوری، به ترتیب بر پایه منابع (Rayan et al., 2001; Kuo, 1980; Eliot & Synder, 1991) اندازه‌گیری شد. داده‌های به دست آمده از آزمایش، در قالب طرح کامل تصادفی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS تجزیه و تحلیل آماری شد. مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون LSD در سطح ۱ درصد و رسم جدول‌ها و نمودارها با نرم‌افزار Excel 2016 انجام شد.

### نتایج و بحث

بنابر نتایج ارائه شده در جدول ۱، خاک مورد پژوهش در این آزمایش، دارای بافت لومی رسی، غیر شور و

(al., 2012) تیمارهای مورد بررسی شامل ذرات نانو سیلیسیم (NS: Nano Silicon) در شش سطح ۱۰۰ (NS<sub>1</sub>)، ۲۰۰ (NGS<sub>2</sub>)، ۵۰۰ (NS<sub>3</sub>)، ۱۰۰۰ (NS<sub>4</sub>)، ۲۰۰۰ (NS<sub>5</sub>) و تیمار شاهد (NS<sub>0</sub>) برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم اعمال شد. تیمارهای نانو سیلیسیم به گلدان‌های حاوی ۳/۵ کیلوگرم نمونه خاک تجزیه شده اضافه و به خوبی با خاک مخلوط و یکنواخت شد. این آزمایش در قالب طرح کامل تصادفی با شش تیمار در پنج تکرار و سی گلدان انجام شد. همه گلدان‌ها پیش از کشت بذر به مدت یک ماه به منظور ایجاد تعادل در خاک در شرایط اتاقک رشد (انکوباسیون) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند (Yizong et al., 2009) و در این مدت آبیاری گلدان‌ها تا ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه با آب مقطر انجام شد و پس از آن نمونه برداری از خاک گلدان‌ها با هدف بررسی تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر ویژگی‌های مورد نظر خاک صورت گرفت. پس از آماده‌سازی، گلدان‌ها به گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه تهران منتقل شدند. دمای گلخانه ۲۴ درجه سلسیوس و رطوبت آن روی ۴۰ درصد تنظیم و نور گلخانه هم به مدت ۱۲ ساعت در طول شبانه‌روز تنظیم شد. در تاریخ ۱۳۹۵/۲/۲۱ در هر گلدان ۲ گرم (معادل حدود ۱۰۴۰ عدد) بذر گیاه *Lolium perenne* L. که از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شده بود به صورت سطحی در عمق ۱ سانتی‌متری کاشته شد. آبیاری گیاهان با آب مقطر روزانه تا حد رطوبت ظرفیت مزرعه صورت گرفت (Elouear et al., 2014). میزان بذر چچم در ایران برای هر مترمربع را ۳۰ تا ۶۰ گرم در نظر می‌گیرند (سازمان پارک‌ها و فضای سبز تهران، ۲۰۰۶)، که با توجه به مساحت سطح گلدان‌ها (۰/۲ مترمربع) ۰/۷ گرم بذر لازم بود، اما به دلیل اینکه بذرهای چمن کاشته شده در محیط‌های باز مخلوطی از انواع مختلف بذرهای چمن و ناخالصی دارد و شرایط گلخانه‌ای نیست و نیز بذرهای مورد نظر خلوص بالا و متفاوت داشت و در شرایط گلخانه‌ای کاشته شد برای نتیجه‌گیری بهتر و افزایش احتمال سبز شدن مقدار بذر بیشتری کاشته شد. با توجه به مقدار توصیه شده برای کاشت بذر در محدوده ۳۰ تا ۶۰ گرم در هر مترمربع، مقدار آن در هر هکتار

می‌شود، امکان اعمال طبیعی دامنه مناسبی از میزان فلزها نیست درحالی‌که خاک یادشده، انواع فلزهای آلاینده را داشته و روند طبیعی تعادل را با آلاینده طی کرده است (جدول ۱).

بنابر نتایج به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونی، ابعاد ذرات سیلیسیم مورد استفاده زیر ۱۰۰ نانومتر بوده و امکان جذب توسط گیاه و عبور از غشای یاخته‌ای فراهم است (Fernandez *et al.*, 2013).

حاوی مقادیر مناسب و کافی از عنصرهای غذایی فسفر و پتاسیم و آلوده به انواع فلزهای سنگین شامل سرب، روی و کادمیوم بوده است و شرایط لازم و مناسبی برای طراحی آزمایش و بررسی پاسخ‌های تغذیه‌ای چچم به شرایط تنش آلودگی فلزها را داشته است. در ضمن وجود سطوح مختلف آلودگی طبیعی فلزها، به بروز پاسخ‌های طبیعی‌تر گیاه نیز کمک می‌کند. زیرا در آزمایش‌هایی که آلودگی به‌صورت مصنوعی ایجاد

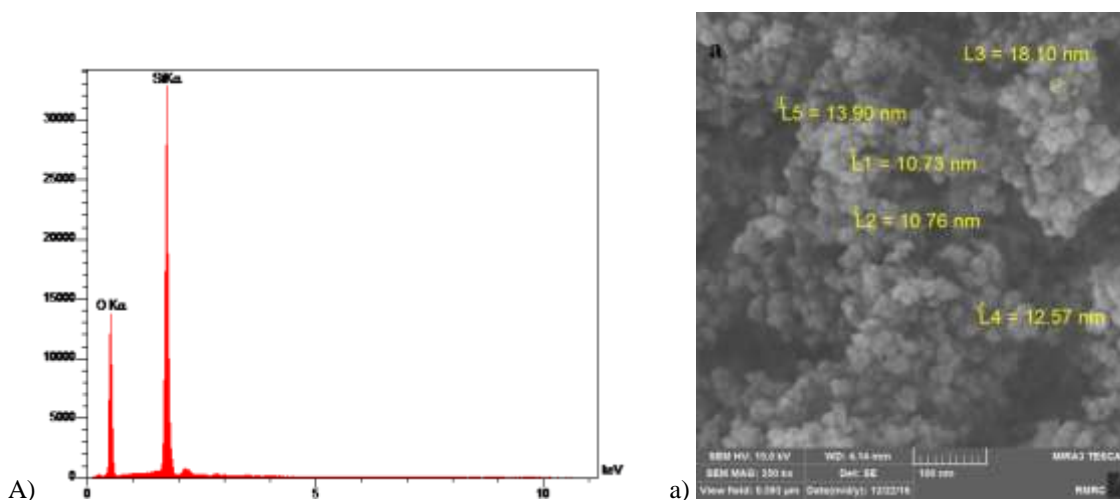
جدول ۱. نتایج برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی

Table 1. Some physico-chemical properties of soil used in this experiment

Soil properties	Value	Soil properties	Value
Sand (%)	38.36	Cl (meq l <sup>-1</sup> )	3
Silt (%)	34.64	Ca (meq l <sup>-1</sup> )	32.6
Clay (%)	27	Mg (meq l <sup>-1</sup> )	8
Soil texture	Clay Loam	Na (meq l <sup>-1</sup> )	0.80
Total N (%)	0.083	Pb DTPA (mg/kg)	278
P (mg/kg)	22.22	Pb HNO <sub>3</sub> (mg/kg)	1365
K (mg/kg)	386.11	Zn DTPA (mg/kg)	570.4
pH (1:1)	8.81	Zn HNO <sub>3</sub> (mg/kg)	2175
EC (1:1) (dS m <sup>-1</sup> )	2.61	Cd DTPA (mg/kg)	23.88
CEC (Cmolc kg <sup>-1</sup> )	14.64	Cd HNO <sub>3</sub> (mg/kg)	88.2
O.M (%)	1.54	Fe DTPA (mg/kg)	16.5
O.C (%)	0.89	Mn DTPA (mg/kg)	14.72
Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	1.3	Cu DTPA (mg/kg)	28
CaCO <sub>3</sub> (%)	23.33	S.P (%)	38.22
Carbonate	0	Si (mg/kg)	91.83
Bicarbonate (meq l <sup>-1</sup> )	4.8		

\*, \*\*: DTPA and HNO<sub>3</sub> Extractable Respectively

Soil sample depth: 0-30 cm



شکل ۱. اسکن میکروسکوپ الکترونی (SEM) از (a) نانو سیلیس در بزرگ‌نمایی ۱۰۰ نانومتر؛ به‌طوری‌که اندازه ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر است (A) نتیجه پراش اشعه ایکس (EDS) نانو سیلیس که نشان‌دهنده حضور تنها دو عنصر سیلیسیم (۴۱/۹۰ درصد وزنی) و اکسیژن (۵۸/۱۰ درصد وزنی) در ماده است.

Figure 1. Nano silicon SEM scans, Nano particle size under 100 nanometer, A) A result of EDS test include silicone and oxygen.

نانو سیلیسیم و سیلیسیم زیست‌توده برنج را از ۳/۳ تا ۱۱/۸ درصد و از ۱/۸ تا ۵/۲ درصد در خاک تیمار شده با ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تیمار در مقایسه با تیمار شاهد (بدون سیلیسیم) افزایش داد و سیلیسیم باعث شد تا جذب و جابجایی عنصر سرب در گیاه برنج کاهش و عملکرد گیاه در شرایط سمیت عنصر سرب در خاک افزایش یابد (Imtiaz et al., 2016).

سمیت فلزهای سنگین تأثیر منفی بر تولید زیست‌توده در همه محصولات زراعی دارد، نتایج بعضی از بررسی‌ها اثر بهبوددهنده سیلیسیم بر سمیت فلزهای مشخصی همچون روی، منگنز، آلومینیم، مس و کادمیوم را در بسیاری از گونه‌های گیاهی گزارش داده‌اند (Adrees et al., 2015). اما در مورد گیاه *Lolium perenne* در این پژوهش این تأثیر بهبوددهنده مشاهده نشد، البته باید در نظر داشت در این پژوهش این گیاه در خاک طبیعی آلوده به انواع فلزهای سنگین (سرب، روی و کادمیوم) کشت شده که سیلیسیم تأثیر به سزایی در کاهش آلودگی فلزهای سنگین در خاک داشته است و مقادیر قابل توجهی از این فلزهای سنگین در گیاه تجمع یافته‌اند که می‌توانند بر رشد گیاه تأثیر بگذارند. بر پایه گزارش Lambrechts et al. (2013) تجمع فلزهای کادمیوم و روی در ریشه گیاه *Lolium perenne* تأثیر قوی بر شبکه ریشه دارد و موجب کاهش زیست‌توده کل ریشه به وسیله محدود کردن عمق ریشه و کاهش طول ریشه می‌شود. Naeem et al. (2104) در نتایج بررسی‌های خود گزارش کردند، سیلیسیم به کاربرده شده در خاک آلوده به کادمیوم زیر کشت گیاه گندم، وزن تر و خشک ریشه و اندام‌های هوایی را بهبود بخشید.

## تأثیر تیمارهای سیلیسیم بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و جذب عنصرهای غذایی در گیاه

در جدول ۲ نتایج جدول تجزیه واریانس اثر تیمارها بر وزن تر و خشک، فسفر و پتاسیم اندام‌های هوایی گیاه *Lolium perenne* آورده شده است.

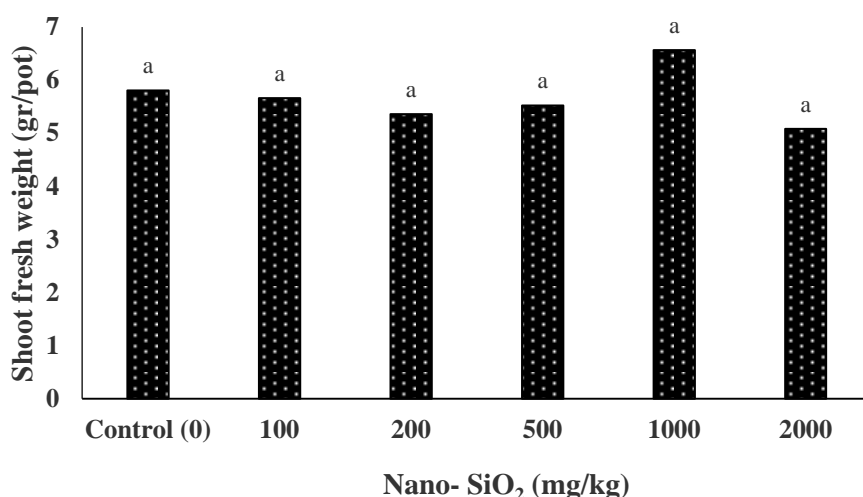
نتایج آزمایش نشان داد، تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیسیم بر میزان وزن تر و خشک گیاه *Lolium perenne* معنی‌دار نبود (جدول ۲ و شکل ۲). البته باید به این نکته اشاره کرد که این گیاه، وزن بسیار کمی دارد و شاید به همین دلیل تفاوتی به لحاظ آماری ایجاد نشده و برای نتیجه‌گیری بهتر بررسی تأثیر تیمارها بر وزن تر و خشک به نظر می‌رسد بهتر بود مقدار بیشتری بذر، در گلدان‌ها- با تراکم بالاتر- کاشته می‌شد. همچنین مدت‌زمان کشت کوتاه و شامل یک برداشت (یک چین) بود در صورتی که در بررسی‌های چمن مدت‌زمان کشت بیشتر است. بنابراین توصیه می‌شود در پژوهش‌های آتی تراکم بیشتری از بذر با توجه به توصیه‌های علمی موجود (۳۰ الی ۶۰ گرم در هر مترمربع خاک) در نظر گرفته شود (سازمان پارک‌ها و فضای سبز تهران، ۲۰۰۶). نکته مهم دیگر، آلودگی طبیعی خاک به فلزهای سنگین است و در دیگر پژوهش‌ها، نتایج در شرایط آلودگی گزارش نشده است. در نتایج بررسی که توسط Doshi et al. (2008) اشاره شد، به علت وزن خشک پایین گیاه *Lolium perenne* بخشی از دو تکرار به شکل نمونه مرکب با هم مخلوط و سپس با اسید هضم شد. نتایج این تحقیق نشان داد، کاربرد ذرات نانو آلومینوم تأثیر معنی‌داری بر رشد این گیاه نداشت. گزارش‌های دیگری نیز از تأثیر نانو در برنج ارائه شده است. افزودن

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات مورد بررسی اندام‌های هوایی گیاه *Lolium perenne* تحت تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیسیم در خاک  
Table 2. Analysis of variances of some of characteristics in shoot part of *Lolium perenne* Influenced by different levels of nano-silica in the soil

SOV	df	MS							
		Shoot Fresh Weight (gr/pot)	Shoot Dry Weight (gr/pot)	Shoot Lead (mg/kg)	Shoot Zinc (mg/kg)	Shoot Cadmium (mg/kg)	Shoot K (%)	Shoot P (%)	Shoot Si (%)
Nano- SiO <sub>2</sub>	5	1.28 <sup>ns</sup>	0.0644 <sup>ns</sup>	160.29 <sup>ns</sup>	8624.58 <sup>**</sup>	40.09 <sup>**</sup>	0.3173 <sup>*</sup>	0.0014 <sup>**</sup>	0.00000847 <sup>**</sup>
Error	24	1.42	0.0717	149.75	49.75	3.60	0.1105	0.0003	0.00000056
CV (%)		21.09	22.92	14.84	5.07	17.39	27.28	11.68	23.60

ns: نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد، \* درصد و عدم اختلاف معنی‌داری است.

\*\* و \* : Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۲. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر وزن تر اندام‌های هوایی گیاه چچم  
Figure 2. Mean comparison of different treatments of nano silicon on *Lolium perenne* shoot fresh weight

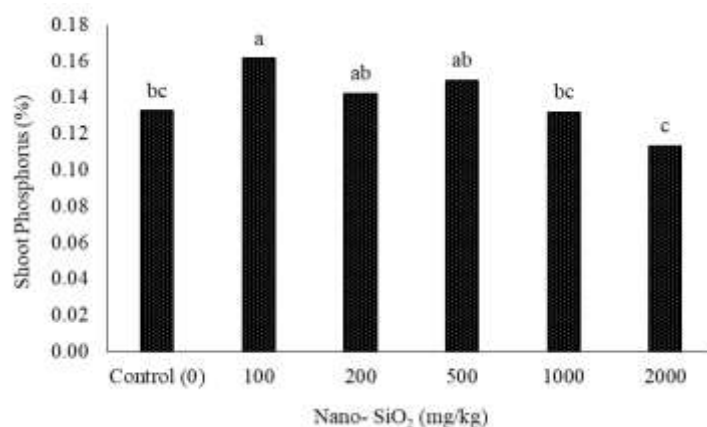
به طوری که با افزایش تیمار نانو سیلیس تا مقدار ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، حالت اول مشاهده می‌شود و فسفر جذب شده در گیاه افزایش یافته است. اما پس از آن با افزایش مقدار تیمار نانو سیلیس تا ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، با توجه به اینکه با افزایش تیمار نانو سیلیس مقدار فسفر قابل جذب خاک افزایش داشته است، فسفر جذب شده در گیاه کاهش پیدا کرده است. گزارش شده است که اصلاح‌گرهای سیلیسیم باعث افزایش دسترسی سیلیسیم، فسفر، کلسیم و منیزیم برای گیاهان می‌شوند (Datnoff et al., 2001).

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس، نشان از معنی دار بودن تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر پتاسیم اندام‌های هوایی در سطح احتمال ۵ درصد داشت، این نشان می‌دهد، دست کم بین دو سطح از سطوح مختلف نانو سیلیس اختلاف وجود دارد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان پتاسیم اندام‌های هوایی گیاه نشان داد، با افزایش میزان غلظت نانو سیلیس میزان پتاسیم اندام‌های هوایی گیاه کاهش یافته به طوری که کمترین مقدار پتاسیم اندام‌های هوایی گیاه (۰/۸۵ درصد) در تیمار NS<sub>5</sub> بود که ۴۵/۵۱ درصد مقدار پتاسیم اندام‌های هوایی گیاه را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد و بیشترین میزان آن (۱/۵۶ درصد)

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس، نشان از معنی دار بودن تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر فسفر اندام‌های هوایی در سطح احتمال ۱ درصد داشت، این امر نشان می‌دهد، دست کم بین دو سطح از سطوح مختلف نانو سیلیس، اختلاف وجود دارد (جدول ۲). مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان فسفر اندام‌های هوایی گیاه *Lolium perenne* نشان داد، با افزایش غلظت نانو سیلیس، میزان فسفر اندام‌های هوایی در آغاز افزایش و پس از آن روند کاهشی پیدا کرده است به طوری که بیشترین مقدار فسفر اندام‌های هوایی (۰/۱۶ درصد) در تیمار NS<sub>1</sub> و کمترین میزان آن (۰/۱۱ درصد) در تیمار NS<sub>5</sub> وجود داشت (شکل ۳). به طوری که ۱۷/۲۲ درصد افزایش فسفر اندام‌های هوایی در تیمار NS<sub>1</sub> و ۱۶/۹۴ درصد کاهش فسفر اندام‌های هوایی گیاه در تیمار NS<sub>5</sub> در مقایسه با تیمار شاهد مشاهده شد. تأثیر مثبت سیلیسیم بر افزایش قابلیت دسترسی فسفر درون گیاه به علت کاهش جذب منگنز و آهن مشاهده شده است. به نظر می‌رسد هنگامی که مقدار فسفر در خاک بالاست، سیلیسیم جذب آن توسط گیاه را کاهش می‌دهد. این پدیده در برنج و بعضی گیاهان غیر انباشت‌گر سیلیسیم مانند گوجه‌فرنگی، توت‌فرنگی، خیار و سویا مشاهده شده است (Ma, 2006). در اینجا هر دو حالت مشاهده می‌شود،

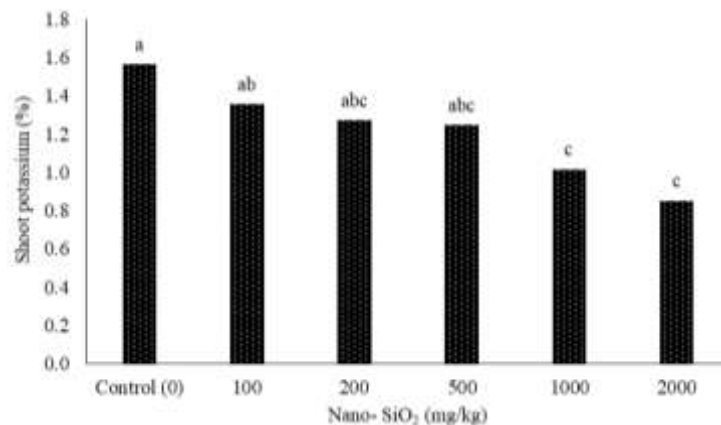
جذب پتاسیم را مختل می‌کند. همچنین توزیع پتاسیم درون اغلب گیاهان بدین شکل است که محتوای پتاسیم محصولی که برداشت می‌شود کمتر از مقدار این عنصر در بقایای گیاهی است. خاک محیطی هتروژن (ناهمگن) است و همین مسئله باعث متفاوت بودن جذب عنصرها توسط گیاه می‌شود. در یک بررسی میدانی مقدار فلزها در گیاه گزنه (*Urtica dioica* L.) رابطه معنی‌داری بین ویژگی‌های خاک یا مقدار فلزهای موجود در خاک با مقدار فلزهای در گیاه مشاهده نشد. همچنین جذب کاتیون‌های فلزی به‌وسیله گیاه به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر حضور آن‌ها به‌صورت پیچیده در محلول خاک است. برای مثال بسیاری از پژوهشگران، ارتباط ضعیفی بین غلظت کل فلز در خاک و غلظت اندازه‌گیری‌شده در گیاه را گزارش کرده‌اند (Hooda, 2010).

در تیمار شاهد وجود داشت (شکل ۴). بر پایه گزارش‌ها، تغذیه سیلیسیمی جذب پتاسیم توسط گیاه را افزایش و جذب سدیم را کاهش می‌دهد و همچنین نسبت پتاسیم به سدیم را افزایش می‌دهد (Imtiaz *et al.*, 2016). کاربرد سیلیسیم باعث افزایش جذب و انتقال پتاسیم و کاهش جذب و انتقال سدیم از ریشه‌ها به اندام‌های هوایی در گیاه جو شد (Tubaña & Heckman, 2015). اما در این پژوهش کاربرد نانو ذرات سیلیس به‌عنوان منبع سیلیسیمی جذب پتاسیم را کاهش داد البته لازم به یادآوری است که خاک ما شرایط متفاوت آلودگی دارد. Laegreid *et al.* (1999) در نتایج بررسی‌های خود به این نکته اشاره می‌کنند، جذب پتاسیم در گیاهان نه‌تنها به موجودی پتاسیم خاک، بلکه به فراوانی دیگر عنصرهای غذایی نیز بستگی دارد. وجود مقادیر زیاد آمونیوم یا منیزیم



شکل ۳. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان فسفر اندام‌های هوایی گیاه چچم

Figure 3. Mean comparison of different treatments of nano silicon on *Lolium perenne* shoot phosphorus content



شکل ۴. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان پتاسیم اندام‌های هوایی گیاه چچم

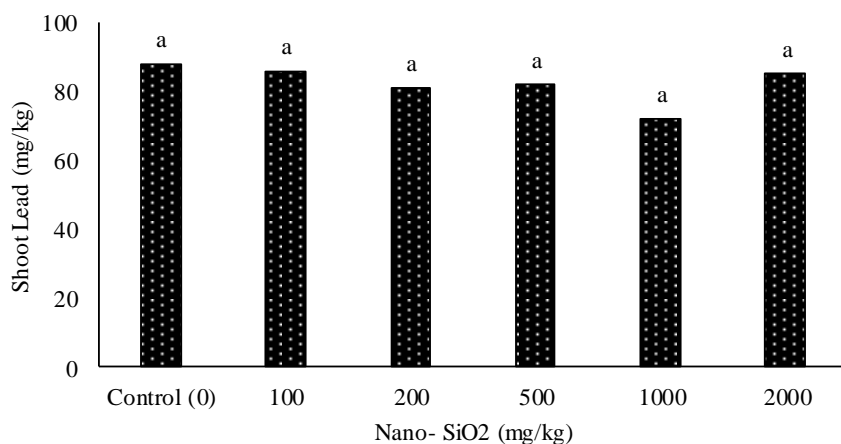
Figure 4. Mean comparison of different treatments of nano silicon on *Lolium perenne* shoot potassium



حضور همزمان کادمیوم و سرب در خاک بر تجمع کادمیوم و سرب گونه‌های مختلف گیاهی تأثیر بازدارنده‌ای داشت، یعنی حضور یک فلز در محیط توانست جذب فلز دیگر محیط را در گیاه کاهش دهد (Motesharezadeh *et al.*, 2013). در این پژوهش، با افزایش غلظت نانو سیلیس میزان کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه *Lolium perenne* افزایش پیدا کرده و همین موضوع، شاید تأثیر بازدارنده‌ای بر جذب سرب در تیمارهای مختلف داشته است. Imtiaz *et al.* (2016) در نتایج بررسی‌های خود گزارش کردند، سیلیسیم به‌طور قابل توجهی جذب و جابجایی سرب در رقم‌های مختلف برنج را کاهش داده است. نقش سیلیسیم به‌عنوان یک بازدارنده فیزیکی در گیاهان نیز می‌تواند به‌عنوان یک فرضیه در کاهش جذب سرب به‌وسیله گیاهان در حضور سیلیسیم در نظر گرفته شود (Liang *et al.*, 2006). در این پژوهش با افزایش غلظت نانو سیلیس و کاهش سرب عصاره‌گیری‌شده با  $\text{HNO}_3$  و قابل دسترس در خاک، میزان جذب سرب توسط گیاه *Lolium perenne* مقداری کاهش یافته است. بعضی پژوهشگران در نتایج بررسی‌های خود گزارش کرده‌اند، کاربرد سیلیسیم در خاک یا محیط رشد آلوده به فلزها می‌تواند باعث افزایش محتوای آن‌ها در بافت‌های گیاه شود درحالی‌که در گزارش‌های دیگری اعلام شده است، کاربرد سیلیسیم باعث کاهش غلظت فلزهای سنگین در گیاهان می‌شود (Matichenkov *et al.*, 2015).

### تأثیر تیمارهای سیلیسیم بر جذب فلزهای سنگین در گیاه

نتایج آزمایش نشان داد، تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان سرب اندام‌های هوایی گیاه *Lolium perenne* معنی‌دار نبود (جدول ۲). مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان سرب اندام‌های هوایی گیاه نشان داد، تفاوت بین تیمارها بر میزان سرب اندام‌های هوایی معنی‌دار نبود، هرچند تفاوت بین تیمارها وجود دارد به‌طوری‌که بیشترین مقدار سرب در تیمار شاهد (۸۸/۰۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین مقدار در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نانو سیلیس (۷۲/۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد، ولی این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۵). در مقایسه با کادمیوم، مس، نیکل و روی در شرایط ثابت کروم و سرب پتانسیل کمی برای جذب توسط گیاه دارند، این دو عنصر به‌طور معمول در مقادیر قابل توجه به بخش‌های بالایی گیاه منتقل نمی‌شوند. سربی که به‌وسیله گیاه جذب می‌شود تا حد زیادی درون ریشه باقی می‌ماند و جابه‌جایی کمی به سمت بخش‌های بالایی گیاه دارد (Hooda, 2010). پژوهشگران در نتایج بررسی‌های خود گزارش کردند، کاربرد تیمار باسیلوس+ نانو سیلیس باعث کاهش عامل انتقال سرب در گیاه آفتابگردان به میزان ۵۸/۱۹ درصد شد (Mousavi *et al.*, 2017). در این پژوهش نیز یکی از دلایل احتمالی موضوع، تجمع سرب در ریشه‌ها، انتقال نیافتن آن به بخش‌های هوایی گیاه تلقی می‌شود.

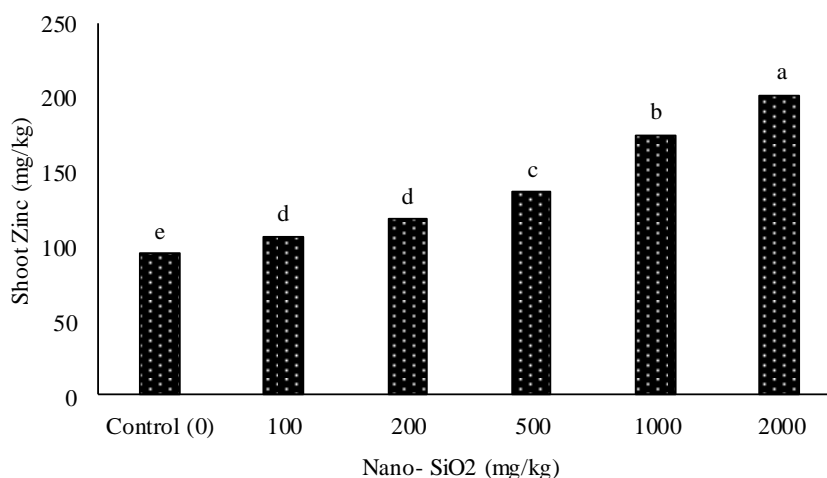


شکل ۵. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان سرب اندام‌های هوایی گیاه چچم

Figure 5. Mean comparison of effect of different treatments of nano silicon on *Lolium perenne* shoot lead content

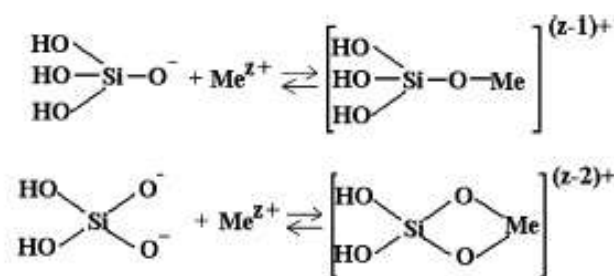
هم متفاوت است. دسترسی روی در محلول خاک برای گیاه به‌طور عمده وابسته به pH، حضور کاتیون‌های رقیب، مکان‌های جذب فراهم‌شده توسط هیدروکسیدهای فلزی، میترال‌های رسی، کلسیم کربنات و ماده آلی است (Hooda, 2010). گزارش شده است، کاربرد سیلیسیم تجمع فلز در گیاه را افزایش داده است. برای مثال کاربرد سیلیسیم در خاک به شکل سیلیکات کلسیم ( $\text{CaSiO}_4$ ) تجمع روی و کادمیوم را در گیاه ذرت افزایش داد (Adrees *et al.*, 2015). سیلیسیک‌اسید می‌تواند با فلزهای سنگین (کادمیوم، سرب، روی و جیوه) به شکل ترکیب‌های پیچیده محلول و سیلیکات‌های فلزهای سنگین کم محلول، ترکیب شود (Datnoff *et al.*, 2001). نتیجه تشکیل پیچیده‌های فلزهای سنگین با آنیون سیلیسیک‌اسید بنا بر شکل ۷ است، در نتیجه این واکنش اگر غلظت مونوسیسیک‌اسید در محلول خاک کمی افزایش یابد مقدار فلزهای سنگین در محلول خاک افزایش می‌یابد (Matichenkov *et al.*, 2015). این موضوع می‌تواند سبب افزایش جذب فلزهای سنگین از جمله روی در گیاه *Lolium perenne* شده باشد. همچنین Nascimento & Da cunha (2009) در نتایج بررسی‌های خود گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم در خاک به شکل سیلیکات کلسیم ( $\text{CaSiO}_3$ ) تجمع کادمیوم و روی را در گیاه ذرت را افزایش داده است.

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس نشان از معنی‌دار بودن تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیسیم بر میزان روی اندام‌های هوایی در سطح احتمال ۱ درصد داشت، این موضوع نشان می‌دهد، بین سطوح مختلف کاربرد نانو سیلیسیم اختلاف معنی‌داری وجود دارد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیسیم بر میزان روی اندام‌های هوایی گیاه *Lolium perenne* نشان داد، با افزایش غلظت نانو سیلیسیم میزان روی اندام‌های هوایی گیاه افزایش پیدا کرده است به‌طوری‌که بیشترین میزان روی اندام‌های هوایی گیاه ( $201/7$  میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار  $\text{NS}_5$  و به میزان  $52/80$  درصد در مقایسه با تیمار شاهد بود و کمترین میزان آن ( $95/19$  میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار شاهد وجود داشت (شکل ۶). در یک بررسی میدانی مقدار فلزها در گیاه گزنه (*Urtica dioica* L.) رابطه معنی‌داری بین ویژگی‌های خاک یا مقدار فلزهای موجود در خاک با مقدار فلزها در گیاه وجود نداشت، ولی برای عنصر روی یک رابطه به دست آمد، در خاک‌هایی با مقدار رس یا ماده آلی پایین، مقدار روی در گیاه بین  $50-500$  میلی‌گرم بر کیلوگرم و در خاک‌هایی با رس بیش از ۱۰ درصد یا ماده آلی بیش از ۳ درصد مقدار روی در گیاه بین  $50-100$  میلی‌گرم در کیلوگرم بود (Hooda, 2010). خاک مورد بررسی ما بیش از ۱۰ درصد رس (۲۷ درصد) و مقدار ماده آلی پایینی ( $1/54$  درصد) داشت و البته نوع گیاه



شکل ۶. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیسیم بر میزان روی اندام‌های هوایی گیاه چچم

Figure 6. Mean comparison of different treatments of nano silicon on *Lolium perenne* shoot zinc content



شکل ۷. تشکیل پیچیده محلول سیلیسیم با فلزهای سنگین: Me هر فلزی می تواند باشد.

Figure 7. Silicon-Complex with heavy metals: Me any metal can be.

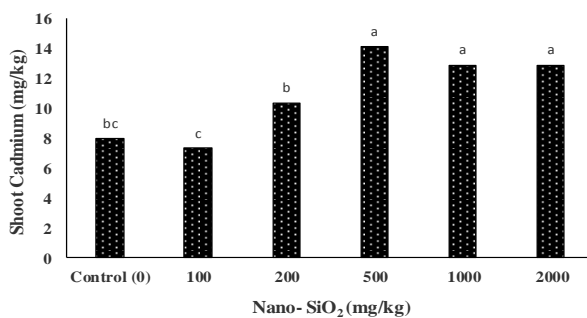
گسترده‌ای از عامل‌ها (رقم گیاه، pH خاک، EC، مینرالوژی، ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار ماده آلی و غلظت دیگر عنصرهای غذایی به‌ویژه نیتروژن، فسفر و روی) باشد. تمایل کادمیوم به تشکیل پیچیده با کلر ( $\text{CdCl}_2^0$ ) به این معنی است که کادمیوم در خاک‌های شور به نسبت متحرک است و بنابراین دسترسی آن برای جذب توسط گیاه بیشتر است (Hooda, 2010). شوری با افزایش زیست‌فراهمی کادمیوم و افزایش انحلال آن از طریق آنیون موجود در ترکیب نمک، می‌تواند سبب افزایش انتقال و تحرک این فلز سنگین شود (Motesharezadeh *et al.*, 2013)، که در اینجا قابلیت هدایت الکتریکی خاک مورد پژوهش، پس از کشت در همه تیمارها افزایش یافته است. همچنین نتایج دیگر پژوهش‌ها نشان داده است، کودهای حاوی عنصرهای پرمصرف بر جذب کادمیوم توسط گیاه می‌تواند تأثیر بگذارد، افزودن کود نیتروژنه به‌طور کلی باعث افزایش جذب کادمیوم در محصولات می‌شود (Hooda, 2010). در این آزمایش گلخانه‌ای نیز برای تأمین نیاز گیاه و بنا بر نتایج آزمون خاک، توصیه کودی انجام شده و مقداری کود اوره پس از کشت گیاه به همه گلدان‌ها افزوده شد که این موضوع نیز، می‌تواند در جذب کادمیوم توسط گیاه نقش داشته باشد. دیگر پژوهشگران در نتایج بررسی‌های خود گزارش کردند، تجمع کادمیوم در گیاهان نه‌تنها به غلظت کادمیوم محلول بلکه به غلظت سرب محلول نیز بستگی دارد. حضور همزمان کادمیوم و سرب در خاک بر تجمع کادمیوم و سرب گونه‌های مختلف گیاهی تأثیر بازدارنده‌ای داشت، یعنی حضور یک فلز در محیط توانست جذب فلز دیگر محیط را در گیاه کاهش دهد (Motesharezadeh *et al.*, 2013).

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس نشان از معنی‌دار بودن تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان کادمیوم اندام‌های هوایی در سطح احتمال ۱ درصد داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه *Lolium perenne* نشان داد، با افزایش غلظت نانو سیلیس میزان کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه افزایش پیدا کرده و پس از آن به یک ثبات رسیده است به‌طوری‌که دیگر به میزان آن افزوده نشده است. بیشترین میزان کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه (۱۴/۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نانو سیلیس مشاهده شد که میزان کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه را ۴۹/۶۷ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد، البته بین این تیمار با تیمار  $\text{NS}_4$  و  $\text{NS}_5$  تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. همچنین کمترین میزان آن (۷/۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نانو سیلیس مشاهده شد که بین این تیمار با تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۸). همان‌طور که پیش از این گفته شد سیلیسیک‌اسید می‌تواند با فلزهای سنگین (کادمیوم، سرب، روی و جیوه) به شکل ترکیب‌های پیچیده محلول و سیلیکات‌های فلزهای سنگین کم محلول ترکیب شود (Datnoff *et al.*, 2001). در نتیجه تشکیل پیچیده‌های فلزهای سنگین با آنیون اسید سیلیسیک اگر غلظت اسید مونو سیلیسیک در محلول خاک کمی افزایش یابد مقدار فلزهای سنگین در محلول خاک افزایش می‌یابد (Matichenkov *et al.*, 2015). این موضوع، می‌تواند سبب افزایش جذب فلزهای سنگین از جمله کادمیوم در گیاه *Lolium perenne* شود. جذب کادمیوم توسط گیاه تحت تأثیر محدوده

بیشترین میزان سیلیسیم اندام‌های هوایی گیاه (۰/۵۱۲۱ درصد) در تیمار NS<sub>5</sub> بود که ۸۸/۸۶ درصد سیلیسیم اندام‌های هوایی را نسبت به شاهد افزایش داد و کمترین میزان آن (۰/۰۰۵۷ درصد) در تیمار شاهد وجود داشت (شکل ۹). (Garbuzov et al., 2011) در نتایج بررسی‌های خود گزارش کردند *Lolium perenne* یک گیاه انباشتگر سیلیسیم است و سازوکار جذب آن از خاک می‌تواند سازوکار فعال یا غیرفعال باشد. این پژوهشگران همچنین در نتایج بررسی‌های خود گزارش دادند، افزودن سیلیسیم به شکل متاسیلیکات سدیم (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O) به خاک موجب افزایش غلظت سیلیسیم برگ در گیاه *Lolium perenne* به بیش از ۴ برابر (بیش از ۴۰۰ درصد) شد. گزارش شده است که افزایش تیمار سیلیسیم در خاک یا کشت به صورت آبکشتی (هیدروپونیک) جذب سیلیسیم در اندام‌های هوایی و ریشه شمار زیادی از گونه‌های گیاهی را افزایش داده است (Naeem et al., 2014). همچنین Datnoff et al. (2001) در نتایج بررسی‌های خود گزارش کردند، اصلاح‌گرهای سیلیسیم، باعث افزایش دسترسی سیلیسیم برای گیاهان می‌شوند.

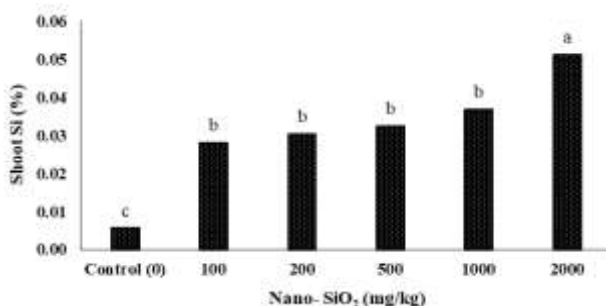
پژوهشگران در نتایج بررسی‌های خود گزارش کردند، کاربرد سیلیسیم نمی‌تواند بازدارنده جذب کادمیوم در ذرت شود. همچنین کاربرد سیلیکات پتاسیم در خاک، غلظت سیلیسیم را در اندام‌های هوایی افزایش داد درحالی‌که موجب افزایش غلظت کادمیوم ریشه بدون تأثیر بر غلظت کادمیوم در برگ‌ها در مقایسه با شاهد شد (Adrees et al., 2015). همچنین در نتایج بررسی دیگر گزارش شده است، کادمیوم کل به‌طور قابل توجهی در اندام‌های هوایی گیاه ذرت با کاربرد اصلاح‌گر سیلیسیم (به مقدار ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در مقایسه با بدون کاربرد اصلاح‌گر سیلیسیم افزایش یافت (Liang et al., 2006).

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، سطوح مختلف نانو سیلیس بر محتوای سیلیسیم اندام‌های هوایی در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان سیلیسیم اندام‌های هوایی گیاه *Lolium perenne* نشان داد، با افزایش غلظت نانو سیلیس میزان سیلیسیم اندام‌های هوایی گیاه افزایش پیدا کرده است به‌طوری‌که



شکل ۸. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه چچم

Figure 8. Mean comparison of different treatments of nano silicon on *Lolium perenne* shoot cadmium content



شکل ۹. مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان سیلیسیم اندام‌های هوایی گیاه چچم

Figure 9. Mean comparison of different treatments of nano silicon on *Lolium perenne* shoot Silicon content

به فلزهای سنگین می‌تواند برای گیاه پالایی سودمند باشد. به نظر می‌رسد کاربرد عنصرهای غذایی مانند سیلیسیم به واسطه کمک به بهبود جذب عنصرها و افزایش توان مقاومتی گیاه در برابر تنش‌ها، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در رویارویی با تنش‌ها مورد توجه قرار گیرد به‌ویژه آنکه توسعه فضای سبز در مناطق صنعتی ممکن است توأم با رشد در محیط‌های تنش‌زا بوده و این نگرش، می‌تواند به توسعه فضای سبز و افزایش بقای گیاه در برابر تنش‌ها، کمک کند.

### سپاسگزاری

از حمایت مالی "قطب علمی بهبود کیفیت خاک برای تغذیه متعادل گیاه دانشگاه تهران" از این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

### نتیجه‌گیری کلی

بنابر نتایج این پژوهش، کاربرد سطوح مختلف نانوسیلیس در گیاه چچم، پاسخ‌های متفاوتی داده است. از نظر جذب عنصرهای غذایی، تأثیر سودمند ناشی از کاربرد آن مشاهده و گزارش شد. همچنین جذب برخی فلزهای سنگین در گیاه افزایش و در برخی مواقع به دلیل بروز اثر متقابل و رقابتی این فلزها، کاهش مشاهده شد. به‌گونه‌ای که جذب کادمیوم افزایش و در مقابل جذب سرب کاهش نشان داد. در کل می‌توان گفت بهترین نتایج مربوط به تیمار NS<sub>5</sub> است که همراه با کشت گیاه چچم، تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک و کاهش آلودگی فلزهای سنگین داشته است و به همین دلیل کاربرد توأم گیاه و سطح مصرفی سیلیس یادشده در خاک‌های آلوده

### REFERENCES

- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Rehman, M. Z., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Qayyum, M. K. & Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 186-197.
- Adriano, D. C., Wenzel, W. W., Vangronsveld, J. & Bolan, N. S. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122, 121-142.
- Akmal, M., Janming, X., Zhaojun, L., Haizhen, W. & Huaiying, Y. (2005). Effects of lead and cadmium nitrate on biomass and substrate utilization pattern of soil microbial communities. *Chemosphere*, 60, 508-14.
- Ali-Ehyaee, M. & Behbahanizadeh, A. A. (1994). Soil analysis methods. Technical bulletin No. 893. Taat, Tehran, Iran. (in Farsi)
- Balsberg-Pahlsson, A. M. (1989). Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 47, 287-319.
- Black, A. L. Miller, R. H. & Keeney, D. R. (1989). Methods of Soil Analysis. Part II ASA, I. SSSA. 1989: 9.
- Black, C. A. & Evans, D. D. (1986). Methods of soil analysis. Part 1 and 2. Agronomy 9. *Am.Soc.of Agron.* Madison, WI.
- Burt, R. M., Mays, D., Benham, E. C. & Wilson, M. A. (2002). Phosphorus characterization R and correlation with properties of selected benchmark soils of the United States. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(1-2), 117-141.
- Castaldi, P., Santona, L. & Melis, P. (2005). Heavy metals immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth. *Chemosphere*, 60, 365-371.
- Chang, A.C. Warneke, J.E., Page, A.L. & Lund, L.J. (1984). Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *Journal of Environmental Quality*, 13, 87-91.
- Chen, G., Zeng, G., Chunyan, D., Huang, D., Lin, T., Wang, L. & Guoli, Sh. (2010). Transfer of heavy metals from compost to red soil and groundwater under simulated rainfall conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 211-216.
- Cottenie, A., Camerlynck, R., Verloo, M. & Dhaese, A. (1980). Fractionation and determination of trace elements in plants, soils and sediments. *Pure and Applied Chemistry*, 52(1), 45-53.
- Da Cunha, K. P. V., Do Nascimento, C. W. A. & Silva, A. J. (2008). Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 849-853.
- Datnoff, L. E., Snyder, G. H. & Korndorfer, G. H. (2001). Silicon in agriculture. First edition, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands: 425 pages.
- Doshi, R., Braidia, W., Christodoulatos, C., Wazne, M. & O'Connor, G. (2008). Nano-aluminum: Transport through sand columns and environmental effects on plants and soil communities. *Environmental Research*, 106, 296-303.

16. Elliott, C. L. & George, H. Snyder. (1991). Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39(6), 1118-1119.
17. Elouear, Z., Bouhamed, F. & Bouzid, J. (2014). Evaluation of Different Amendments to Stabilize Cadmium, Zinc, and Copper in a Contaminated Soil: Influence on Metal Leaching and Phytoavailability. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 23,628-640.
18. Epstein, E. & Bloom, A. J. (2005). Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. (2<sup>nd</sup> ed.). Sunderland: Sinauer Associates Inc.
19. Forh, H. D. & Ellis, B. G. (1988). Soil fertility. John Wiley and Sons. New York, NY
20. Garbuzov, M., Reidinger, S., Hartley, A. & Susan, E. (2011). Interactive effects of plant-available soil silicon and herbivory on competition between two grass species, *Annals of Botany*, 108, 1355-1363
21. Ge, Y., Schimel, J. P. & Holden, P. A. (2011). Evidence for negative effects of TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities. *Environmental Science and Technology*, 45, 1659-1664, DOI: 10.1021/es103040t.
22. Grossman, R. B. & Reinsch, T. G. (2002). Bulk density and linear extensibility. p. 202-228. In J.H. Dane and G.C. Topp (eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods*. Soil Sci. Am. Book Series No. 5. ASA and SSSA, Madison, WI.
23. Hodson, M. J., White, P. J., Mead, A. & Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic Variation in the Silicon Composition of Plants. *Annals of Botany*, 96, 1027-1046.
24. Hooda, P. S. (2010). *Trace elements in soils*. 1<sup>st</sup> published, A John Wiley and Sons, Ltd., Publication: 618 pages.
25. Imtiaz, M., Shahid-Rizwan, M., Adnan-Mushtaq, M., Ashraf, M., Muhammad, S., Yousaf, B., Anser, S., Dawood-Rizwan, M., Azher-Nawaz, M., Mehmood, S. & Shuxin, T. (2016). Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *Journal of Environmental Management*, 183, 521-529.
26. Jia-Wen, WU., Yu, S., Yong-Xing, Z., Yi-Chao, W. & Hai-Jun, G. (2013). Mechanisms of Enhanced Heavy Metal Tolerance in Plants by Silicon: A Review, Elsevier B.V. and Science Press. *Pedosphere*, 23(6), 815-825.
27. Ge, Y., Schimel, J. P. & Holden, P. A. (2011). Evidence for negative effects of TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities. *Environmental Science & Technology*, 45(4), 1659-1664.
28. Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. (2000). Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 143-157.
29. Kuo, S. (1996). Phosphorus. *Methods of soil analysis*. Part 3. p. 869-919.
30. Laegreid, M., Bockman, O. C. & Kaarstad, O. (1999). Agriculture, Fertilizers and the Environment. CABI Publishing in association with Norsk Hydro ASA, 294 PP
31. Lambrechts, T., Lequeue, G., Lobet, G. & Lutts, S. (2013). Impact of cadmium and zinc on root system of *lolium perenne* and *Trifolium repens*. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 78, 19-24.
32. Liang, Y., Zhang, W., Qin, C., Youliang, L. & Ruixing, D. (2006). Effect of exogenous silicon (Si) on H<sup>+</sup>-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.), *Environmental and Experimental Botany*, 57, 212-219.
33. Linsay, W. L. & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil tests for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428.
34. Lombi, E., Zhao, F. J., Wieshammer, G., Zhang, G. & McGrath, S. P. (2002). In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: biological effects. *Environmental Pollution*, 118, 445-452.
35. Ma, J. F. (2006). Silicon and Sodium, *Encyclopedia of Soil Science*, Copyright by Taylor & Francis.
36. Matichenkov, V. V., Bocharnikova, E. A., Pahnenko, E. P., Khomiakove, D. M., Matichenkov, I. V., Zhan, Q. & Wei, X. (2015). Reduction of Cd, Cu, Ni, and Pb Mobility by Active Si in a Laboratory Study., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.1-8
37. Matychenkov, I. V., Khomyakov, D. M., Pakhnenko, E. P., Bocharnikova, E. A. & Matychenkov, V. V. (2016). Mobile Si-Rich Compounds in the Soil Plant System and Methods for their Determination. Moscow University. *Soil Science Bulletin*, 7(3), 120-128.
38. Mirsal, I. A. (2008). *Soil pollution*. 2. Springer, Dillenburg ,Germany, 310 pages
39. Moradi, Gh. A., Ghomsheh zadeh, P. & Saghi, A. (2008). Nanotechnology. <http://p30download.com/fa/entry/58670>
40. Motesharezadeh, B., Aghae, L. & Savaghebi, Gh. R. (2013). The effect of cadmium and lead on nutrient content and growth of two bean cultivars. *Environmental Stress in Agronomy Science Journal*, 7(2), 257-271.
41. Mousavi, S. M., Motesharezadeh, B., Mirseyed Hosseiny, H., Alikhani, H. A. & Zolfaghari, A. A. (2017). Comparison of nano and PGPR bacterium on mobility and phytoextraction of lead, 4th Congress on Nanotechnology, PP. 16. Karaj, Iran. (in Farsi)

42. Muhammad, A., Shafaqat, R., Zia-ur, R., Muhammad, A., Farhat Farid, M., Farooq, Q. & Kashif Irshad, M. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 186-197.
43. Mustafa, G. & Komatsu, S. (2016). Toxicity of heavy metals and metal-containing nanoparticles on plants. *Biophysica Acta*, 1864, 932-944.
44. Naeem, A., Ghafoor, A. & Farooq, M. (2014). Suppression of cadmium concentration in wheat grains by silicon is related to its application rate and cadmium accumulating abilities of cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6976>
45. Rasouli, M., Yaghobi, N., Hafezi, M. & Rasouli, M. (2012). Adsorption of divalent lead ions from aqueous solution using low silica nano-zeolite X. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18, 1970-1976.
46. Rayan, J., Estefan, G. & Rashid, A. (2001). Soil and Plant Analysis Laboratory Manual, International center for Agriculture Research in the Dry Areas (ICARDA). Aleppo, Syria. Page, A.L. (1982). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
47. Reader's Digest Association. (2001). *Field guide to the wild flowers of Britain* (Reader's Digest Nature Lover's Library). (2<sup>nd</sup> Ed.), David & Charles :447 pp
48. Rhoades, J. D. (1982). Methods of soil Analysis, Soluble salts. In A.L. page (Eds), *Agronomy Mon.*, 9, 167-179.
49. Singh, J. & Byeong-Kyu, L. (2016). Influence of nano-TiO<sub>2</sub> particles on the bioaccumulation of Cd in soybean plants (*Glycine max*): A possible mechanism for the removal of Cd from the contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 170, 88-96.
50. Sparks, D. L. (1996). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods, soil science society of American, Inc. American Society of Agronomy, Inc, Madison, Wisconsin, USA
51. Stegmann, R., Brunner, G., Calmano, W. & Matz G. (2001). *Treatment of Contaminated Soil Fundamentals, Analysis, Applications*. Springer.
52. Summer, M. E. & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients In: Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods, (Ed. DL. Sparks). pp. 1201-1229. Soil Sci. Soc. Am. Madison. WI.
53. Taghizadeh, M., Kafi, M., Fattahi Moghaddam, M. R. & Savaghebi, G. R. (2012). Effects of lead concentrations on seed germination of *Turfgrass genus* and its potential for phytoremediation, Iranian *Journal of Horticultural Science*, 42(3), 277-289.
54. Tehran Parks & Green Space Organization. (2006). *Lawning Principles*, Tehran parks & Green Space Organization Publication, 200 p.
55. Tubaña, B. S. & Heckman, J. R. (2015). *Silicon in soils and plants*. Springer International Publishing Switzerland.
56. U.S. EPA. (2012). Nanotechnologies for environmental cleanup. Retrieved 2014-07-29.
57. USEPA. (1982). *Guide to the disposal of chemically stabilized and solidified waste*, SW-872, office of water and waste management, Washington, DC.
58. 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, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
59. Yizong, H., Ying, H. & Yunxia, L., (2009). Heavy metal accumulation in iron plaque and growth of rice plants upon exposure to single and combined contamination by copper, cadmium and lead. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 320-326.