

The Effects of Chitosan Composites on the Concentrations of Cadmium and Some Nutrients of Lettuce Plant

ZAHRA NAJAFI^{*1}, AHMAD GOLCHIN¹, PARISA ALAMDARI¹, MOHAMMAD SADEGH ASKARI¹

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

(Received: Jan. 8, 2020- Revised: May. 7, 2020- Accepted: May. 12, 2020)

ABSTRACT

This study aimed to investigate the efficiency of different chitosan composites on lettuce plant and mobility reduction of cadmium in the soil. For this purpose, a pot factorial experiment was conducted in greenhouse conditions using a completely randomized design. The proposed factors were soil cadmium levels (0, 8, 25 and 75 mg/kg) and types of adsorbent (chitosan, biochar, zeolite, nanomagnetite and composites of chitosan-biochar, chitosan- zeolite, chitosan- magnetite and control). Each adsorbent was applied to the soil at the rate of 0.5% W/W. The results showed that the shoot height, the shoot and root dry weight and the concentrations of phosphorus, potassium, iron and zinc in the shoot of lettuce decreased but the cadmium concentration of leaf increased as the concentration of soil total cadmium increased. The results also showed increasing the amount of adsorbents to the soil decreased the toxic effects of cadmium by adsorbing the part of soluble cadmium. As, by application of 0.5% W/W of chitosan-magnetite composite, the concentration of cadmium in the shoot of lettuce decreased about 24.22 mg/kg as compared to the control treatment. But the shoot height and the shoot dry weight increased by 29.57 and 43.6% respectively, and the concentration of phosphorus, potassium, iron and zinc increased by 72.22, 98.78, 267.77 and 128.10% respectively, as compared to the control treatment.

Keywords: Soil Pollution, Cadmium Toxicity, Chitosan Composites, Lettuce.

* Corresponding Author's Email: najafizahra9@gmail.com

بررسی تأثیر کامپوزیت‌های کیتوسان بر غلظت کادمیوم و برخی از عناصر غذایی گیاه کاهو

زهرا نجفی^{۱*}، احمد گلچین^۱، پریسا علمداری^۱، محمد صادق عسکری^۱

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۲۳)

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی کامپوزیت‌های مختلف کیتوسان در کاهش تحرک کادمیوم در خاک و همچنین بررسی تأثیر آن‌ها بر گیاه کاهو انجام گرفت. برای این منظور یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، به صورت گلدانی و در شرایط گلخانه به اجرا در آمد. فاکتورهای مورد بررسی عبارت بودند از سطوح کادمیوم خاک (صفر، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوع جاذب (کیتوسان، بیوجار، ژئولیت و نانو مگنتیت خالص و کامپوزیت‌های کیتوسان-بیوجار، کیتوسان-ژئولیت، کیتوسان-مگنتیت و تیمار بدون جاذب) که هر یک از جاذب‌ها در سطح نیم درصد وزنی به کار رفتند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم کل خاک، میانگین ارتفاع بوته، وزن خشک بخش هوایی و ریشه و غلظت عناصر فسفر، پتاسیم، آهن و روی بخش هوایی گیاه کاهو کاهش و غلظت کادمیوم آن افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که افزودن جاذب‌ها به خاک با جذب بخشی از کادمیوم محلول خاک باعث کاهش اثرات سمی کادمیوم شدند به طوری که با کاربرد ۰/۵ درصد وزنی از کامپوزیت کیتوسان-مگنتیت به عنوان کاراثرین جاذب غلظت کادمیوم بخش هوایی ۲۴/۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد کاهش و به دنبال آن میانگین ارتفاع بوته و وزن خشک بخش هوایی ۲۹/۵۷ و ۴۳/۶۰ درصد و غلظت فسفر، پتاسیم، آهن و روی بخش هوایی به ترتیب ۷۲/۲۲، ۹۸/۷۸، ۲۶۷/۷۷ و ۱۲۸/۱۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، سمی بودن کادمیوم، کامپوزیت‌های کیتوسان، کاهو.

مقدمه

در حالت ایده‌آل یک خاک آلوده به فلزهای سنگین بایستی دوباره اصلاح گردد و آلودگی‌های آن رفع شود تا دوباره قابل استفاده گردد. اما بازگرداندن پتانسیل‌های اولیه به خاک می‌تواند فرآیندی بسیار پرهزینه و گران قیمت باشد. بنابراین انتخاب مناسب‌ترین فرآیند برای رفع آلودگی، به عوامل مختلف از جمله سود مورد انتظار، ارزش آینده‌ی خاک و آگاهی از مشکلات و موانع موجود در هر فرآیند وابسته است (Qu and de Varennes, 2009). چندین روش مختلف برای اصلاح خاک‌های آلوده به آلاینده‌های معدنی و آلی وجود دارد. استفاده از برخی از روش‌های موجود برای اصلاح همه‌ی منابع آلوده، کاری بسیار مشکل و هزینه‌بر است. بنابراین امروزه تقاضا برای استفاده از روش‌های ابتکاری و کم‌هزینه افزایش یافته است. از میان همه‌ی روش‌ها، تکنیک جذب توسط جاذب‌ها نسبت به سایر روش‌ها ترجیح داده می‌شود. چرا که این روش علاوه بر مؤثر و سریع بودن، از نظر فنی روشی ساده، از نظر محیط زیستی روشی سالم و امن و از نظر هزینه روشی مقرون به صرفه می‌باشد و بیش‌تر مورد توجه محققین علوم آب و خاک قرار گرفته است (El-Kafrawy et al., 2017).

آلودگی محیط‌زیست به فلزهای سنگین به‌عنوان یک مشکل جهانی در حال گسترش، مطرح می‌باشد. فلزهای سنگین به دلیل غیر قابل تجزیه بودن و آثار زیانبار فیزیولوژیک بر جانداران، حتی در غلظت‌های کم، اهمیت ویژه‌ای در آلودگی محیط زیست دارند (Akbar Jan et al., 2010). به‌عنوان مثال کادمیوم از جمله فلزهای سنگین است که به دلیل ویژگی‌هایی همچون سمی بودن و تحرک زیاد جزو آلاینده‌های اساسی و خطرناک قرار دارد. جذب کادمیوم توسط گیاه می‌تواند منجر به آسیب‌های سلولی و بافتی و حتی مرگ گیاه گردد. هنگامی که غلظت کل این عنصر در خاک به ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم برسد برای گیاه سمی و خطرناک خواهد بود. علاوه بر این استفاده‌ی بالاتر از حد مجاز این فلز سنگین توسط انسان، آنزیم‌های کلیوی را مورد هدف قرار داده و می‌تواند منجر به ایجاد نارسایی‌های کلیوی و حتی مرگ گردد. تجمع بیش از ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم قشر کلیه باعث از بین رفتن کلیه می‌شود (Wuana and Okieimen, 2011; Aycicek et al., 2008).

کامپوزیت کیتوسان-مگنتیت نسبت به کیتوسان خالص توانایی بالاتری در حذف فلز سنگین کروم از فاضلاب های صنعتی داشت. همان طور که مشاهده می شود استفاده از کامپوزیت های کیتوسان اغلب بر حذف فلزهای سنگین از فاضلاب های صنعتی و دیگر محیط های مایع متمرکز بوده و استفاده از این کامپوزیت های پلیمری در محیط خاک و کارایی آن ها در چنین محیط هایی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی کامپوزیت های مختلف کیتوسان در کاهش تحرک و گیاه فراهمی کادمیوم در خاک و همچنین بررسی تأثیر آن ها بر شاخص های رشد و غلظت عناصر کادمیوم، فسفر، پتاسیم، آهن و روی گیاه کاهوی کشت شده در خاک های آلوده انجام گرفت. لازم به توضیح است که از کیتوسان، بیوجار، ژئولیت و نانو مگنتیت خالص نیز به منظور مقایسه ی کارایی جاذب ها استفاده شد.

مواد و روش ها

به منظور مقایسه ی کارایی کیتوسان (C)، بیوجار (B)، ژئولیت (Z) و نانو مگنتیت (M) خالص و کامپوزیت های کیتوسان- بیوجار (C-B)، کیتوسان-ژئولیت (C-Z) و کیتوسان-مگنتیت (C-M) در کاهش تحرک و فراهمی کادمیوم در خاک و همچنین تأثیر آن ها بر شاخص های رشد و غلظت عناصر کادمیوم، فسفر، پتاسیم، آهن و روی گیاه کاهوی کشت شده در خاک های آلوده، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی، به صورت گلدانی و در شرایط گلخانه به اجرا در آمد. فاکتورهای مورد بررسی عبارت بودند از سطوح کادمیوم خاک شامل صفر، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک (Rezakhani et al., 2012) و نوع جاذب شامل کیتوسان، بیوجار، ژئولیت و نانو مگنتیت خالص و کامپوزیت های کیتوسان- بیوجار، کیتوسان-ژئولیت، کیتوسان-مگنتیت و تیمار فاقد جاذب، که هر یک از جاذب ها در سطح نیم درصد وزنی به کار رفتند.

روش ساخت جاذب ها

برای انجام این آزمایش جاذب های کیتوسان و ژئولیت از شرکت سیگما-آلدریج و جاذب نانو ذرات مگنتیت از شرکت US Research Nanomaterials, Inc خریداری شدند. اما سایر جاذب ها در آزمایشگاه تهیه گردیدند که روش تهیه ی هر یک از آن ها به طور مفصل در ذیل ذکر گردیده است.

تهیه ی بیوجار

برای تهیه ی بیوجار ابتدا مقداری پوسته ی گردو تهیه و به

از بین جاذب های مختلف، کامپوزیت های پلیمری کیتوسان از جمله موادی هستند که طی سال های اخیر به عنوان مواد تثبیت کننده ی فلزهای سنگین توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب نموده اند. تهیه ی کامپوزیت های پلیمری با دست-یابی به خواصی کارآمدتر موجب افزایش کارایی جاذب ها در حذف فلزهای سنگین شده است (Ahmad et al., 2015).

به عنوان مثال Zhou et al. (2013) در مطالعات خود از نانو کامپوزیت کیتوسان-بیوجار برای حذف فلزهای سنگین سرب، مس و کادمیوم از محلول های آبی استفاده نمودند. نتایج حاصل از آزمایش های آن ها نشان داد که حضور گروه های عاملی بسیار واکنش پذیر آمین^۲ و هیدروکسیل^۳ در ساختار کیتوسان موجب گردید که ظرفیت جذب فلزهای سنگین توسط کامپوزیت کیتوسان-بیوجار در مقایسه با بیوجار خالص افزایش یابد. آن ها همچنین گزارش نمودند که گروه های آمین نسبت به یون های فلزی سرب، مس و کادمیوم شدیداً واکنش نشان می دهند. به علاوه اتم های نیتروژن، الکترون آزاد دارند که با کاتیون های این فلزها واکنش می دهند. (Malayoglu (2018) نیز در مطالعات خود از نانو کامپوزیت کیتوسان-رس برای حذف فلزهای سنگین مس و نیکل از محلول های آبی استفاده نمود. نتایج حاصل از آزمایش های او نشان داد که این کامپوزیت با بهره گیری توأم از سطح ویژه ی بالای رس و گروه های عاملی آمین و هیدروکسیل فراوان در ساختار کیتوسان، موقعیت های جذب کافی برای یون های مس (Cu^{2+}) و نیکل (Ni^{2+}) فراهم آورد.

Ngahet al. (2012) در مطالعات خود از کامپوزیت کیتوسان-ژئولیت برای حذف مس از محلول های آبی استفاده نمودند. در مطالعات آن ها سینتیک جذب، ایزوترم های جذب و همچنین واجذب مس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش های آن ها نشان داد که جذب مس توسط نانو کامپوزیت کیتوسان-ژئولیت با مدل ردلیچ-پترسون و لانگمویر مطابقت داشت. واجذب مس نیز تنها ۴۷/۹۷ درصد اندازه گیری شد که نشان می داد یون های مس (Cu^{2+}) به شدت به سطوح جاذب کیتوسان-ژئولیت پیوند خورده اند. همچنین Sureshkumar et al. (2016) در مطالعات خود کارایی نانو کامپوزیت های کیتوسان-مگنتیت و کیتوسان خالص را در حذف یون کروم از محلول های آبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش های آن ها نشان داد که راندمان حذف کروم توسط کیتوسان خالص ۲۹/۳۹ درصد و راندمان حذف کروم توسط نانو کامپوزیت کیتوسان-مگنتیت ۹۲/۳۳ درصد بود. بنابراین آن ها گزارش نمودند که نانو

تنظیم گردید. نهایتاً بعد از ته نشینی، کامپوزیت حاصل تا رسیدن به pH خنثی با آب مقطر شسته شد و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید و به‌عنوان جاذب در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت (Dehghani et al., 2017).

تهیه کامپوزیت کیتوسان-مگنتیت

برای تهیه کامپوزیت کیتوسان-مگنتیت ابتدا ۰/۲ گرم از نانوذرات مگنتیت در ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول استیک‌اسید یک درصد پخش گردید. در این مرحله مگنتیت به کاتیون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} تبدیل می‌گردد. در مرحله‌ی بعد یک گرم از کیتوسان به محلول فوق اضافه شد و محلول به مدت ۳۰ دقیقه توسط دستگاه التراسونیک^۱، به هم زده شد و پس از آن تا زمان حصول یک محلول یکنواخت به‌طور مداوم هم زده شد. پس از تهیه‌ی محلول یکنواخت، محلول NaOH ۱ مولار به‌صورت قطره قطره و همراه با هم زدن تا رسیدن به pH = ۱۰ به محلول اضافه گردید. رسوبات حاصل به مدت پنج ساعت و در دمای ۷۵-۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند و پس از آن فیلتر شده و با آب فراوان شست‌وشو داده شدند و در نهایت به مدت یک شب در آون قرار داده شدند و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند (Haldorai et al., 2015).

لازم به ذکر است که پس از اتمام ساخت جاذب‌ها pH و EC بیوچار در نسبت ۱:۲۰ بیوچار به آب مقطر و به روش Lu Rayment and Higgison (1992)، کربنات کلسیم معادل به روش Bower et al. (1952)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش SIRIM (1984) تعیین گردید. همچنین خصوصیات تمامی آن‌ها با استفاده از طیف‌سنج مادون قرمز^۲ تعیین گردید.

برای انجام این آزمایش ابتدا یک نمونه خاک مرکب از مزرعی تحقیقاتی دانشگاه زنجان با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۱ دقیقه و ۱۰/۳ ثانیه‌ی طول شمالی و ۴۸ درجه و ۲۳ دقیقه و ۱۳/۸ ثانیه‌ی عرض شرقی و از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری خاک تهیه و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. در نمونه‌ی خاک تهیه شده پس از هوا خشک شدن، بافت خاک به روش هیدرومتر، هدایت الکتریکی (ECe) در عصاره‌ی اشباع، pH در گل اشباع و میزان رطوبت اشباع به روش‌های معمول در موسسه‌ی تحقیقات خاک و آب (Ali Ehyaei and Behbahani Zadeh, 1993) اندازه‌گیری شدند. همچنین کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر در مجاورت بی‌کرومات پتاسیم و اسید سولفوریک غلیظ (Walkley and Black, 1934)، نیتروژن کل با استفاده از روش

آزمایشگاه منتقل شد. پس از انجام مراحل آماده سازی، نمونه‌ها به‌منظور همگن‌سازی توسط آسیاب خرد شدند و از الک دو میلی-متر عبور داده شدند. سپس نمونه‌های به‌دست آمده در شرایط اکسیژن کم (در حضور گاز آرگون)، به مدت دو ساعت در داخل کوره‌ی الکتریکی مدل AIR 21 ساخت کشور ایران با نرخ افزایش دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه، در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا بیوچار تهیه گردید (Kim et al., 2012 and Cantrell et al., 2012). به‌منظور خارج کردن گاز و روغن تولید شده در طی فرآیند گرماکافت، به ترتیب دریچه‌ای در بالا و شیری در پایین محفظه‌ی تولید بیوچار تعبیه شده بود. همچنین یک ورودی و یک خروجی برای جریان گاز بی‌اثر آرگون در محفظه در نظر گرفته شده بود. جریان گاز آرگون در تهیه‌ی بیوچار دو نقش مهم بر عهده داشت. اول، محیط فرآیند گرماکافت را از اکسیژن خالی می‌کرد و دوم، گازهای تولید شده در طی فرآیند را به بیرون از سیستم هدایت می‌کرد. لازم به ذکر است که در پایان روی بیوچار تهیه شده خاکستری مشاهده نشد که نشان دهنده‌ی حذف اکسیژن و صحت روش تولید بیوچار بود.

تهیه کامپوزیت کیتوسان-بیوچار

برای تهیه کامپوزیت کیتوسان-بیوچار، ابتدا ۳ گرم از کیتوسان با هم زدن پیوسته در ۱۸۰ میلی‌لیتر از محلول استیک اسید دو درصد حل گردید. سپس ۳ گرم از بیوچار تولید شده نیز به محلول اضافه شد و محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. پس از سپری شدن مدت زمان ۳۰ دقیقه، سوسپانسیون همگن کیتوسان-بیوچار به‌صورت قطره قطره به ۹۰۰ میلی‌لیتر از NaOH ۱/۲ درصد اضافه شد و محلول حاصل به مدت ۱۲ ساعت به حال خود رها گردید. سپس کامپوزیت کیتوسان-بیوچار تولید شده برای خروج NaOH اضافی، با آب دیونیزه شست‌وشو داده شد و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت، در آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، خشک گردید (Zhou et al., 2013).

تهیه کامپوزیت کیتوسان-ژئولیت

برای تهیه کامپوزیت کیتوسان-ژئولیت ابتدا ۸ گرم از کیتوسان با هم زدن پیوسته در ۴۰۰ میلی‌لیتر از محلول استیک اسید دو درصد حل گردید. همچنین ۴۰ گرم ژئولیت نیز در ۴۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر پخش و به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. سپس محلول کیتوسان به سوسپانسیون ژئولیت اضافه گردید و به مدت یک ساعت و ۳۰ دقیقه در دمای اتاق هم زده شد. در ادامه با افزودن محلول NaOH ۲ مولار، pH سیستم واکنش بر روی عدد نه

در طی دوره‌ی رشد که حدود ۷۵ روز به طول انجامید، آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر و در حد رطوبت ظرفیت مزرعه انجام شد. برای این منظور گلدان‌ها هر روز توزین می‌شدند و آب از دست رفته‌ی آن‌ها تا رسیدن به رطوبت ظرفیت مزرعه محاسبه و به گلدان‌ها اضافه می‌شد. در پایان دوره‌ی رشد بخش‌های هوایی و ریشه‌ی گیاهان برداشت شدند و بعد از انتقال به آزمایشگاه ابتدا با آب شهری و سپس با آب مقطر شست و شو داده شدند. در مرحله‌ی بعد پس از اندازه‌گیری ارتفاع بوته‌ها و وزن‌های تر بخش‌های هوایی و ریشه، نمونه‌های گیاهی به صورت جداگانه درون پاکت‌های کاغذی قرار داده شدند و به مدت ۷۲ ساعت در آن تهویه‌دار در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک و سپس توزین گردیدند. نمونه‌های گیاهی پس از آسیاب و الک شدن به وسیله‌ی اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه‌ی ۳۰ درصد در دمای ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد هضم شدند (Tang and Miller, 1991). در عصاره‌های به دست آمده غلظت عناصر کادمیوم، آهن و روی توسط دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 2380 ساخت کشور آمریکا، فسفر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل SP-UV 300SRB ساخت کشور آلمان و پتاسیم با دستگاه فلیم فتومتر مدل Pfp7 ساخت جنوب انگلستان اندازه‌گیری شد (Ali Ehyaei and Behbahani Zadeh, 1993). برای تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزار SAS و برای مقایسه‌ی میانگین از آزمون دانکن در سطح پنج درصد استفاده گردید. ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار EXCEL صورت گرفت.

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. ویژگی‌های جاذب‌های مورد استفاده نیز در جدول (۲) آورده شده است. در شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و در شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نانو ذرات مگنتیت مورد استفاده نشان داده شده است. مورفولوژی نانو ذرات مگنتیت به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری، کروی تشخیص داده شد و میانگین اندازه‌ی آن‌ها عمدتاً کمتر از ۵۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. طیف‌های مادون قرمز مربوط به جاذب‌های مورد استفاده در این آزمایش نیز در شکل (۳) آورده شده است.

کجدال^۱ (Bremner and Mulvaney, 1982)، درصد کربنات کلسیم معادل با روش کلسیمتری^۲ (Nelson, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش (Bower and hatcher, 1966)، فسفر قابل جذب خاک به روش رنگ‌سنجی (Murphy and Riley, 1962)، پتاسیم قابل جذب به روش طیف‌سنجی شعله (Helmke and Spark, 1996)، کادمیوم، سرب، کروم، مس، آهن، روی و نیکل قابل عصاره‌گیری با DTPA^۳ (Lindsay and Norvell, 1978) به کمک دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 2380 ساخت کشور آمریکا و غلظت کادمیوم کل به روش هضم با اسید نیتریک^۴ مولار (Sposito et al., 1982) تعیین گردیدند.

در مرحله‌ی بعد برای تهیه‌ی خاک‌های آلوده به سطوح مختلف کادمیوم نمونه‌های فرعی سه کیلوگرمی از نمونه‌ی اصلی تهیه و با مقادیر متفاوتی از نمک کادمیوم سولفات^۴ تیمار شدند. نمک کادمیوم سولفات ابتدا در آب مقطر حل و سپس به نمونه‌های خاک به طور یکنواخت اسپری شد. سپس نمونه‌های آلوده، هواخشک و همگن شدند و در گلدان‌های پلاستیکی ریخته شدند و به مدت دو ماه در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن قرار گرفتند تا به تعادل نسبی برسند. لازم به ذکر است که در چرخه‌های تر و خشک شدن ابتدا درصد رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه به کمک دستگاه صفحات فشاری تعیین و سپس رطوبت گلدان‌ها با استفاده از روش توزین به حد رطوبت ظرفیت مزرعه می‌رسیدند و پس از آن گلدان‌ها تا زمان خشک شدن کامل آن‌ها (هوا خشک شدن، پنج درصد وزنی رطوبت) آبیاری نمی‌شدند. پس از آن این چرخه مجدداً تکرار می‌شد. پس از گذشت مدت زمان دو ماه، نمونه‌های آلوده به کادمیوم با جاذب‌های مختلف تیمار شدند و به مدت دو ماه دیگر نیز در رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری شدند. پس از سپری شدن مدت زمان لازم برای در تماس بودن جاذب‌ها با خاک، مقداری از خاک‌های آلوده‌ی تیمار شده با جاذب برداشت شد. در خاک‌های آلوده‌ی تیمار شده و تیمار نشده با جاذب، مقدار کادمیوم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با DTPA^۳ (Lindsay and Norvell, 1978) و MgCl₂ (Tessier et al., 1979) تعیین گردید. در مرحله‌ی بعد در خاک باقیمانده درون هر یک از گلدان‌ها هشت عدد نشاء کاهو کشت شد. با توجه به این که مصرف گیاه‌های آلوده یکی از راه‌های ورود فلزهای سنگین به بدن انسان به‌شمار می‌آیند و گیاه کاهو علاوه بر این که دارای مصرف خوراکی است از توانایی جذب بالا برای فلز سنگین کادمیوم نیز برخوردار می‌باشد، بنابراین در این آزمایش از این گیاه به‌عنوان شاخص زیستی استفاده شد.

3. Diethylene triamine Penta acetic acid
4. CdSO₄

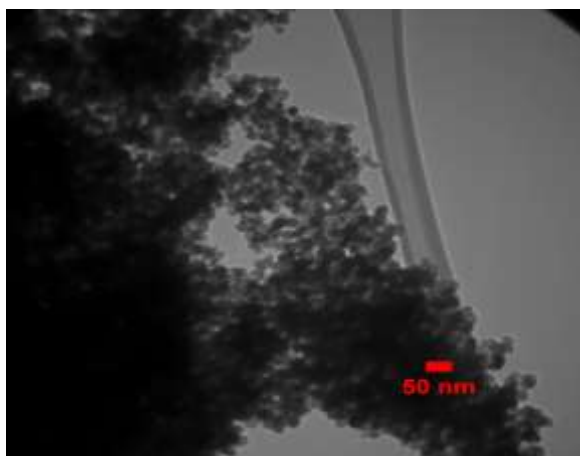
1. Kjeldahl
2. Calcimetry

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش.

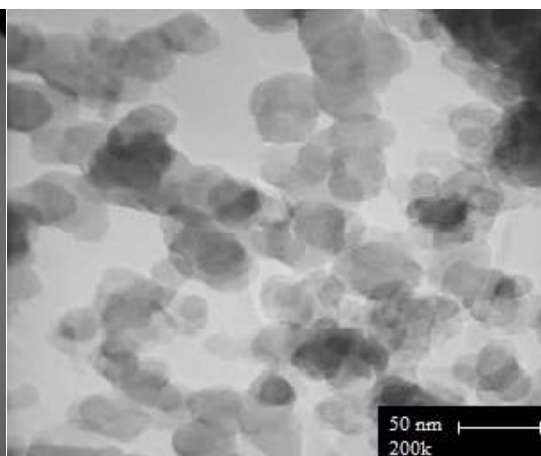
ویژگی	واحد	مقدار
شن	(%)	۶۵
سیلت	(%)	۲۵
رس	(%)	۱۰
هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع	(dS/m)	۲/۲۵
رطوبت اشباع	(%)	۳۶/۴۷
pH	-	۷/۸۶
کربن آلی	(%)	۰/۹۰
نیترژن کل	(%)	۰/۰۹
کربنات کلسیم	(%)	۲۰/۵۸
ظرفیت تبادل کاتیونی	(Cmolc/kg)	۱۳
فسفر قابل جذب	(mg/kg soil)	۱۵/۱۰
پتاسیم قابل جذب	(mg/kg soil)	۲۰۷/۹۲
کادمیوم قابل جذب	(mg/kg soil)	۰/۲۳
سرب قابل جذب	(mg/kg soil)	۳/۷۷
کروم قابل جذب	(mg/kg soil)	۱/۱۱
مس قابل جذب	(mg/kg soil)	۱/۳۳
آهن قابل جذب	(mg/kg soil)	۳/۱۸
روی قابل جذب	(mg/kg soil)	۴/۳۹
نیکل قابل جذب	(mg/kg soil)	۱/۴۶
کادمیوم کل	(mg/kg soil)	۱/۰۵

جدول ۲- برخی از خصوصیات جاذب‌های به کار رفته در این آزمایش.

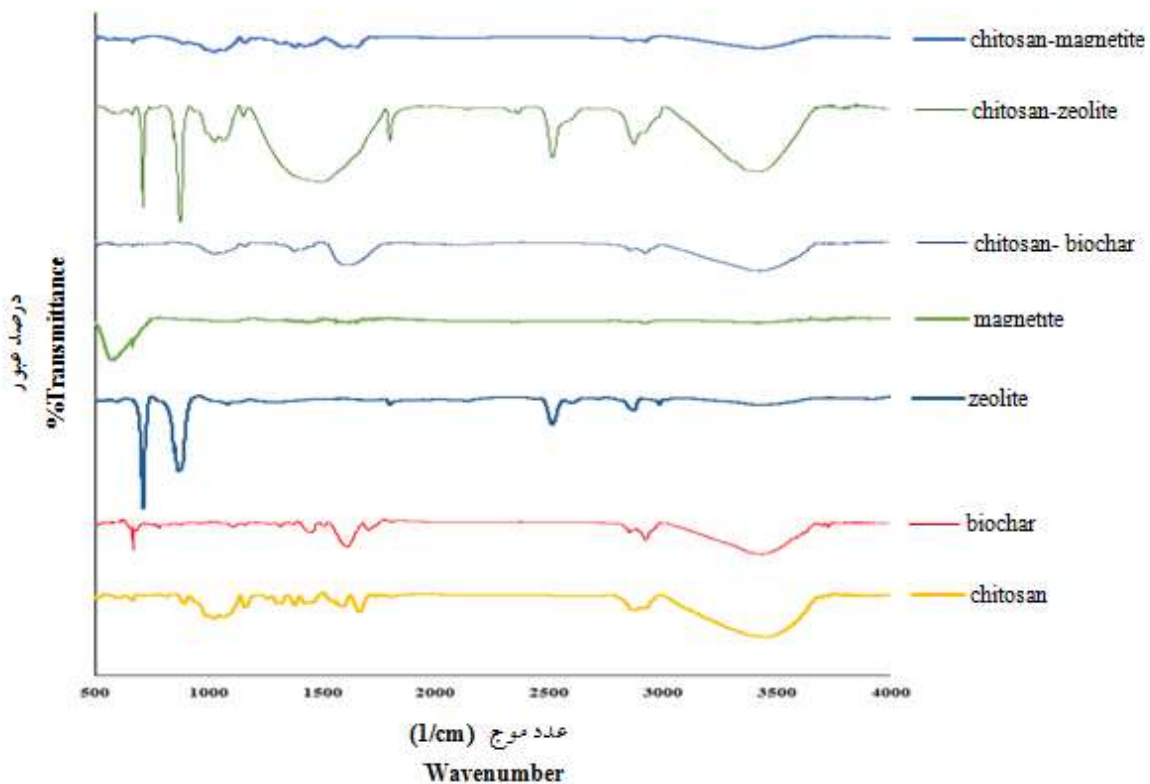
نوع ماده	فرمول شیمیایی	وزن مولکولی	انحلال پذیری	درجه‌ی استیل زدایی (%)	ویسکوزیته (cp)
کیتوسان	(C ₆ H ₁₁ O ₄ N) _n	متوسط	محلول در اسید رقیق	۷۵-۸۵	۲۰۰-۸۰۰
نوع ماده	pH	EC (dS/m)	Ash	CaCO ₃ -eq (%)	CEC (Cmolc/kg)
بیوچار	۷/۶۲	۰/۵۵	۴/۷۵	۴/۱۳	۴۸/۵۷
نوع ماده	فرمول شیمیایی	تخلخل (%)	سطح ویژه (m ² /g)	pH	CEC (Cmolc/kg)
زئولیت	M _a /n(AlO ₂) _x (SiO ₂) _y wH ₂ O	۲۵-۳۰	۳۰-۵۰	۹	۱۵۰-۱۷۰
نوع ماده	فرمول شیمیایی	سایز (nm)	سطح ویژه (m ² /g)	pH	pH _{ZPC}
مگنتیت	Fe ₃ O ₄	۲۰-۳۰	۴۰-۶۰	۴/۹	۶/۹



شکل ۲- تصویر TEM نانو ذرات مگنتیت



شکل ۱- تصویر SEM نانو ذرات مگنتیت



شکل ۳- طیف مادون قرمز کیتوسان، بیوجار، زئولیت، نانو مگنتیت، کیتوسان- بیوجار، کیتوسان- زئولیت و کیتوسان-مگنتیت

در طیف مادون قرمز بیوجار پیک قوی موجود در ناحیه 3431cm^{-1} مربوط به کشش ارتعاشی گروه OH- می باشد. پیک های نوای 2924 و 2853cm^{-1} نیز مربوط به کشش ارتعاشی گروه های آلیفاتیک CH_3 - و CH_2 - می باشد. پیک ناحیه 1708cm^{-1} مربوط به گروه عاملی $\text{C}=\text{O}$ در آلدئیدها و کتون هایی می باشد که در اثر تجزیه سلولوز و همی سلولوز به وجود آمده اند. پیک های نوای 1616 و 1512cm^{-1} نیز مربوط به گروه عاملی $\text{C}=\text{O}$ موجود در ترکیبات آروماتیک کربوکسیلیک اسید، کتون و استر و گروه عاملی $\text{C}=\text{C}$ موجود در هسته لیگنین می باشد. پیک های بین نوای 1450 و 900cm^{-1} نیز با گروه های عاملی $\text{C}=\text{C}$ موجود در ساختار لیگنین مرتبط می باشند. همچنین پیک های ضعیف بین نوای 890 تا 400cm^{-1} نیز مربوط به باندهای آروماتیک C-H می باشد (Suarez-Hernandez and Barrera-Zapata, 2017).

در طیف مادون قرمز زئولیت پیک های موجود در نوای 3700 تا 1600cm^{-1} را می توان به مولکول های آب موجود در ساختار زئولیت نسبت داد. همچنین پیک های موجود در نوای 869 و 847cm^{-1} را می توان به ارتعاشات کششی پیوندهای Si-O نسبت داد. پیک موجود در ناحیه 712cm^{-1} نیز وابسته به کوآرتز و ارتعاشات کششی SiO_2 بی شکل و نحوه خم

در طیف مادون قرمز کیتوسان پیک قوی موجود در ناحیه 3453cm^{-1} مربوط به گروه های O-H و N-H و پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی مابین این دو گروه می باشد. پیک موجود در ناحیه 2873cm^{-1} نیز به ارتعاشات کششی نامتقارن گروه C-H نسبت داده می شود که از ویژگی های مشخصه پلی ساکاریدها می باشد. حضور گروه های N-استیل باقیمانده نیز توسط پیک های ناحیه 1664cm^{-1} (کشش پیوند $\text{C}=\text{O}$ در آمید I) و 1308cm^{-1} (کشش پیوند C-N در آمید III) تأیید گردید. اما پیکی در ناحیه 1550cm^{-1} که مربوط به پیوندهای N-H در آمید II است، مشاهده نشد. این پیک سومین پیک مربوط به گروه های N-استیل است که احتمالاً با سایر پیک ها همپوشانی داشته است. پیک موجود در ناحیه 1590cm^{-1} مربوط به پیوندهای N-H گروه های آمین اولیه می باشد. حضور گروه های CH_2 و CH_3 نیز به ترتیب توسط پیک های نوای 1425 و 1380cm^{-1} تأیید گردید. پیک موجود در ناحیه 1162cm^{-1} را نیز می توان به ارتعاشات کششی نامتقارن C-O-C نسبت داد. پیک موجود در ناحیه 1026cm^{-1} نیز مربوط به پیوندهای C-O می باشد. همه ی گروه های موجود در طیف کیتوسان تهیه شده با نمونه ی گزارش شده توسط Fernandes Queiroz et al. (2015) مطابقت داشت.

پیوندهای Si-O-Si می‌باشد (Dehghani et al, 2017).

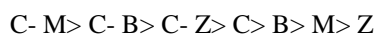
در طیف مادون قرمز ذرات نانو مگنتیت پیک‌های موجود در نواحی ۶۶۸ تا 578cm^{-1} نشان دهنده‌ی حضور نانو ذرات مغناطیسی هستند. علاوه بر این پیک موجود در ناحیه‌ی cm^{-1} ۵۷۸ نشان دهنده‌ی ارتعاشات کششی Fe-O در ساختار تتراهدرال مگنتیت می‌باشد. همچنین پیک موجود در ناحیه‌ی cm^{-1} ۴۳۹ نیز تأیید کننده‌ی حضور سایت‌های تتراهدرال و اکتاهدرال در ساختار مگنتیت است (Pham et al., 2016).

همان‌طور که در طیف‌های مادون قرمز مربوط به کامپوزیت‌ها مشاهده می‌گردد، تشکیل کامپوزیت کیتوسان با بیوجار، ژئولیت و نانو مگنتیت موجب ایجاد تغییرات ساختاری در پیوندهای کیتوسان شده است که این تغییرات به‌وسیله کاهش پیک‌ها قابل مشاهده می‌باشند. همه پیک‌های موجود در طیف مادون قرمز جاذب‌های خالص در کامپوزیت‌های تهیه شده در طول موج‌های مشابه، اما با شدت کمتر مشاهده شدند. این پدیده اغلب از برقراری پیوند هیدروژنی بین گروه‌های OH فعال در ساختار جاذب‌های خالص و گروه‌های فعال کیتوسان ناشی می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یک ساختار ویژه در نتیجه‌ی واکنش جاذب‌های خالص با گروه‌های فعال کیتوسان در کامپوزیت‌های تهیه شده ایجاد شده است.

تأثیر مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر مقدار کادمیوم قابل استخراج با DTPA و MgCl_2

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم کل خاک غلظت کادمیوم قابل استخراج با DTPA و MgCl_2 به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. افزایش غلظت کادمیوم کل خاک از سطح صفر تا سطح ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم موجب گردید که غلظت کادمیوم قابل استخراج با DTPA از ۰/۳۲ به ۲۵/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و غلظت کادمیوم قابل استخراج با MgCl_2 از ۰/۲۰ به ۱۴/۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یابد (جدول ۳). همچنین نتایج نشان داد که افزودن جاذب‌ها باعث کاهش معنی‌دار غلظت کادمیوم قابل استخراج با DTPA و MgCl_2 گردید. در هر دو روش عصاره‌گیری به کار رفته، بیش‌ترین غلظت کادمیوم قابل جذب مربوط به تیمار شاهد (فاقد جاذب) و کم‌ترین غلظت آن مربوط به تیمار کیتوسان-مگنتیت بود (جدول ۳).

توانایی جاذب‌های مختلف برای جذب فلز سنگین کادمیوم نیز به ترتیب زیر بود:



از جمله ویژگی‌های نانو ذرات می‌توان به سطح ویژه‌ی بالا، حضور سایت‌های فعال بیشتر، راندمان جذب بالا، واکنش‌پذیری بیش‌تر و توانایی بالا در پراکنده شدن در محلول‌های آبی اشاره

کرد. نانوذرات معمولاً واکنش‌پذیری و توانایی جذب بالاتری را نسبت به اندازه‌ی طبیعی ذرات همان ماده نشان می‌دهند. نسبت سطح به جرم بالا در نانوذرات به‌شدت ظرفیت جذب مواد جاذب را افزایش می‌دهد (Bahramiet al., 2013; Kaushal and Singh, 2017). اما نانوذرات مغناطیسی در اثر برهم‌کنش‌های مستقیم بین ذره‌ای (مثل نیروی واندروالس) و برهم‌کنش‌های مغناطیسی، تمایل به هم‌آوری داشته و تشکیل ذراتی با اندازه‌ی میکرون و یا بزرگ‌تر را می‌دهند. این اتفاق باعث کاهش سطح ویژه و واکنش‌پذیری آن‌ها می‌گردد. بنابراین امروزه نانوذرات مغناطیسی توسط مولکول‌های آلی، یون‌های معدنی و یا برخی از گروه‌های کاربردی که توانایی زیادی در حذف فلزهای سنگین دارند، پوشش داده می‌شوند و برای حذف یون‌های فلزی از محیط‌های آلوده، به کار برده می‌شوند (Bahramiet al., 2013). در این آزمایش نیز مشاهده شد که پوشش دادن سطوح نانوذرات مگنتیت با کیتوسان موجب گردید که کارایی این جاذب برای جذب فلز سنگین کادمیوم افزایش یابد و کامپوزیت کیتوسان-مگنتیت به عنوان کاراترین جاذب در جذب کادمیوم عمل کند (Najafi et al. 2020).

همان‌طور که در باقی جاذب‌های خالص نیز مشاهده گردید استفاده از جاذب‌ها به‌صورت خالص توانایی زیادی برای حذف فلز سنگین کادمیوم نداشت اما تهیه‌ی کامپوزیت‌های پلیمری با کیتوسان، با دست‌یابی به خواصی کارآمدتر، موجب افزایش کارایی جاذب‌ها در حذف فلزهای سنگین شد که این نتایج با یافته‌های (Hussain et al. (2017) و Chang and Chen (2005) مطابقت داشت.

میانگین ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر میانگین ارتفاع بوته‌های گیاه کاهو داشتند (جدول ۴).

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم کل خاک میانگین ارتفاع بوته‌های گیاه کاهو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. میانگین ارتفاع بوته‌های گیاه کاهو در غلظت‌های کادمیوم کل صفر، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به ترتیب برابر با ۱۱/۴۷، ۸/۳۴، ۷/۶۵ و ۶/۵۸ سانتی‌متر بود. کاهش ارتفاع ساقه‌ی گیاه با افزایش غلظت کادمیوم می‌تواند به دلیل کاهش تعداد و ایجاد اختلال در سلول‌های مریستمی آن منطقه باشد (Das et al., 1997). در حقیقت کادمیوم باعث کاهش فعالیت هورمون سیتوکینین می‌شود که تأثیر به‌سزایی بر تکثیر سلول و رشد گیاه

دارد (Mok, 1994). از طرفی حضور کادمیوم منجر به کاهش سرعت رشد، تبخیر و تعرق و جذب یون توسط گیاه می شود و با کاهش جذب آب و غلظت سایر یون ها، مانع از انجام فعالیت های ریشه می گردد (Veselov et al., 2003).

جدول ۳- میانگین غلظت کادمیوم قابل عصاره گیری با DTPA و MgCl₂ در تیمارهای مختلف جاذب و در غلظت های مختلف کادمیوم کل.

مقدار کادمیوم قابل عصاره گیری با (mg/kg)		سطوح آلودگی کادمیوم (mg/kg)	نوع جاذب
MgCl ₂	DTPA		
۰/۲۰ ^{kl}	۰/۳۲ ^k	۰	شاهد (تیمار بدون جاذب)
۱/۶۰ ⁱ	۳/۹۰ ⁱ	۸	
۶/۰۸ ^e	۱۰/۷۲ ^f	۲۵	
۱۴/۷۲ ^a	۲۵/۵۰ ^a	۷۵	
۰/۱۲ ^l	۰/۲۴ ^k	۰	کیتوسان
۱/۰۴ ^{klj}	۲/۷۴ ^j	۸	
۳/۸۸ ^{sh}	۷/۵۸ ^h	۲۵	
۹/۵۲ ^c	۲۰/۴۰ ^d	۷۵	
۰/۱۴ ^l	۰/۲۴ ^k	۰	بیوچار
۱/۱۲ ^{ij}	۳/۱۲ ^{ij}	۸	
۴/۳۰ ^g	۷/۶۶ ^h	۲۵	
۹/۶۸ ^c	۲۱/۶۰ ^c	۷۵	
۰/۱۴ ^l	۰/۳۲ ^k	۰	زئولیت
۱/۲۰ ^{ij}	۳/۴۲ ^{ij}	۸	
۵/۲۰ ^f	۹/۲۰ ^g	۲۵	
۱۲/۶۴ ^b	۲۴/۴۰ ^b	۷۵	
۰/۱۴ ^l	۰/۳۲ ^k	۰	نانو مگنتیت
۱/۱۶ ^{ij}	۳/۱۶ ^{ij}	۸	
۴/۴۰ ^g	۸/۰۰ ^h	۲۵	
۱۲/۵۲ ^b	۲۱/۷۰ ^c	۷۵	
۰/۰۸ ^l	۰/۱۶ ^k	۰	کیتوسان - بیوچار
۰/۷۲ ^{klj}	۲/۶۸ ^j	۸	
۳/۲۸ ^h	۷/۴۶ ^h	۲۵	
۹/۲۴ ^c	۱۷/۲۰ ^e	۷۵	
۰/۱۰ ^l	۰/۲۴ ^k	۰	کیتوسان - زئولیت
۰/۹۲ ^{klj}	۲/۷۰ ^j	۸	
۳/۶۸ ^{sh}	۷/۵۴ ^h	۲۵	
۹/۴۸ ^c	۱۷/۶۰ ^e	۷۵	
۰/۰۶ ^l	۰/۱۶ ^k	۰	کیتوسان - مگنتیت
۰/۴۰ ^{klj}	۲/۶۴ ^j	۸	
۱/۴۰ ⁱ	۷/۳۰ ^h	۲۵	
۷/۰۴ ^d	۱۶/۶۰ ^e	۷۵	

- هر یک از آزمایش ها با سه تکرار انجام شده است و برای مقایسه ی میانگین داده ها نیز از آزمون چند دامنه ای دانکن استفاده شده است. - اعداد با حروف مشابه از نظر آماری اختلاف معنی داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر برخی از صفات زراعی گیاه کاهو.

میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
وزن خشک ریشه	وزن خشک بخش هوایی	متوسط ارتفاع بوته		
۱۱/۱۲*	۲۲/۵۸*	۱۰۶/۰۴*	۳	غلظت کادمیوم کل خاک
۰/۴۰*	۱/۳۳*	۸/۳۸*	۷	نوع جاذب
۰/۰۹**	۰/۳۹**	۲/۹۳**	۲۱	غلظت کادمیوم کل خاک × نوع جاذب
۰/۰۷	۰/۲۵	۰/۹۹	۶۴	خطای آزمایشی
۲۲/۳۰	۲۷/۶۸	۱۱/۷۰		ضریب تغییرات (%)

* معنی دار بودن در سطح احتمال یک درصد و ** معنی دار بودن در سطح احتمال پنج درصد را بیان می کند.

تولید پروتئین شده و رشد را متوقف می‌نماید (Wang *et al.*, 2008). همچنین نشان داده شده است که کادمیوم به غشاهای نیلاکوئیدی کلروپلاست آسیب می‌زند و ظرفیت فتوسنتز را به شدت کاهش داده و موجب توقف رشد گیاه می‌گردد (Feng *et al.*, 2010). علاوه بر این، این فلز سمی با مهار فعالیت آنزیم‌های چرخه‌ی کلوین از جمله روبیسکو و زنجیره‌ی انتقال الکترون و آسیب به سلول‌های روزنه‌ای فتوسنتز سبب کاهش رشد می‌گردد (Souza *et al.*, 2005).

جدول ۵- مقایسه‌ی میانگین‌های اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر برخی از صفات زراعی گیاه کاهو

نوع جاذب	سطوح آلودگی کادمیوم (mg/kg)	میانگین ارتفاع بوته	وزن خشک ریشه	وزن خشک بخش هوایی
شاهد	۰	۸/۷۳ ^{cebd}	۱/۶۹ ^{efdg}	۲/۱۵ ^{dce}
(تیمار)	۸	۸/۰ ^{fcehdg}	۱/۰ ^{hklji}	۱/۶۶ ^{gdfhe}
بدون (جاذب)	۲۵	۷/۲ ^{fehg}	۰/۶۸ ^{lk}	۱/۲۶ ^{gdfhe}
	۷۵	۵/۸۳ ^h	۰/۴۸ ^l	۰/۵۷ ^h
کیتوسان	۰	۱۰/۷۳ ^b	۱/۹۹ ^{bdc}	۳/۱۸ ^{bc}
	۸	۸/۳۳ ^{cehbhdg}	۱/۳۲ ^{hefkjgi}	۲/۰ ^{fgdfce}
	۲۵	۷/۸ ^{fehg}	۰/۸۰ ^{lkji}	۱/۴۵ ^{gdfhe}
	۷۵	۶/۹۷ ^{fehg}	۰/۵۲ ^l	۰/۸۱ ^{gfh}
بیوجار	۰	۱۰/۴۷ ^{cb}	۱/۸۵ ^{edc}	۳/۱۵ ^{bc}
	۸	۸/۲۷ ^{cehbhdg}	۱/۱۵ ^{hlfkjgi}	۱/۸۷ ^{gdfhe}
	۲۵	۷/۵۳ ^{fehg}	۰/۷۸ ^{lkji}	۱/۴۲ ^{gdfhe}
	۷۵	۶/۳۷ ^{fhg}	۰/۵۱ ^l	۰/۷۹ ^{ch}
زنولیت	۰	۹/۱۷ ^{cebd}	۱/۷۱ ^{efdc}	۲/۱۶ ^{dce}
	۸	۸/۰ ^{fcehdg}	۱/۰ ^{hkljgi}	۱/۷۴ ^{gdfhe}
	۲۵	۷/۳ ^{fehg}	۰/۷۲ ^{lkj}	۱/۲۹ ^{gdfhe}
	۷۵	۶/۰ ^{hg}	۰/۵۰ ^l	۰/۶۹ ^h
نانو	۰	۱۰/۴۳ ^{cbd}	۱/۷۳ ^{efdc}	۲/۲۶ ^{dc}
	۸	۸/۱۳ ^{cehdg}	۱/۱ ^{hlfkjgi}	۱/۸۰ ^{gdfhe}
مگنتیت	۲۵	۷/۴ ^{fehg}	۰/۷۵ ^{lkj}	۱/۴ ^{gdfhe}
	۷۵	۶/۳۰ ^{fhg}	۰/۵۱ ^l	۰/۷۰ ^h
کیتوسان-بیوجار	۰	۱۴/۲۷ ^a	۲/۵۶ ^{ba}	۳/۸۷ ^{ba}
	۸	۸/۶۳ ^{cebd}	۱/۴۲ ^{hefdgi}	۲/۱۱ ^{dfce}
	۲۵	۷/۹۷ ^{cehdg}	۰/۸۵ ^{lkji}	۱/۵۱ ^{gdfhe}
	۷۵	۷/۰ ^{fehg}	۰/۶۰ ^l	۱/۰ ^{gdfhe}
کیتوسان-زنولیت	۰	۱۳/۲۳ ^a	۲/۳۳ ^{bac}	۳/۶۵ ^{ba}
	۸	۸/۶۰ ^{cebdg}	۱/۳۶ ^{hefdjgi}	۲/۱۰ ^{gdfce}
	۲۵	۷/۹ ^{fehdg}	۰/۸۲ ^{lkji}	۱/۴۸ ^{gdfhe}
	۷۵	۶/۹۷ ^{fehg}	۰/۵۴ ^l	۰/۸۵ ^{gfh}
کیتوسان-مگنتیت	۰	۱۴/۷۳ ^a	۲/۸۲ ^a	۴/۴۷ ^a
	۸	۸/۶۷ ^{cebd}	۱/۵۴ ^{hefdg}	۲/۱۴ ^{dce}
	۲۵	۸/۰ ^{fcehdg}	۰/۸۸ ^{lkji}	۱/۵۸ ^{gdfhe}
	۷۵	۷/۱۷ ^{fehg}	۰/۶۵ ^l	۱/۱۹ ^{gdfhe}

- هر یک از آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شده است و برای مقایسه‌ی میانگین داده‌ها نیز از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شده است.
- اعداد با حروف مشابه از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

همچنین مقایسه‌ی میانگین داده‌ها نشان داد که با افزودن جاذب‌ها، میانگین ارتفاع بوته‌های گیاه کاهو به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. میانگین ارتفاع بوته‌های گیاه کاهو در تیمارهای شاهد، زنولیت، مگنتیت، بیوجار و کیتوسان خالص به‌ترتیب برابر با ۷/۴۴، ۷/۶۳، ۸/۰۸، ۸/۱۵ و ۸/۴۵ سانتی‌متر و در تیمارهای کیتوسان-زنولیت، کیتوسان-بیوجار و کیتوسان-مگنتیت به‌ترتیب برابر با ۹/۱۷، ۹/۴۸ و ۹/۶۴ سانتی‌متر بود.

مقایسه میانگین داده‌های اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر متوسط ارتفاع بوته‌های گیاه کاهو نیز نشان داد که در تمامی سطوح آلودگی کادمیوم، کارایی کامپوزیت‌ها برای بهبود شرایط رشد گیاه نسبت به جاذب‌های خالص بیشتر بود (جدول ۵). با توجه به این که کامپوزیت‌های کیتوسان-بیوجار، کیتوسان-زنولیت و کیتوسان-مگنتیت نسبت به بیوجار، زنولیت و نانو مگنتیت خالص توانایی بالاتری در غیر متحرک کردن فلز سنگین کادمیوم در خاک داشتند بنابراین متوسط ارتفاع بوته‌های کاهو نیز در این تیمارها بیشتر بود. به‌طور کلی در تمامی سطوح آلودگی بیشترین میانگین ارتفاع بوته‌ها مربوط به تیمار کیتوسان-مگنتیت و کمترین میانگین ارتفاع بوته‌ها مربوط به تیمار شاهد (فاقد جاذب) بود و تفاوت میانگین این دو تیمار حدود ۲۹/۵۷ درصد اندازه‌گیری شد.

وزن خشک ریشه و بخش هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو داشتند (جدول ۴). نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم کل خاک وزن خشک بخش هوایی و ریشه‌ی گیاه کاهو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. وزن خشک بخش هوایی گیاه‌های کشت شده در خاک‌هایی با غلظت‌های کادمیوم کل صفر، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به-ترتیب برابر با ۳/۱۱، ۱/۹۳، ۱/۴۲ و ۰/۸۳ گرم و وزن خشک ریشه به‌ترتیب برابر با ۲/۰۹، ۱/۲۵، ۰/۷۸ و ۰/۵۴ گرم بود. چون ریشه‌ی گیاه اولین محل تماس فلز سنگین خاک با گیاه است بنابراین کاهش بیشتر وزن خشک ریشه در مقایسه با بخش هوایی گیاه قابل توجیه است. به‌نظر می‌رسد که کاهش رشد ریشه یک تغییر سازشی با هدف کاهش سطح جذب فلز سمی کادمیوم توسط گیاه می‌باشد که در نتیجه‌ی آن جذب آب و یون‌های معدنی نیز کاهش می‌یابد (Bhattacharyya *et al.*, 1999). بخشی از کادمیوم که به بخش هوایی انتقال می‌یابد با ایجاد اختلال در متابولیسم نیتروژن از طریق مهار فعالیت آنزیم‌هایی مانند گلوتامین سنتتاز، گلوتامات سنتتاز و نیترات رداکتاز و فرآیند احیای نیترات سبب کاهش

توسط گیاه می شود (Akay and Koleli, 2007). همچنین Dayani and Raeisi (2006) کاهش معنی دار فعالیت آنزیم های فسفاتاز و اوره آز را در حضور سطوح ۵۰ تا ۲۰۰ میلی گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک گزارش نمودند. طبق گزارش های آن ها کاهش فعالیت آنزیمی در خاک های آلوده به کادمیوم سبب مختل شدن چرخه ی عناصر غذایی، به ویژه فسفر و نیتروژن، می گردد. از دیگر دلایل کاهش غلظت فسفر در بافت های گیاه، با حضور کادمیوم در محیط ریشه، می توان به تشکیل فسفات کادمیوم در خاک و یا در بافت های گیاه، مخصوصا ریشه ها، اشاره کرد. فسفات کادمیوم ترکیبی است که از حلالیت کمی برخوردار می باشد. بنابراین تشکیل آن در محیط خاک یا ریشه ممکن است موجب کمبود فسفر در خاک و یا بروز مشکلات مربوط به انتقال فسفر در گیاه گردد (Haghiri, 1973).

همچنین مقایسه ی میانگین داده ها نشان داد که با افزودن جاذب ها، مقدار فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نسبت به تیمار شاهد به طور معنی داری افزایش یافت. مقدار فسفر ریشه در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به ترتیب برابر با ۰/۲۵، ۰/۳۱، ۰/۳۳، ۰/۳۴ و ۰/۳۴ درصد و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به ترتیب برابر با ۰/۳۷، ۰/۴۴ و ۰/۴۷ درصد بود. مقدار فسفر بخش هوایی نیز در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به ترتیب برابر با ۰/۱۸، ۰/۲۱، ۰/۲۲، ۰/۲۴ و ۰/۲۵ درصد و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به ترتیب برابر با ۰/۲۶، ۰/۲۸ و ۰/۳۱ درصد بود. دلیل مشاهده ی چنین نتایجی را می توان این گونه بیان داشت که احتمالا جاذب های به کار رفته در این آزمایش، با جذب بخشی از کادمیوم موجود در خاک و کاهش مقدار کادمیوم قابل جذب (جدول ۳)، موجب کاهش اثرات منفی کادمیوم بر فعالیت های میکروبی و آنزیمی شده اند و شرایط را برای جذب بیشتر فسفر توسط گیاه بهبود داده اند. از طرفی این جاذب ها بر روی فرآیندهای تشکیل فسفات کادمیوم نیز اثر گذاشته و موجب کاهش تولید این ترکیب در محیط خاک و ریشه شده اند. در نتیجه با جلوگیری از رسوب فسفر به شکل فسفات کادمیوم در خاک و محیط ریشه، شرایط را برای جذب فسفر توسط ریشه و انتقال آن به بخش های هوایی فراهم آورده اند.

بررسی اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر مقدار فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نیز نشان داد که جاذب های افزوده شده به خاک های آلوده در تمامی سطوح آلودگی با غیرمتحرک نمودن بخشی از کادمیوم قابل جذب (جدول ۳)، موجب کاهش سمی بودن کادمیوم و افزایش مقدار

همچنین مقایسه ی میانگین داده ها نشان داد که با افزودن جاذب ها، وزن خشک بخش هوایی و ریشه ی گیاه کاهو نسبت به تیمار شاهد به طور معنی داری افزایش یافت. وزن خشک بخش هوایی در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به ترتیب برابر با ۱/۴۱، ۱/۴۷، ۱/۵۳، ۱/۸۰ و ۱/۸۷ گرم و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به ترتیب برابر با ۲/۰۲، ۲/۱۲ و ۲/۳۴ گرم بود. وزن خشک ریشه نیز در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۱/۰۰، ۱/۰۲، ۱/۰۷ و ۱/۱۶ گرم و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به ترتیب برابر با ۱/۲۶، ۱/۳۵ و ۱/۴۷ گرم بود. بررسی اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نیز نشان داد که جاذب های افزوده شده به خاک های آلوده در تمامی سطوح آلودگی با غیر متحرک نمودن بخشی از کادمیوم قابل جذب (جدول ۳)، موجب کاهش سمی بودن کادمیوم و افزایش وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو در مقایسه با تیمار شاهد (فاقد جاذب) شدند (جدول ۵). اما کامپوزیت های کیتوسان به دلیل توانایی بالاتر در غیر متحرک نمودن فلز سنگین کادمیوم، تأثیر بیشتری بر روی افزایش وزن خشک ریشه و بخش هوایی داشتند. در تمامی سطوح آلودگی کادمیوم از بین جاذب های به کار رفته بیشترین وزن خشک ریشه و بخش هوایی مربوط به تیمار کیتوسان-مگنتیت و کمترین وزن خشک ریشه و اندام هوایی مربوط به تیمار زئولیت بود.

فسفر ریشه و بخش هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی داری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی داری در سطح احتمال پنج درصد بر مقدار فسفر ریشه و بخش هوایی بوته های گیاه کاهو داشتند (جدول ۶). نتایج نشان داد که با افزایش مقدار کادمیوم کل خاک، مقدار فسفر ریشه افزایش و مقدار فسفر بخش هوایی کاهش یافت. مقدار فسفر ریشه ی گیاهان کشت شده در خاک هایی با سطوح آلودگی ۰، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک به ترتیب برابر با ۰/۳۲، ۰/۳۵، ۰/۳۷ و ۰/۴۰ درصد و مقدار فسفر بخش هوایی آن ها به ترتیب برابر با ۰/۲۷، ۰/۲۵، ۰/۲۴ و ۰/۲۱ درصد بود. با توجه به این که جذب فسفر توسط گیاه به صورت فعال انجام می یابد، کادمیوم با تأثیر منفی بر روی تولید ATP، که انرژی مورد نیاز برای جذب فعال فسفر را فراهم می آورد باعث کاهش جذب فسفر

داشتند. در تمامی سطوح آلودگی کادمیوم، از بین جاذب‌های به کار رفته، بیش‌ترین مقدار فسفر ریشه و بخش هوایی مربوط به تیمار کیتوسان-مگنتیت و کم‌ترین مقدار فسفر ریشه و اندام هوایی مربوط به تیمار زئولیت بود.

فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو در مقایسه با تیمار شاهد (فاقد جاذب) شدند (جدول ۷). اما کامپوزیت‌های کیتوسان به دلیل توانایی بالاتر در غیر متحرک نمودن فلز سنگین کادمیوم، تأثیر بیش‌تری بر روی افزایش مقدار فسفر ریشه و بخش هوایی

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس تأثیر غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر مقدار فسفر، پتاسیم، آهن، روی و کادمیوم ریشه و بخش هوایی بوته‌های گیاه کاهو

منابع تغییر	درجه آزادی	مقدار فسفر ریشه	مقدار فسفر بخش هوایی	مقدار پتاسیم ریشه	مقدار پتاسیم بخش هوایی	مقدار آهن ریشه	مقدار آهن بخش هوایی	میانگین مربعات	
								مقدار روی ریشه	مقدار روی بخش هوایی
غلظت کادمیوم کل خاک	۳	۰/۰۲۳*	۰/۰۱۷*	۵/۲۸۶*	۱/۱۹۳*	۵۷۱۳۷/۶۲*	۱۲۶۴۳/۲۵*	۵۴۳/۸۲*	۳۶۳۰/۹۱*
نوع جاذب	۷	۰/۰۶۱*	۰/۰۲۱*	۳/۶۷۴*	۱۰/۱۱۸*	۵۱۲۶۴/۵۸*	۳۰۳۳۵/۵۷*	۳۳۹/۷۲*	۱۹۹۲/۵۳*
غلظت کادمیوم کل خاک × نوع جاذب	۲۱	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۰۵**	۰/۰۶۰**	۰/۳۳۷*	۱۶۸۵/۶۹*	۸۷۵/۹۶*	۱۲/۷۹*	۲۶۸/۷۹*
خطای آزمایشی	۶۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۳۴	۰/۰۴۱	۱۱۷/۵۳	۱۲۹/۲۸	۲/۸۸	۵/۹۹
ضریب تغییرات (%)		۸/۹۰۵	۹/۷۸۷	۹/۰۸۵	۶/۶۹۳	۳/۹۳	۹/۵۳	۴/۴۷	۵/۳۵
									۹/۱۹
									۵/۱۶

* معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک درصد و ** معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج درصد را بیان می‌کند.

جدول ۷- مقایسه‌ی میانگین‌های اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر مقدار فسفر، پتاسیم، آهن، روی و کادمیوم ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو

نوع جاذب	سطوح آلودگی کادمیوم (mg/kg)	فسفر ریشه (%)	فسفر بخش هوایی (%)	پتاسیم ریشه (%)	پتاسیم بخش هوایی (%)	آهن ریشه (mg/kg)
شاهد (تیمار بدون جاذب)	۰	۰/۲۳ ^j	۰/۲۱ ^{hg}	۱/۳۵ ^{kj}	۲/۳۵ ^s	۲۶۳ ^{klm}
	۸	۰/۲۴ ^{ji}	۰/۲۰ ^{ihg}	۱/۲۱ ^{kjl}	۲/۰۷ ^{hg}	۲۱۶ ^{po}
	۲۵	۰/۲۵ ^{hji}	۰/۱۸ ⁱ	۱/۳۶ ^{kl}	۱/۲۲ ^{ji}	۱۵۰ ^s
	۷۵	۰/۲۷ ^{hgij}	۰/۱۱ ^j	۰/۹۰ ^l	۰/۹۰ ^l	۱۲۶ ^t
کیتوسان	۰	۰/۳۱ ^{hgfdci}	۰/۲۸ ^{bcd}	۲/۳۵ ^{ed}	۳/۳۷ ^{dfee}	۳۱۹ ^{gef}
	۸	۰/۳۴ ^{hgfdce}	۰/۲۵ ^{fbedhdg}	۲/۱۲ ^{hedgdf}	۳/۳۲ ^{dfee}	۳۰۸ ^{ghf}
	۲۵	۰/۳۴ ^{efide}	۰/۲۴ ^{fbedhdg}	۲/۰۷ ^{hedgdfi}	۳/۲۶ ^{dfee}	۲۹۶ ^{ghf}
	۷۵	۰/۳۷ ^{cde}	۰/۲۱ ^{figh}	۱/۹۳ ^{hegfi}	۳/۰۵ ^{dfe}	۲۳۵ ^{no}
بیوجار	۰	۰/۳۰ ^{hgjfei}	۰/۲۷ ^{bced}	۲/۳۱ ^{edf}	۳/۳۲ ^{dfee}	۲۹۰ ^{hij}
	۸	۰/۳۳ ^{hgfdce}	۰/۲۴ ^{fbedhdg}	۲/۰۷ ^{hedgdfi}	۳/۲۶ ^{dfee}	۲۷۹ ^{kij}
	۲۵	۰/۳۴ ^{efide}	۰/۲۲ ^{fiehg}	۲/۰۳ ^{hedgdfi}	۳/۲۱ ^{dfee}	۲۶۹ ^{kj}
	۷۵	۰/۳۷ ^{efide}	۰/۲۰ ^{ihg}	۱/۸۳ ^{hgfi}	۲/۹۴ ^{fe}	۱۹۴ ^{pq}
زئولیت	۰	۰/۲۸ ^{hgij}	۰/۲۳ ^{fiehg}	۱/۷۴ ^{hgj}	۳/۰۵ ^{dfe}	۲۶۹ ^{klj}
	۸	۰/۲۹ ^{hgjfi}	۰/۲۱ ^{fiehg}	۱/۶۵ ^{hji}	۲/۸۹ ^f	۲۴۰ ^{nom}
	۲۵	۰/۳۲ ^{hgfdci}	۰/۲۰ ^{ihg}	۱/۶۰ ^{kji}	۱/۶۰ ⁱ	۱۶۷ ^{rs}
	۷۵	۰/۳۳ ^{hgfdce}	۰/۱۹ ^{ih}	۱/۲۱ ^{kjl}	۱/۴۸ ⁱ	۱۵۲ ^s
نانو مگنتیت	۰	۰/۳۰ ^{hgjfei}	۰/۲۳ ^{fiecadg}	۲/۰۳ ^{hedgdfi}	۳/۱۰ ^{dfee}	۲۷۷ ^{kij}
	۸	۰/۳۲ ^{hgfdce}	۰/۲۳ ^{fiehdg}	۱/۸۸ ^{hegfi}	۲/۹۴ ^{fe}	۲۴۳ ^{am}
	۲۵	۰/۳۳ ^{hgfdce}	۰/۲۰ ^{ihg}	۱/۸۳ ^{hgfi}	۱/۷۰ ^{hi}	۲۲۳ ^{no}
	۷۵	۰/۳۶ ^{efide}	۰/۲۰ ^{ihg}	۱/۷۴ ^{hgj}	۱/۵۶ ⁱ	۱۸۸ ^{rq}
کیتوسان - بیوجار	۰	۰/۳۸ ^{cde}	۰/۳۰ ^{ba}	۲/۹۴ ^b	۴/۵۸ ^{ba}	۴۱۵ ^b
	۸	۰/۴۵ ^{cb}	۰/۲۹ ^{bc}	۲/۵۰ ^{cd}	۴/۲۳ ^b	۳۲۹ ^{def}
	۲۵	۰/۴۶ ^b	۰/۲۸ ^{bc}	۲/۳۵ ^{ed}	۴/۱۷ ^b	۳۱۷ ^{gef}
	۷۵	۰/۴۷ ^b	۰/۲۵ ^{fbedhdg}	۲/۲۱ ^{egdf}	۳/۲۱ ^{dfee}	۲۹۵ ^{ghij}
کیتوسان - زئولیت	۰	۰/۳۴ ^{efide}	۰/۳۰ ^{ba}	۲/۵۰ ^{cd}	۳/۴۸ ^{dc}	۳۶۲ ^c
	۸	۰/۳۷ ^{efide}	۰/۲۵ ^{fbedcdg}	۲/۲۶ ^{edf}	۳/۴۲ ^{dce}	۳۲۳ ^{ef}
	۲۵	۰/۳۷ ^{efide}	۰/۲۴ ^{fbedhdg}	۲/۲۱ ^{egdf}	۳/۳۷ ^{dfee}	۳۱۳ ^{ghef}
	۷۵	۰/۳۹ ^{cd}	۰/۲۳ ^{fiehdg}	۲/۱۶ ^{egdf}	۳/۱۰ ^{dfee}	۲۴۴ ^{nlm}
کیتوسان - مگنتیت	۰	۰/۳۹ ^{cd}	۰/۳۵ ^a	۳/۴۸ ^a	۴/۸۲ ^a	۴۹۱ ^a
	۸	۰/۴۷ ^b	۰/۳۰ ^{ba}	۳/۰۵ ^b	۴/۴۷ ^{ba}	۳۵۳ ^{dc}
	۲۵	۰/۴۷ ^b	۰/۳۰ ^b	۲/۸۹ ^{cb}	۴/۳۵ ^{ba}	۳۳۷ ^{de}
	۷۵	۰/۵۶ ^a	۰/۲۷ ^{fbedcd}	۲/۲۶ ^{edf}	۳/۵۸ ^c	۳۲۳ ^{ef}

ادامه جدول ۷

نوع جاذب	سطوح آلودگی کادمیوم (mg/kg)	آهن بخش هوایی (mg/kg)	روی ریشه (mg/kg)	روی بخش هوایی (mg/kg)	کادمیوم ریشه (mg/kg)	کادمیوم بخش هوایی (mg/kg)
شاهد (تیمار بدون جاذب)	۰	۶۶ ^{poq}	۳۴/۶۰ ^{ljki}	۳۷/۲۰ ^{ikhj}	۱۰/۷۰ ^{ij}	۲/۲۰ ^۱
	۸	۵۷ ^{pq}	۳۰/۶۰ ^{lm}	۳۲/۵۰ ^{lk}	۴۵/۷۰ ^f	۵۲/۳۰ ^h
	۲۵	۵۳ ^q	۲۸/۰۰ ^m	۳۰/۴۰ ^m	۱۳۲/۷۰ ^b	۸۶/۸۰ ^{cb}
	۷۵	۴۸ ^q	۲۳/۶۰ ⁿ	۲۵/۹۰ ^m	۱۸۱ ^a	۱۰۲/۷ ^a
کیتوسان	۰	۱۷۷ ^{cde}	۴۲/۹۰ ^{dce}	۵۶/۱۰ ^{ef}	۵/۷۰ ^{ij}	۱ ^۱
	۸	۱۲۹ ^{gfh}	۴۱/۷۰ ^{dfce}	۴۷/۱۰ ^g	۲۸/۱۰ ^{gh}	۳۱/۷۰ ^j
	۲۵	۱۱۵ ^{kgijh}	۳۷/۰۰ ^{higi}	۳۷/۰۰ ^{ikhj}	۹۴/۵۰ ^d	۷۱/۳۰ ^{ef}
	۷۵	۱۰۰ ^{klgm}	۳۳/۴۰ ^{ljk}	۳۳/۸۰ ^{lkj}	۱۱۶/۵۰ ^c	۸۸/۴۰ ^b
بیوچار	۰	۱۱۸ ^{kgijh}	۴۰/۵۰ ^{dfge}	۵۵/۹۰ ^{ef}	۶/۴۰ ^{ij}	۱/۳۰ ^۱
	۸	۱۱۳ ^{kljzh}	۴۰/۴۰ ^{dfge}	۳۹/۹۰ ^{ihj}	۳۰/۰۰ ^{gh}	۳۲/۷۰ ^{ji}
	۲۵	۱۰۶ ^{kljnm}	۳۵/۲۰ ^{hjki}	۳۵/۴۰ ^{likhj}	۱۱۰/۸۰ ^c	۷۲/۶۰ ^{ef}
	۷۵	۸۶ ^{lnom}	۳۱/۸۰ ^{lk}	۳۲/۸۰ ^{lk}	۱۳۴/۸۰ ^b	۸۶/۴۰ ^{cb}
زئولیت	۰	۷۳ ^{pnoq}	۳۸/۴۰ ^{hfg}	۳۹/۷۰ ^{ihj}	۸/۹۰ ^{ij}	۱/۹۰ ^۱
	۸	۷۰ ^{pnoq}	۳۴/۴۰ ^{ljki}	۳۷/۰۰ ^{ikhj}	۴۰/۲۰ ^{gf}	۳۸/۲۰ ⁱ
	۲۵	۶۸ ^{poq}	۳۳/۸۰ ^{ljk}	۳۳/۸۰ ^{lkj}	۱۲۵/۲۰ ^{cb}	۷۳/۲۰ ^{ef}
	۷۵	۶۶ ^{poq}	۳۰/۵۰ ^{lm}	۳۱/۸۰ ^{lk}	۱۷۴/۸۰ ^a	۹۱/۹۰ ^b
نانو مگنتیت	۰	۹۶ ^{kljnm}	۴۰/۲۰ ^{dfge}	۴۷/۸۰ ^g	۷/۶۰ ^{ij}	۱/۴۰ ^۱
	۸	۹۲ ^{klnom}	۳۴/۶۰ ^{ljki}	۳۹/۴۰ ^{ihj}	۳۰/۴۰ ^{gh}	۳۴/۶۰ ^{ji}
	۲۵	۸۴ ^{pnom}	۳۴/۵۰ ^{ljki}	۳۴/۱۰ ^{lkj}	۱۱۶/۲۰ ^c	۷۲/۹۰ ^{ef}
	۷۵	۷۳ ^{pnoq}	۳۰/۷۰ ^{lm}	۳۲/۰۰ ^{lk}	۱۶۸/۰۰ ^a	۸۸/۹۰ ^b
کیتوسان - بیوچار	۰	۲۲۳ ^b	۴۹/۳۰ ^b	۷۲/۹۰ ^c	۴/۱۰ ^j	۰/۷۰ ^۱
	۸	۱۶۹ ^{de}	۴۴/۹۰ ^c	۶۶/۴۰ ^d	۲۰/۱۰ ^{ih}	۲۵/۶۰ ^k
	۲۵	۱۴۳ ^{gf}	۳۹/۲۰ ^{hfge}	۴۱/۵۰ ^h	۶۷/۷۰ ^e	۶۴/۱۰ ^g
	۷۵	۱۲۳ ^{gijh}	۳۵/۹۰ ^{hjki}	۳۶/۵۰ ^{likhj}	۱۱۳/۶۰ ^c	۷۷/۱۰ ^{ed}
کیتوسان - زئولیت	۰	۱۸۴ ^{cd}	۴۴/۰۰ ^{dc}	۶۲/۳۰ ^d	۴/۴۰ ^j	۰/۹۰ ^۱
	۸	۱۳۹ ^{gfh}	۴۲/۸۰ ^{dce}	۶۱/۳۰ ^{ed}	۲۸/۰۰ ^{gh}	۳۱/۴۰ ^j
	۲۵	۱۲۳ ^{gijh}	۳۹/۱۰ ^{hfge}	۳۷/۹۰ ^{ikhj}	۸۶/۹۰ ^d	۷۰/۷۰ ^f
	۷۵	۱۰۶ ^{kljnm}	۳۵/۷۰ ^{hjki}	۳۵/۴۰ ^{likhj}	۱۱۵/۳۰ ^c	۸۱/۸۰ ^{cd}
کیتوسان - مگنتیت	۰	۲۵۶ ^a	۵۶/۰۰ ^a	۱۰۶/۰۰ ^a	۳/۸۰ ^j	۰/۶۰ ^۱
	۸	۲۱۱ ^b	۵۱/۵۰ ^b	۹۰/۴۰ ^b	۱۷/۷۰ ^{ihj}	۲۴/۱۰ ^k
	۲۵	۱۹۹ ^{cb}	۴۱/۴۰ ^{dfce}	۵۰/۹۰ ^{ef}	۶۰/۱۰ ^e	۵۵/۰۰ ^h
	۷۵	۱۵۴ ^{fe}	۳۷/۰۰ ^{hgji}	۴۰/۱۰ ^{ih}	۱۱۲/۷۰ ^c	۶۷/۴ ^{ef}

- هر یک از آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شده است و برای مقایسه‌ی میانگین داده‌ها نیز از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شده است.

- اعداد با حروف مشابه از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند.

پتاسیم ریشه و بخش هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر مقدار پتاسیم ریشه و بخش هوایی بوته‌های گیاه کاهو داشتند. همچنین مشاهده گردید که اثر متقابل غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب نیز دارای تأثیر معنی‌دار بر مقدار پتاسیم ریشه و بخش هوایی بوته‌های گیاه کاهو بود (جدول ۶). نتایج نشان داد که مقدار پتاسیم ریشه‌ی گیاه‌های کشت شده در خاک‌هایی با سطوح آلودگی ۰، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک به ترتیب برابر با ۲/۰۹، ۲/۰۲، ۱/۷۹ و ۲/۸۶ و پتاسیم بخش هوایی آن‌ها به ترتیب برابر با ۳/۵۱، ۳/۳۳، ۳/۸۶ و

۲/۴۷ درصد بود. بر اساس نتایج به دست آمده آلودگی کادمیوم بر میزان جذب پتاسیم اثر بازدارنده داشت. به نظر می‌رسد که کادمیوم با برخی از عناصر غذایی از جمله پتاسیم برای جذب از طریق ناقل‌های غشایی رقابت دارد. جذب پتاسیم توسط گیاه انتخابی است و همبستگی بالایی با فعالیت‌های متابولیسم گیاه دارد. از طرفی سمی بودن کادمیوم در محیط ریشه و ایجاد اختلال در متابولیسم گیاه سبب تغییر فعالیت آنزیم‌هایی می‌شود که به نحوی با پتاسیم در ارتباط هستند (Javad zarin et al., 2016). همچنین مقایسه‌ی میانگین داده‌ها نشان داد که با افزودن جاذب‌ها، مقدار پتاسیم ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نسبت به تیمار شاهد به طور معنی‌داری افزایش یافت. مقدار پتاسیم ریشه

مواجه سازد (Di Toppi and Gabbrielli, 1999).

همچنین مقایسه‌ی میانگین داده‌ها نشان داد که با افزودن جاذب‌ها، مقدار آهن ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. مقدار آهن بخش هوایی در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به‌ترتیب برابر با ۵۵/۷۵، ۶۹/۰۰، ۸۶/۰۰، ۱۰۵/۷۵ و ۱۳۰/۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به‌ترتیب برابر با ۱۳۸/۰۰، ۱۶۴/۲۵ و ۲۰۵/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقدار آهن ریشه نیز در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به‌ترتیب برابر با ۱۸۸/۷۵، ۲۰۷/۰۰، ۲۳۲/۷۵، ۲۵۸/۰۰ و ۲۸۹/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به‌ترتیب برابر با ۳۱۰/۵۰، ۳۳۹/۰۰ و ۳۷۶/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

بررسی اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر مقدار آهن ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نیز نشان داد که جاذب‌های افزوده شده به خاک‌های آلوده در تمامی سطوح آلودگی با غیر متحرک نمودن بخشی از کادمیوم قابل جذب (جدول ۳)، موجب کاهش سمی بودن کادمیوم و افزایش مقدار آهن ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو در مقایسه با تیمار شاهد (فاقد جاذب) شدند (جدول ۷).

روی ریشه و بخش هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که غلظت کادمیوم کل خاک، نوع جاذب و اثر متقابل غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر مقدار روی ریشه و بخش هوایی بوته‌های گیاه کاهو داشتند (جدول ۶).

مقایسه‌ی میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش مقدار کادمیوم کل خاک، مقدار روی ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. مقدار روی بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌هایی با سطوح آلودگی ۰، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک به‌ترتیب برابر با ۵۹/۹۹، ۵۱/۷۵، ۳۷/۶۳ و ۳۳/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و مقدار روی ریشه‌ی آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۴۰/۱۱، ۴۳/۲۴، ۳۶/۰۳ و ۳۲/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. با توجه به این که یون‌های روی و کادمیوم از طریق ناقل‌های پروتئینی مشترک وارد سلول می‌شوند و با توجه به تشابهی که بین کادمیوم و روی وجود دارد، این دو یون در حین جذب توسط ریشه‌ی گیاه با هم رقابت نموده و هر دو باعث اختلال در جذب و انتقال یکدیگر می‌شوند (Hart et al., 2002).

همچنین مقایسه‌ی میانگین داده‌ها نشان داد که با افزودن

در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به‌ترتیب برابر با ۱/۱۳، ۱/۵۵، ۱/۸۸، ۲/۰۶ و ۲/۱۲ درصد و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به‌ترتیب برابر با ۲/۲۹، ۲/۵۱ و ۲/۹۲ درصد بود. مقدار پتاسیم بخش هوایی نیز در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به‌ترتیب برابر با ۱/۶۴، ۲/۲۴، ۲/۳۳، ۳/۱۹ و ۳/۲۶ درصد و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به‌ترتیب برابر با ۳/۳۵، ۴/۰۵ و ۴/۳۱ درصد بود.

بررسی اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جاذب بر مقدار پتاسیم ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نیز نشان داد که جاذب‌های افزوده شده به خاک‌های آلوده در تمامی سطوح آلودگی با غیرمتحرک نمودن بخشی از کادمیوم قابل جذب (جدول ۳)، موجب کاهش سمی بودن کادمیوم و افزایش مقدار پتاسیم ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو در مقایسه با تیمار شاهد (فاقد جاذب) شدند (جدول ۷). همان‌طور که از نتایج پیداست در تمامی سطوح آلودگی موفق‌ترین جاذب برای کاهش اثر آنتاگونیستی پتاسیم و کادمیوم کامپوزیت کیتوسان-مگنتیت بوده است و زئولیت خالص کمترین اثر را بر کاهش اثر آنتاگونیستی بین پتاسیم و کادمیوم داشته است.

آهن ریشه و بخش هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که غلظت کادمیوم کل خاک، نوع جاذب و اثر متقابل غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جاذب تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر مقدار آهن ریشه و بخش هوایی بوته‌های گیاه کاهو داشتند (جدول ۶).

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار کادمیوم کل خاک، مقدار آهن ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو کاهش یافت. مقدار آهن بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌هایی با سطوح آلودگی ۰، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک به‌ترتیب برابر با ۱۴۹/۰۰، ۱۲۲/۵۰، ۱۱۱/۱۲ و ۹۴/۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و مقدار آهن ریشه‌ی آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۳۳۵/۷۵، ۲۸۶/۳۷ و ۲۵۹/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. چنان‌چه ذکر شد یکی از اثرات سمی بودن کادمیوم، رقابت آن با عناصر ضروری سبک‌تر در رفتار بیوشیمیایی و جذب توسط گیاه است. غلظت کاتیون‌های چند ظرفیتی می‌تواند با حضور کادمیوم طی فرآیندهای آنتاگونیستی از طریق رقابت بر سر جایگاه‌های پیوندی و یا انتقال توسط ناقلین تحت تأثیر قرار گیرد. از آن‌جا که این فلز دو ظرفیتی می‌باشد، می‌تواند با یون‌های آهن دو ظرفیتی رقابت نموده و جایگزین آن‌ها شود و در نتیجه فتوسنتز را با خطر

کاهو نسبت به تیمار شاهد به طور معنی داری کاهش یافت. مقدار کادمیوم ریشه در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به ترتیب برابر با ۹۲/۵۳، ۸۷/۲۸، ۸۰/۵۵، ۷۰/۵۰ و ۶۱/۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به ترتیب برابر با ۵۸/۶۵، ۵۱/۳۸ و ۴۸/۵۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود. مقدار کادمیوم بخش هوایی نیز در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به ترتیب برابر با ۶۱/۰۰، ۵۱/۳۰، ۴۹/۴۵، ۴۸/۲۵ و ۴۸/۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به ترتیب برابر با ۴۶/۲۰، ۴۱/۸۸ و ۳۶/۷۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین توانایی جذب های مختلف برای جذب فلز سنگین کادمیوم و جلوگیری از جذب آن توسط ریشه گیاه به ترتیب زیر بود:

$C-M > C-B > C-Z > C > B > M > Z$

بررسی اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جذب بر مقدار کادمیوم ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نیز نشان داد که جذب های افزوده شده به خاک های آلوده در تمامی سطوح آلودگی با غیرمتحرک نمودن بخشی از کادمیوم قابل جذب (جدول ۳)، موجب کاهش مقدار کادمیوم ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو در مقایسه با تیمار شاهد (فاقد جذب) شدند (جدول ۷). اما کامپوزیت های کیتوسان به دلیل توانایی بالاتر در غیر متحرک نمودن فلز سنگین کادمیوم، تأثیر بیشتری بر کاهش مقدار کادمیوم ریشه و بخش هوایی داشتند. در تمامی سطوح آلودگی کادمیوم، از بین جذب های به کار رفته کمترین مقدار کادمیوم ریشه و بخش هوایی مربوط به تیمار کیتوسان-مگنتیت و کمترین مقدار روی ریشه و اندام هوایی مربوط به تیمار زئولیت بود.

نتیجه گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم کل خاک، ارتفاع بوته و وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو به طور معنی داری کاهش یافت. همچنین افزایش غلظت کادمیوم کل در خاک موجب ایجاد اختلال در فرآیندهای جذب عناصر غذایی توسط گیاه کاهو گردید، به طوری که غلظت پتاسیم، آهن و روی در بخش هوایی و ریشه گیاه کاهو کاهش ولی غلظت کادمیوم آن ها افزایش یافت. در مورد فسفر نیز با افزایش مقدار کادمیوم کل خاک مقدار فسفر ریشه افزایش و مقدار فسفر بخش هوایی کاهش یافت. افزودن جذب های کیتوسان، بیوچار، زئولیت و نانو مگنتیت خالص و کامپوزیت های کیتوسان-بیوچار، کیتوسان-زئولیت، و کیتوسان-مگنتیت به خاک در تمامی سطوح

جاذب ها، مقدار روی ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نسبت به تیمار شاهد به طور معنی داری افزایش یافت. مقدار روی بخش هوایی در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به ترتیب برابر با ۳۱/۵۰، ۳۵/۵۷، ۳۸/۳۲، ۴۱/۰۰ و ۴۳/۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به ترتیب برابر با ۴۹/۴۷، ۵۴/۵۷ و ۷۱/۸۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود. مقدار روی ریشه نیز در تیمارهای شاهد، زئولیت، مگنتیت، بیوچار و کیتوسان خالص به ترتیب برابر با ۲۹/۲۰، ۳۴/۲۷، ۳۵/۰۰، ۳۶/۹۷ و ۳۸/۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم و در تیمارهای کیتوسان-زئولیت، کیتوسان-بیوچار و کیتوسان-مگنتیت به ترتیب برابر با ۴۰/۴۰، ۴۲/۳۳ و ۴۶/۴۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

بررسی اثر متقابل مقدار کادمیوم کل خاک و نوع جذب بر مقدار روی ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو نیز نشان داد که جذب های افزوده شده به خاک های آلوده در تمامی سطوح آلودگی با غیرمتحرک نمودن بخشی از کادمیوم قابل جذب (جدول ۳)، موجب کاهش سمی بودن کادمیوم و افزایش مقدار روی ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو در مقایسه با تیمار شاهد (فاقد جذب) شدند (جدول ۷). اما کامپوزیت های کیتوسان به دلیل توانایی بالاتر در غیر متحرک نمودن فلز سنگین کادمیوم، تأثیر بیش تری بر افزایش مقدار روی ریشه و بخش هوایی داشتند. در تمامی سطوح آلودگی کادمیوم، از بین جذب های به کار رفته بیش ترین مقدار روی ریشه و بخش هوایی مربوط به تیمار کیتوسان-مگنتیت و کمترین مقدار روی ریشه و اندام هوایی مربوط به تیمار زئولیت بود.

کادمیوم ریشه و بخش هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که غلظت کادمیوم کل خاک، نوع جذب و اثر متقابل غلظت کادمیوم کل خاک و نوع جذب تأثیر معنی داری در سطح احتمال یک درصد بر مقدار کادمیوم ریشه و بخش هوایی بوته های گیاه کاهو داشتند (جدول ۶). مقایسه میانی داده ها نشان داد که با افزایش مقدار کادمیوم کل خاک، مقدار کادمیوم ریشه و بخش هوایی گیاه کاهو به طور معنی داری افزایش یافت. نتایج نشان داد که مقدار کادمیوم ریشه گیاه های کشت شده در خاک هایی با سطوح آلودگی ۰، ۸، ۲۵ و ۷۵ میلی گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک به ترتیب برابر با ۶/۴۵، ۳۰/۰۳، ۹۹/۲۶ و ۱۳۹/۵۹ میلی گرم بر کیلوگرم و مقدار کادمیوم بخش هوایی آن ها به ترتیب برابر با ۱/۲۵، ۳۳/۸۳، ۷۰/۸۳ و ۸۵/۵۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود. با افزودن جاذب ها، مقدار کادمیوم ریشه و بخش هوایی گیاه

کامپوزیت‌های کیتوسان در مقایسه با جاذب‌های خالص کارایی بالاتری در غیرمتحرک کردن کادمیوم و کاهش اثر سمی آن داشتند و از میان کامپوزیت‌های به کار رفته نیز کامپوزیت کیتوسان-مگنتیت نسبت به سایر کامپوزیت‌ها در کاهش اثرات سمی کادمیوم بر گیاه مؤثرتر بود.

آلودگی با غیرمتحرک نمودن بخشی از کادمیوم قابل جذب، موجب کاهش غلظت و مقدار جذب این فلز توسط گیاه و کاهش اثرات سمی آن بر گیاه شدند. بدین ترتیب جذب سایر عناصر غذایی از جمله فسفر، پتاسیم، آهن و روی توسط گیاه افزایش یافت و شاخص‌های رشد از جمله ارتفاع بوته‌ها و وزن خشک ریشه و بخش هوایی بهبود و افزایش یافتند. در تمامی سطوح آلودگی

REFERENCES

- Ahmad, M., Ahmed, S., Swami, B.L. and Ikram, S. (2015). Adsorption of heavy metal ions: role of chitosan and cellulose for water treatment. *International Journal of Pharmacognosy*, 2(6), 280-289.
- Akay, A. and Koleli, N. (2007). Interaction between cadmium and zinc in barley grown under field conditions. *Bangladesh Journal of Botany*, 36(1), 13-19.
- Akbar Jan, F., Ishaq, M., Khan, S., Ihsanullah, I., Ahmad, I. and Shakirullah, M. (2010). A comparative study of human health risks via consumption of food crops grown on wastewater irrigated soil (Peshawar) and relatively clean water irrigated soil (lower Dir). *Journal of hazardous materials*, 179(1-3), 612-621.
- Ali Ehyaei, M. and Behbahani Zadeh, A. A. (1993). Description of Soil Chemical Analysis Methods. *Soil and Water Research Institute*, 1, 893. (In Farsi)
- Aycicek, M., Kaplan, O. and Yaman, M. (2008). Effect of cadmium on germination, seedling growth and metal contents of sunflower (*Helianthus annus L.*). *Asian Journal of Chemistry*, 20(4), 2663-2672.
- Bahrami, M., Boroumand nasab, S., Kashkoli, H.A., Farrokhian Firouzi, A. and Babaei, A.A. (2013). Removal of cadmium from aqueous solutions using modified magnetite nanoparticles. *Journal of Health and Environment*, 6(2), 221-232. (In Farsi)
- Bhattacharyya M.H., Wilson A.K., Rajan S.S., Jonah M. (1999). Role of metallothionein inuptake and distribution of environmental levels of cadmium in mice. *Toxicological Sciences*, 34-74.
- Bower, C.A. and Hatcher, J.T. (1966). Simultaneous Determination of Surface Area and Cation-Exchange Capacity 1. *Soil Science Society of America Journal*, 30(4), 525-527.
- Bower, C.A., Reitemeier, R.F. and Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil science*, 73(4), 251-262
- Bremner, J. M. and Mulvaney, C.S. (1982). Nitrogen—Total 1. Methods of soil analysis. Part 2. *Chemical and microbiological properties*, 595-624.
- Cantrell, K.B., Hunt, P.G., Uchimiya, M., Novak, J.M., and Ro, K.S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*. 107, 419-428.
- Chang, Y.C. and Chen, D.H. (2005). Preparation and adsorption properties of monodisperse chitosan-bound Fe₃O₄ magnetic nanoparticles for removal of Cu (II) ions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 283(2), 446-451.
- Das, P., Samantaray, S., and Rout, G.R. (1997). Studies on cadmium toxicity in plants: a review. *Environmental Pollution*, 98: 29-36.
- Dayani, L. and Raeesi, F. (2006). Activity of Phosphatase and Urease Enzymes in a Cadmium Infected Soil. *Conference of Soil, Environment and Sustainable Development*, 113-114. (In Farsi)
- Dehghani, M.H., Dehghan, A. and Najafpoor, A. (2017). Removing Reactive Red 120 and 196 using chitosan/zeolite composite from aqueous solutions: Kinetics, isotherms, and process optimization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 51, 185-195.
- Di Toppi, L.S. and Gabbriellini, R. (1999). Response to cadmium in higher plants. *Environmental and experimental botany*, 41(2), 105-130.
- El-Kafrawy, A.F., El-Saeed, S.M., Farag, R.K., El-Saied, H.A.A. and Abdel-Raouf, M.E.S. (2017). Adsorbents based on natural polymers for removal of some heavy metals from aqueous solution. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 23-32
- Feng, J., Shi, Q., Wang, X., Wei, M., Yang, F. and Xu, H. (2010). Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus L.* *Scientia Horticulturae*, 123(4), 521-530.
- Fernandes Queiroz, M., Melo, K., Sabry, D., Sasaki, G. and Rocha, H. (2015). Does the use of chitosan contribute to oxalate kidney stone formation?. *Marine drugs*, 13(1), 141-158.
- Haghiri, F. (1973). Cadmium Uptake by Plants 1. *Journal of Environmental Quality*, 2(1), 93-95.
- Haldorai, Y., Kharismadewi, D., Tuma, D. and Shim, J.J. (2015). Properties of chitosan/magnetite nanoparticles composites for efficient dye adsorption and antibacterial agent. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(8), 1688-1693.
- Hart, J.J., Welch, R.M., Norvell, W.A. and Kochian, L.V. (2002). Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings. *Physiologia Plantarum*, 116(1), 73-78.
- Helmke, P.H. and Spark, D.L. (1996). Potassium. In Sparks, D.L. et al., Method of soil analysis.

- Published by: Soil Science Society of America, Inc. *American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA*, 551-574.
- Hussain, A., Maitra, J. and Khan, K.A. (2017). Development of biochar and chitosan blend for heavy metals uptake from synthetic and industrial wastewater. *Applied Water Science*, 7(8), 4525-4537.
- Javad zarin, I., Motesharezadeh, B. and Tavizavi, M. (2016). Investigation of potassium and cadmium uptake in different wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under cadmium stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9(2), 195-204. (In Farsi)
- Kaushal, A. and Singh, S.K. (2017). Removal of heavy metals by nanoadsorbents: A review. *Journal of Environment and Biotechnology Research*, 6(1), 96-104.
- Kim, K.H., Kim, J.Y., Cho, T.S. and Choi, J.W. (2012). Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource Technology*, 118, 158-162.
- Lindsay, W.L. and Norvel, W.A. (1978). Development of a DTPA as a soil response investigation of Mn^{2+} complexation in natural and synthetic organics. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 1137-43.
- Lu, R.K. (1999). Analytical methods of soil agrochemistry. *China Agricultural Science and Technology Publishing House*. Beijing, 18-99.
- Malayoglu, U. (2018). Removal of heavy metals by biopolymer (chitosan)/nanoclay composites. *Separation Science and Technology*, 53(17), 2741-2749.
- Mok, M.C. (1994). Cytokinins and plant development—an overview. Mok, DWS; Mok, MC Cytokinins—Chemistry, activity, and function. *CRC Press, Boca Raton*, 155-166.
- Murphy, J.A.M.E.S. and Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27, 31-36.
- Najafi, Z., Golchin, A., Askari, M.S. and Alamdari, p. (2020). Comparison of the performance of different chitosan composites in removal of cadmium from contaminated soils. *Journal of Water and Soil Conservation*. (Under Review) (In Farsi)
- Nelson, R.E. (1982). Carbonate and gypsum. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, 181-197.
- Ngah, W.W., Teong, L.C., Toh, R.H. and Hanafiah, M.A.K.M. (2012). Utilization of chitosan-zeolite composite in the removal of Cu (II) from aqueous solution: adsorption, desorption and fixed bed column studies. *Chemical Engineering Journal*, 209, 46-53.
- Pham, X.N., Nguyen, T.P., Pham, T.N., Tran, T.T.N. and Tran, T.V.T. (2016). Synthesis and characterization of chitosan-coated magnetite nanoparticles and their application in curcumin drug delivery. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 7(4).
- Rayment, G.E. and Higgison, F.R. (1992). Australian laboratory handbook of Soil and water chemical methods. *Inkata Press Pty Ltd*.
- Rezakhani, L., Golchin, A. and Shafiee, S. (2012). Effect of different rates of Cd and Cu on growth and chemical composition of spinach. *Agronomy and Plant Breeding*, 8(1), 87-100. (In Farsi)
- SIRIM. (1984). Specification of powdered activated carbon MS873: Standardization and Industrial Research Institute Malaysia. *Kuala Lumpur*.
- Souza, J.F., Dolder, H., Cortelzaao, A. L. (2005). Influence of Mn toxicity on photosynthesis in *Vigna umbellata* seedlings. *Photosynthetica*, 38:449-453.
- Sposito, G., Lund, L.J. and Chang, A.C. (1982). Trace Metal Chemistry in Arid-zone Field Soils Amended with Sewage Sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in Solid Phases 1. *Soil Science Society of America Journal*, 46(2), 260-264.
- Suarez-Hernandez, L. and Barrera-Zapata, R. (2017). Morphological and physicochemical characterization of biochar produced by gasification of selected forestry species. *Revista Facultad de Ingenieria*, 26(46), 123-130.
- Sureshkumar, V., Daniel, S.K., Ruckmani, K. and Sivakumar, M. (2016). Fabrication of chitosan-magnetite nanocomposite strip for chromium removal. *Applied Nanoscience*, 6(2), 277-285.
- Tang, T. and Miller, D.M. (1991). Growth and tissue composition of rice grown in soil treated with inorganic copper, nickel, and arsenic. *Communications in soil science and plant analysis*, 22(19-20), 2037-2045.
- Tessier, A., Campbell, P.G. and Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*, 51(7), 844-851.
- Veselov, D., Kudoyarova, G., Symonyan, M. and Veselov, S. (2003). Effect of cadmium on ion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 29(3-4), 353-359.
- Walkley, A., and Black, I.A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-37.
- Wang, L., Zhou, Q., Ding, L. and Sun, Y. (2008). Effect of cadmium toxicity on nitrogen metabolism in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator. *Journal of hazardous materials*, 154(1-3), 818-825.
- Wuana, R.A. and Okieimen, F.E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices: Ecology*. 2011.
- Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A.R., Fang, J., Sun, Y. and Cao, X. (2013). Sorption of heavy metals on

chitosan-modified biochars and its biological effects. *Chemical Engineering Journal*, 231, 512-

518.