

# قابلیت جذب و پالایش فلزات سمی سنگین از پسماند صنعتی مجتمع فولاد مبارکه از طریق چندین گیاه انباشتگر

سیدمجید قادریان\*<sup>۱</sup>، سمانه نصوحی<sup>۲</sup>

۱. دانشیار گروه زیست‌شناسی دانشکده علوم دانشگاه اصفهان

s.nosouhi@yahoo.com

۲. کارشناس ارشد فیزیولوژی گیاهی دانشکده علوم دانشگاه اصفهان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۳۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۸/۴

## چکیده

فلزات سنگین به طور عمده در خاک وجود دارند، اما روند صنعتی شدن و گسترش شهرها سبب پراکنده شدن این فلزات در بیوسفر شده است. آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین نه تنها روی کیفیت محصولات کشاورزی اثر می‌گذارد، بلکه ممکن است به اتمسفر و آب‌های سطحی نیز راه یابد و در نهایت سبب به خطر افتادن سلامت انسان شود. یکی از روش‌های مؤثر پاک‌سازی مکان‌های آلوده به فلزات سنگین استفاده از تکنولوژی گیاه‌پالایی است. در این تحقیق با کشت گیاهان کیسه‌چوپان، ذرت، آفتابگردان، منداب، کلزا، تاج‌ریزی و چلیپای زرد روی سه نوع پسماند مجتمع فولاد مبارکه قابلیت استقرار، جذب و پالایش فلزات سنگین بررسی شد. از بین گونه‌های کشت‌داده شده روی پسماند صنعتی نوع اول بیشترین مقدار جذب روی، سرب، کروم و نیکل مربوط به کیسه‌چوپان به مقدار ۹۱/۵، ۷۴، ۶۳۷ و ۲۲۶/۳ میکروگرم در گرم بود، اما این گونه فاقد رشد رویشی مناسب در این نوع پسماند بود. ذرت، آفتابگردان، منداب و کلزا دارای رشد رویشی مناسب بودند و در جذب فلزات سنگین از این نوع پسماند نیز توانایی داشتند. در بین گونه‌های رشد یافته روی پسماند صنعتی نوع دوم بیشترین مقدار جذب روی و سرب مربوط به گونه ذرت به مقدار ۴۰/۱ و ۹۸ میکروگرم در گرم و بیشترین مقدار جذب کروم و نیکل مربوط به منداب به مقدار ۱۱۷/۲ و ۱۲۱/۲ میکروگرم در گرم بود. با وجود این که ذرت و منداب نسبت به آفتابگردان در جذب بعضی از فلزات موفقیت بیشتری داشته‌اند، اما آفتابگردان تنها گونه‌ای بود که توانست روی این پسماند رشد رویشی زیاد داشته باشد و زیست‌توده بالایی تولید کند. در بین گونه‌های کشت‌داده شده روی پسماند واحد گالوانیزه (نوع سوم) فقط ذرت قابلیت رشد روی این پسماند را داشت و میزان جذب کروم از طریق آن ۳۰۹ میکروگرم در گرم اندازه‌گیری شد.

## کلیدواژه

پسماند مجتمع فولاد مبارکه، گیاه‌پالایی، فلزات سنگین.

## ۱. سرآغاز

می‌گذارد، بلکه ممکن است به اتمسفر و آب‌های سطحی نیز راه یابد و در نهایت سبب به خطر افتادن سلامت انسان شود (Chen, et al., 2000). با اینکه روش‌های پاک‌سازی خاک از فلزات سنگین پیشرفت‌های زیادی کرده‌اند، اما اغلب این روش‌ها هزینه‌های بالایی دارند و سبب آسیب‌های زیست‌محیطی می‌شوند (Pulford, et al., 2002). گیاه‌پالایی از اوایل دهه ۱۹۸۰ به‌منزله تکنولوژی مهم برای زدایش خاک‌های آلوده مطرح شد (Shuhe, et al., 2005). از مهم‌ترین جنبه‌های این تکنولوژی، استخراج

فلزات سنگین به طور عمده در سنگ‌ها وجود دارند، اما روند صنعتی شدن و گسترش شهرها سبب پراکنده شدن این فلزات در بیوسفر شده است (Nagajyoti, et al., 2010). فعالیت‌های کشاورزی، برای مثال استفاده از کود و بقایای گیاهان، همچنین فعالیت‌های صنعتی، مانند معادن و صنایع ذوب فلزات سبب آلوده شدن خاک به فلزات سنگین می‌شوند (Schwartz, et al., 1999). آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین نه تنها در کیفیت محصولات کشاورزی اثر

است (Luo, et al., 2005). هدف از تحقیق حاضر بررسی مقاومت، قابلیت جذب و تجمع عناصر روی، سرب، کروم، کادمیوم و نیکل از طریق گونه‌های گیاهی کیسه‌چوپان، ذرت، آفتابگردان، منداب، کلزا، تاج‌ریزی و چلیپای زرد روی پسماند حاوی فلزات سنگین مجتمع فولاد مبارکه است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. جمع‌آوری نمونه‌های پسماند و آماده‌سازی آن

مجتمع فولاد مبارکه در حاشیه شهرستان مبارکه قرار دارد و بزرگ‌ترین مجتمع صنعتی ایران است. مجتمع فولاد مبارکه دارای ظرفیت تولید سالانه ۵/۳۳ میلیون تن انواع محصولات فولادی تخت گرم و سرد نوردیده، قلع‌اندود، گالوانیزه و رنگی از ضخامت ۰/۱۸ تا ۱۶ میلی‌متر است. برای انجام این تحقیق ۳ نمونه پسماند شامل پسماند صنعتی نوع اول، پسماند صنعتی نوع دوم و پسماند واحد گالوانیزه از ۳ لاگون تبخیری این مجتمع جمع‌آوری شد. پس از انتقال پسماند صنعتی فولاد مبارکه به آزمایشگاه، حالت کلوخی آن با کوبیدن یکنواخت شد تا به صورت بافت خاک درآمد. پسماند حاصل از واحد گالوانیزه، به علت داشتن حالت لجنی و مرطوب در مجاورت نور خورشید خشک شد.

### ۲.۲. اندازه‌گیری pH پسماند

برای اندازه‌گیری pH مقدار ۱۰ گرم از نمونه مورد نظر با غربال ۲ میلی‌متری غربال شد. سپس، با ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر به خوبی مخلوط و پس از ۳۰ دقیقه pH محلول رویی با استفاده از pH متر اندازه‌گیری شد.

### ۲.۳. اندازه‌گیری مقدار عناصر در حالت کل پسماند

ابتدا نمونه‌های پسماند با غربال ۲ میلی‌متری غربال و حدود ۵ گرم از هر نمونه در هاون چینی به خوبی ساییده و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت در آون خشک شد. سپس، ۵۰۰ میلی‌گرم از پسماند حاصل را در داخل لوله آزمایش ریخته و به هر لوله ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۳۷

گیاهی<sup>۱</sup> است که از گیاهان بیش‌انباشتگر برای زدایش فلزات سنگین از مکان‌های آلوده استفاده می‌شود. با این حال گیاهان بیش‌انباشتگر رشد آهسته‌ای دارند، زیست‌توده خیلی کمی تولید می‌کنند و پراکنندگی کمی در سراسر جهان دارند. به تازگی در گیاه‌پالایی به گیاهان انباشتگری که زیست‌توده زیادی تولید می‌کنند، رشد سریعی دارند و متحمل به فلزات باشند توجهات زیادی شده است (Luo, et al., 2005). از خانواده شب‌بو (Brassicaceae) ۴ گونه کیسه‌چوپان (*Thlaspi caerulescens*)، چلیپای زرد (*Matthiola Chenopodiifolia*)، منداب (*Eruca sativa*) و کلزا (*Brassica napus*) انتخاب شد. کیسه‌چوپان اغلب در خاک‌های غنی از روی، سرب، مس و کادمیوم یافت می‌شود که اغلب از طریق فعالیت‌های معدن‌کاری آلوده شده‌اند (Knight, et al., 1997). چلیپای زرد دارای پتانسیل بالایی برای تجمع سرب و روی در برگ‌های خود است. در تحقیقی دیگر در شرایط کشت آزمایشگاهی توانایی نسبتاً بالای این گیاه در جذب و تجمع کادمیوم مشاهده شده است (قادریان و جمالی‌حاجیانی، ۱۳۸۹). منداب از گونه‌های متحمل محسوب می‌شود و دارای قابلیت تجمع سرب و کادمیوم از خاک‌های آلوده است (Amal, 2001). کلزا دارای قابلیت تجمع کادمیوم و روی است و این فلزات را به قسمت‌های هوایی خود منتقل می‌کند (Rossi, et al., 2002). از خانواده سیب‌زمینی (Solanaceae) تاج‌ریزی (*Solanum nigrum*) انتخاب شد که این گونه گیاهی اغلب در مناطق آلوده به فلزات یافت می‌شود و به تازگی به‌منزله بیش‌انباشتگر فلز کادمیوم معرفی شده است (Peng, et al., 2009). این گیاه قادر به جذب روی، سرب و مس نیز است. از خانواده کاسنی (Asteraceae) گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus*) انتخاب شد که قابلیت ایجاد زیست‌توده زیادی دارد (Meers, et al., 2005) و در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین دارای تحمل بالاست (Madejon, et al., 2003; Murillo, et al., 1999). از خانواده گندمیان (Poaceae) ذرت (*Zea mays*) انتخاب شد. این گونه دارای قابلیت تولید زیست‌توده به میزان زیاد

## ۵.۲. اندازه‌گیری مقدار فلزات سنگین در نمونه‌های گیاهی

برای اندازه‌گیری مقدار فلزات سنگین (روی، سرب، کروم، کادمیوم و نیکل) در گیاه ابتدا بخش هوایی در فاصله ۱ سانتی متری از سطح محیط کشت جداسازی و ۳ بار با آب مقطر شستشو داده شد. سپس، نمونه‌های گیاهی داخل پاکت‌های کاغذی قرار گرفتند و ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. سپس، حدود ۱/۱ گرم از بخش‌های هوایی هر نمونه توزین و به کوره الکتریکی با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت منتقل شد. سپس، ۱۰ سی‌سی  $HNO_3$  به هر نمونه اضافه شد و پس از آن نمونه‌ها با قیف شیشه‌ای و کاغذ صافی واتمن ۹ سانتی‌متری (واتمن، ۳۹) صاف شدند (Reeves, et al., 1999). عناصر مورد نظر از طریق دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (مدل Shimadzu AA 6200) آنالیز شدند.

## ۶.۲. آنالیز آماری داده‌ها

در این تحقیق طرح به‌کاررفته کاملاً تصادفی در ۳ تکرار بوده است و آنالیز داده‌ها از طریق نرم‌افزار SPSS 16.0 و مقایسه میانگین‌ها به روش Duncan با ضریب معنی‌داری  $P \leq 0.05$  انجام شد.

## ۳. نتایج

### ۱.۳. مقدار فلزات سنگین و pH در نمونه‌های پسماند

مقدار فلزات سنگین روی، سرب، کروم، کادمیوم و نیکل در نمونه پسماند صنعتی نوع اول به ترتیب ۲۰، ۲۸، ۲۰ و ۱۱۸ میکروگرم در گرم پسماند اندازه‌گیری شد. pH پسماند برابر ۸/۴ بود. در پسماند صنعتی نوع دوم مقدار فلزات سنگین روی، سرب، کروم، کادمیوم و نیکل در این نمونه پسماند به ترتیب ۶۸، ۷، ۱۹، ۲۱ و ۱۱۵ میکروگرم در گرم پسماند اندازه‌گیری شد. pH پسماند برابر ۸/۸ بود. در پسماند واحد گالوانیزه مقدار فلزات سنگین روی، سرب، کروم، کادمیوم و نیکل به ترتیب در این نمونه پسماند ۳۵۳، ۵۵، ۱۷۶۸، ۲۲ و ۱۱۴ میکروگرم در گرم پسماند اندازه‌گیری شد. pH پسماند برابر ۹/۲ بود (جدول ۱).

درصد و اسید نیتریک ۶۵ درصد به نسبت ۳ به ۱ اضافه شد. لوله‌ها به مدت ۱۲ ساعت در زیر هود قرار داده شدند. بعد از آن به مدت ۱ ساعت در حمام شنی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا پسماند به خوبی تجزیه شود. محلول حاصل در بالن ژوژه ۵۰ میلی‌متری از طریق قیف شیشه‌ای و کاغذ صافی ۹ سانتی‌متری صاف شد و با آب مقطر ۲ بار تقطیر به حجم رسید (Baker, et al., 1994). سپس، نمونه‌ها با دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (مدل Shimadzu AA 6200) برای عناصر روی، سرب، کروم، کادمیوم، نیکل و کبالت آنالیز شدند.

## ۴.۲. کشت گونه‌های گیاهی

در آزمایش اول گلدان‌های مجزای ۹ سانتی‌متری با پسماند صنعتی اول، پسماند صنعتی دوم و پسماند واحد گالوانیزه پر شد و هر یک از گونه‌های گیاهی کیسه‌چوپان، ذرت، آفتابگردان، منداب، کلزا، تاج‌ریزی و چلیپای زرد را در آن‌ها کشت داده و برای هر گونه ۳ تکرار آماده شد. گیاهان ۴۰ روز با افزودن آب مقطر با فاصله ۴ روز یک‌بار در گلدان‌های ذکرشده رشد داده شدند. به گیاهان رشدکرده روی پسماند مواد غذایی  $Ca(NO_3)_2$  و  $KNO_3$ ،  $KH_2PO_4$ ، ۲/۴۶، ۴/۷۲ و ۲/۲۷ گرم در لیتر با pH ۶ به میزان ۱۰۰ میلی‌لیتر ۸ روز یک‌بار به جای آب مقطر به گلدان‌ها اضافه شد. در آزمایش دوم به علت رشد نکردن گونه‌های گیاهی روی پسماند واحد گالوانیزه مخلوط ۵۰ درصد پرلیت و ۵۰ درصد پسماند مذکور برای ۷ گونه گیاهی و برای هر گونه با ۳ تکرار آماده و کشت شد. گونه‌ها ۴۰ روز در محیط گلخانه‌ای و افزودن آب مقطر با فاصله ۴ روز یک‌بار رشد یافتند. مواد غذایی مذکور با غلظت‌های بالا نیز ۸ روز یک‌بار به جای آب مقطر اضافه شدند. کشت گونه‌های مورد نظر در اتاق کشت با تناوب نوری (۱۶ ساعت نور)، دمای متناوب ۲۰/۱۵ درجه سانتی‌گراد (شب و روز) و شدت نور ۲۰۰ میکرومول فوتون بر متر مربع بر ثانیه انجام شد.

جدول ۱. مقدار فلزات سنگین (میکروگرم در گرم) و pH نمونه‌های پسماند. مقادیر شامل میانگین سه تکرار ± انحراف معیار است.

نوع پساب	Zn	Pb	Cr	Cd	Ni	pH
پسماند صنعتی نوع اول	۷۲ ± ۳	۲۰ ± ۱۰/۱	۲۸ ± ۹/۶	۲۰ ± ۵	۱۱۸ ± ۵/۱	۸/۴
پسماند صنعتی نوع دوم	۶۸ ± ۳/۸	۷ ± ۲/۵	۱۹ ± ۱۹/۳	۲۱ ± ۸	۱۱۵ ± ۱/۸	۸/۸
پسماند واحد گالوانیزه	۳۵۳ ± ۱۰۹/۵	۵۵ ± ۸/۷	۱۷۶۸ ± ۵۱۲/۴	۲۲ ± ۶	۱۱۴ ± ۸/۴	۹/۲

جدول ۲. وزن خشک نمونه‌های گیاهی رشد کرده روی سه نوع پسماند به مدت ۴۰ روز (میلی گرم در گیاه)

درت	آفتابگردان	کیسه‌چوپان	تاج‌ریزی	منداب	کلزا	چلیپای زرد
۸۰۰ ± ۱۲	۹۱۰ ± ۱۳/۲	۱ ± ۲	۱۰ ± ۳	۳۰ ± ۵	۳۰ ± ۲/۱	۱ ± ۱
۱۷۰ ± ۱۰	۶۰۰ ± ۱۲	رشد نکرد	رشد نکرد	۵۱ ± ۷/۷	رشد نکرد	رشد نکرد
۹۰۰ ± ۱۳	رشد نکرد	رشد نکرد	رشد نکرد	رشد نکرد	رشد نکرد	رشد نکرد

درت به مقدار ۱۲/۸ میکروگرم در گرم بوده است (شکل ۱). مقدار سرب جذب شده در کیسه‌چوپان از سایر گونه‌ها بیشتر و به مقدار ۷۴ میکروگرم در گرم پسماند است. پس از آن منداب و تاج‌ریزی به ترتیب با جذب ۳۰ و ۲۸/۳ میکروگرم در گرم پسماند قرار دارند. کمترین جذب مربوط به آفتابگردان به مقدار ۹/۲ میکروگرم در گرم پسماند بوده است (شکل ۲). مقدار تجمع کروم در کیسه‌چوپان نسبت به بقیه گونه‌ها بیشتر بوده و به مقدار ۶۳۷ میکروگرم در گرم پسماند صورت گرفته است. پس از آن چلیپای زرد با جذب ۱۶۶/۲ میکروگرم در گرم پسماند قرار دارد. کمترین مقدار جذب مربوط به کلزا، منداب، تاج‌ریزی، درت و آفتابگردان به ترتیب با مقادیر جذب ۹۸، ۸۸/۲، ۸۱/۷، ۸۱/۷ و ۷۸/۴ میکروگرم در گرم پسماند بوده است (شکل ۳). مقدار تجمع کادمیوم در کلزا نسبت به بقیه گونه‌ها بیشتر بوده و به مقدار ۶/۶ میکروگرم در گرم پسماند است. کمترین مقدار جذب این فلز مربوط به تاج‌ریزی و آفتابگردان با جذب ۱/۶ و ۱/۴ میکروگرم در گرم پسماند بوده است (شکل ۴). مقدار تجمع نیکل در کیسه‌چوپان نسبت به بقیه گونه‌ها بیشتر بوده و به مقدار ۲۲۶/۳ میکروگرم در گرم پسماند صورت گرفته است. در مقدار جذب این فلز بین بقیه گونه‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و مقدار جذب در چلیپای زرد، کلزا،

### ۲.۳. میانگین وزن خشک نمونه‌های گیاهی

#### رشد کرده روی نمونه‌های پسماند

با کشت گونه‌های گیاهی روی پسماند صنعتی نوع اول بیشترین میانگین وزن خشک مربوط به آفتابگردان به مقدار ۹۱۰ میلی‌گرم در گیاه و کمترین آن مربوط به چلیپای زرد و کیسه‌چوپان به مقدار ۱ میلی‌گرم در گیاه است. روی پسماند صنعتی نوع دوم بیشترین میانگین وزن خشک در بین گونه‌ها مربوط به آفتابگردان به مقدار ۶۰۰ میلی‌گرم در گیاه و کمترین آن مربوط به منداب به مقدار ۵۱ میلی‌گرم در گیاه است. روی ۵۰ درصد پسماند واحد گالوانیزه و ۵۰ درصد پرلیت فقط درت قادر به رشد بوده و میانگین وزن خشک این گونه گیاهی روی این پسماند ۹۰۰ است (جدول ۲).

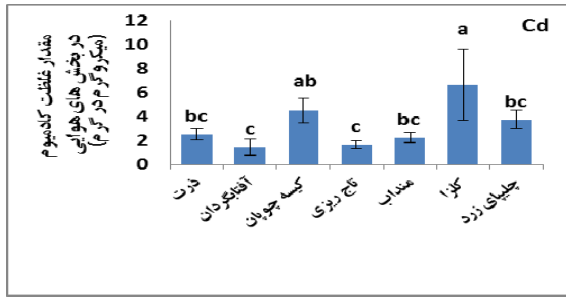
### ۴. مقدار فلزات سنگین در نمونه‌های گیاهی

#### رشد کرده روی نمونه‌های پسماند

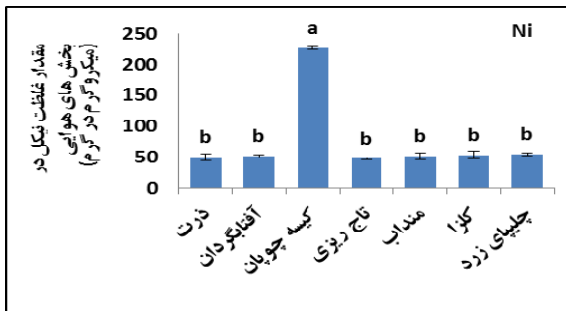
#### ۱.۴. مقدار فلزات سنگین در نمونه‌های گیاهی

#### رشد کرده روی پسماند صنعتی (نوع اول)

بیشترین مقدار تجمع فلز روی مربوط به کیسه‌چوپان به مقدار ۹۱/۵ میکروگرم در گرم پسماند است. پس از آن تاج‌ریزی بیشترین مقدار جذب را به مقدار ۳۵/۲ میکروگرم در گرم پسماند داشته است. کمترین جذب روی مربوط به



شکل ۴. مقدار غلظت کادمیوم انباشت شده در بخش‌های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع اول) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).

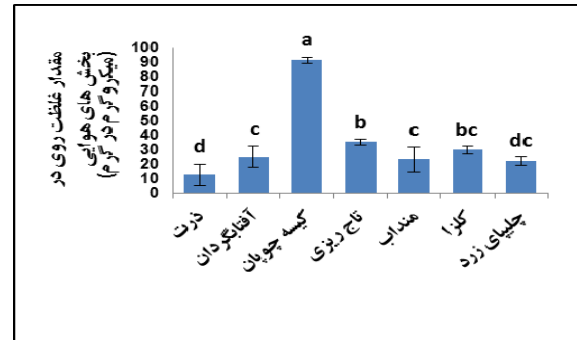


شکل ۵. مقدار غلظت نیکل انباشت شده در بخش‌های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع اول) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).

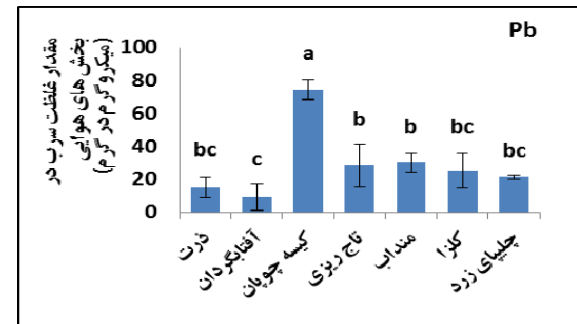
## ۲.۴. مقدار فلزات سنگین در نمونه‌های گیاهی رشد کرده روی پسماند صنعتی (نوع دوم)

بیشترین مقدار تجمع روی مربوط به ذرت به مقدار ۴۰/۱ میکروگرم در گرم است (شکل ۶). بیشترین مقدار تجمع سرب در ذرت به مقدار ۵۹/۲ میکروگرم در گرم پسماند صورت گرفته است (شکل ۷). بیشترین مقدار تجمع کروم مربوط به منداب به مقدار ۱۱۷/۲ میکروگرم در گرم پسماند است (شکل ۸). در جذب کادمیوم بین گونه‌ها اختلاف معنی داری مشاهده نشد و مقدار جذب در ذرت، آفتابگردان و منداب به ترتیب ۱۲/۲، ۱۴/۹ و ۱۴ میکروگرم در گرم پسماند است (شکل ۹). بیشترین مقدار تجمع نیکل مربوط به منداب به مقدار ۱۲۱/۲ میکروگرم در گرم پسماند است (شکل ۱۰).

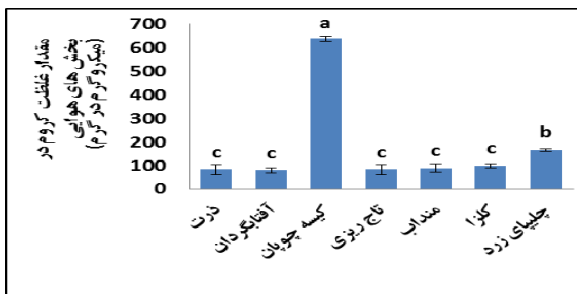
آفتابگردان، منداب، ذرت و تاج ریزی به ترتیب به مقدار ۵۴/۱، ۵۱/۲، ۵۱/۲ و ۴۹/۵ میکروگرم در گرم پسماند صورت گرفته است (شکل ۵).



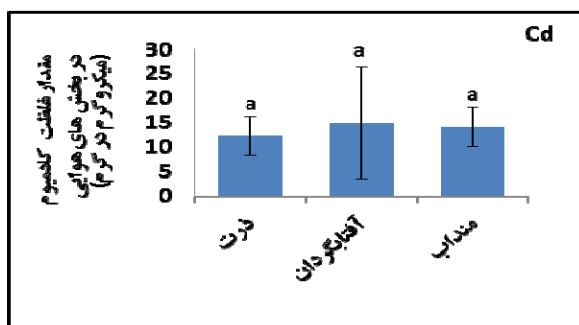
شکل ۱. مقدار غلظت روی انباشت شده در بخش‌های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع اول) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).



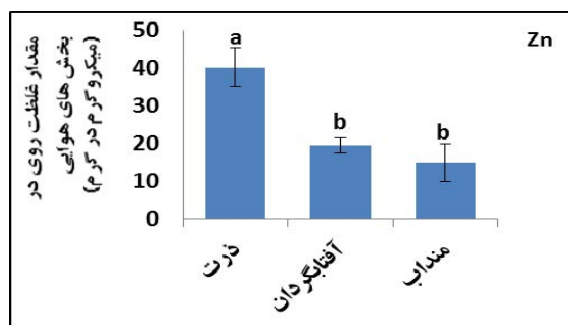
شکل ۲. مقدار غلظت سرب انباشت شده در بخش‌های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع اول) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).



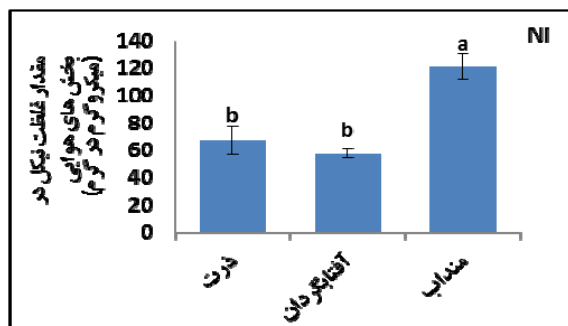
شکل ۳. مقدار غلظت کروم انباشت شده در بخش‌های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع اول) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).



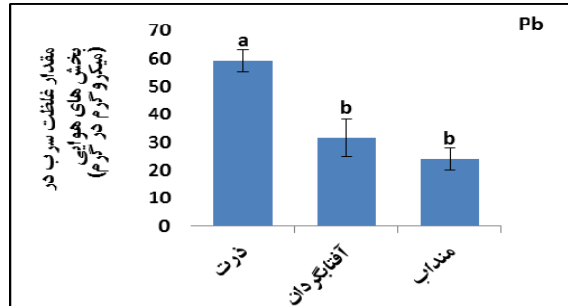
شکل ۹. مقدار غلظت کادمیوم انباشت شده در بخش های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع دوم) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).



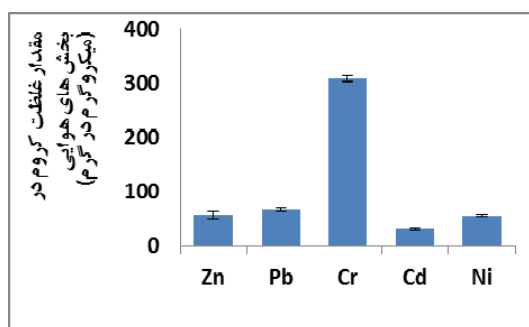
شکل ۶. مقدار غلظت روی انباشت شده در بخش های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع دوم) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).



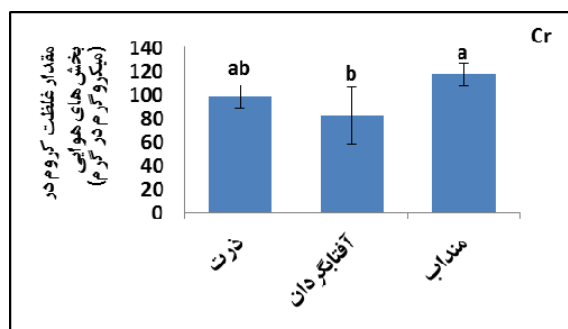
شکل ۱۰. مقدار غلظت نیکل انباشت شده در بخش های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع دوم) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).



شکل ۷. مقدار غلظت سرب انباشت شده در بخش های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع دوم) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).



شکل ۱۱. مقدار فلزات سنگین انباشت شده در گونه گیاهی ذرت رشد کرده روی ۵۰ درصد پسماند واحد گالوانیزه و ۵۰ درصد پرلیت به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است.



شکل ۸. مقدار غلظت کروم انباشت شده در بخش های هوایی گیاهان رشد یافته روی پسماند صنعتی فولاد (نوع دوم) به مدت ۴۰ روز. مقادیر شامل میانگین ۳ تکرار  $\pm$  انحراف معیار است (نبود حروف مشترک بیانگر تفاوت معنی دار بین گیاهان مختلف است).

آفتابگردان بود. روی پسماند صنعتی واحد گالوانیزه هیچ‌یک از گونه‌ها قابلیت رشد را نداشتند به همین منظور گونه‌ها مجدداً روی مخلوط ۵۰ درصد پسماند و ۵۰ درصد پرلیت کشت داده شدند و فقط ذرت قابلیت رشد و تولید زیست‌توده بالایی داشت.

پسماند صنعتی نوع اول نسبت به دو نوع پسماند دیگر دارای محیط مساعدتری برای رشد گیاهان بوده و این به این علت است که پسماند صنعتی نوع اول دارای pH کمتر قلیایی (۸/۴) است. همچنین، لاگون‌های حاوی این پسماند قبل از تزریق موادی مانند آهک، اسید سولفوریک و کلورفریک قرار می‌گیرند که آثار منفی روی رشد گیاهان دارند. لاگون حاوی پسماند صنعتی نوع دوم دارای pH بیشتر است (۸/۸) و فرایندهایی چون تزریق موادی مانند آهک، اسید سولفوریک و کلورفریک و رشد گیاهان روی آن کمتر انجام می‌شود. لاگون‌های حاوی پسماند واحد گالوانیزه علاوه بر داشتن pH به شدت قلیایی (۹/۲)، مقدار کروم بالایی دارند و روی رشد گیاهان به شدت اثر می‌گذارند، به طوری که پس از رشد محور ریشه و جذب مواد از محیط کشت، گیاهان خشک می‌شوند.

از بین گونه‌های کشت‌داده‌شده روی پسماند صنعتی نوع اول بیشترین مقدار جذب روی، سرب، کروم و نیکل مربوط به کیسه‌چوپان به مقدار ۹۱/۵، ۷۴، ۶۳۷ و ۲۲۶/۳ میکروگرم در گرم بوده است و در تجمع کادمیوم در رتبه دوم قرار دارد و به مقدار ۴/۵ میکروگرم در گرم صورت گرفته است. این گیاه قابلیت رشد روی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین روی، سرب، کادمیوم، کروم، نیکل و مس را داراست (Baker and Proctor, 1990; Baker, et al., 1994). همچنین، به‌منزله گیاه بیش‌انباشتگر روی و کادمیوم شناخته شده است که قادر به تجمع بیش از ۱۰ هزار میکروگرم در گرم روی و بیش از ۱۰۰۰ میکروگرم در گرم

### ۳.۴. مقدار فلزات سنگین در نمونه گیاهی رشد کرده روی پسماند واحد گالوانیزه

تنها گونه‌ای که قادر به رشد روی مخلوط ۵۰ درصد پسماند و ۵۰ درصد پرلیت ذرت است مقدار جذب فلزات سنگین در آن به این قرار است: روی ۵۷، سرب ۶۸، کروم ۳۰۹، کادمیوم ۳۲/۵ و نیکل ۵۵/۴ میکروگرم در گرم پسماند (شکل ۱۱).

### ۵. بحث

فلزات سنگین همچون روی، سرب، کادمیوم، مس، نیکل و کروم که در اثر فعالیت معادن یا صنایع ذوب فلزات ایجاد می‌شوند سبب ایجاد آسیب‌های زیست‌محیطی فراوان شده و سلامتی انسان را به خطر می‌اندازند (Escarre, et al., 2000). آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین سبب ایجاد آثار سوء در اتمسفر، آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، محصولات کشاورزی، پوشش گیاهی و سلامتی جانوران و انسان می‌شود. با اندازه‌گیری مقدار فلزات سنگین در سه نوع پسماند مشخص شد که در پسماند صنعتی نوع اول فلزات کادمیوم و نیکل به ترتیب به مقدار ۲۰ و ۱۱۸ میکروگرم در گرم و در پسماند صنعتی نوع دوم به ترتیب به مقدار ۲۱ و ۱۱۵ میکروگرم در گرم در آن حضور دارند. در پسماند واحد گالوانیزه فلزات روی، کروم، کادمیوم و نیکل به ترتیب به مقدار ۳۵۳، ۱۷۶۸، ۲۲ و ۱۱۴ میکروگرم در گرم حضور داشتند. مقدار مجاز فلزات سنگین روی، سرب، کروم، کادمیوم و نیکل در خاک به ترتیب ۳۰۰-۱۰، ۲۰۰-۱۵۰، ۳ و ۷۵ میکروگرم در گرم است (Nagajyoti, et al., 2010). از بین گونه‌های کشت‌داده‌شده روی پسماند صنعتی نوع اول آفتابگردان دارای بیشترین رشد رویشی بود. این در حالی است که روی پسماند صنعتی نوع دوم تنها آفتابگردان، ذرت و منداب قابلیت رشد و استقرار را داشتند که بیشترین وزن خشک مربوط به

زیست‌توده زیاد، قابلیت رشد روی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین را داراست و گونه‌ای مناسب برای استخراج گیاهی فلزات سنگین محسوب می‌شود. در بین گونه‌های کشت‌داده شده روی ۵۰ درصد پسماند واحد گالوانیزه و ۵۰ درصد پرلیت فقط ذرت قابلیت رشد داشت که با توجه به مقدار بالابودن کروم این نوع پسماند مقدار کروم جذب شده از طریق این گیاه نیز بالا بوده است. ذرت به علت تولید زیست‌توده زیاد گونه‌ای مناسب برای گیاه‌پالایی محسوب می‌شود (Luo, et al., 2005).

### ۶. نتیجه‌گیری

با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از گونه‌های کاشته شده روی سه نوع پسماند مجتمع فولاد مبارکه می‌توان چنین گفت که از بین گونه‌های کاشته شده روی پسماند صنعتی نوع اول ذرت، آفتابگردان، منداب و کلزا گونه‌هایی مناسب برای گیاه‌پالایی از پسماند صنعتی نوع اول، آفتابگردان گونه‌ای مناسب برای گیاه‌پالایی از پسماند صنعتی نوع دوم و ذرت گونه‌ای مناسب برای گیاه‌پالایی از پسماند واحد گالوانیزه است.

### سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان برای مهیا کردن امکانات پژوهشی این پروژه و از مجتمع صنعتی فولاد مبارکه به منظور در اختیار گذاشتن پسماند صنعتی کمال تشکر را داریم. از قطب تنش‌های گیاهی دانشگاه اصفهان نیز برای انجام این پروژه بسیار سپاسگزاریم.

### یادداشت

#### 1. Phytoextraction

کادمیوم است (Knight, et al., 1997; McGrath, et al., 1997; Meerts and Van Isacker, 1997; Escarre, et al., 2000). کلزا در جذب کادمیوم نسبت به بقیه گونه‌ها موفق‌تر بوده است و مقدار جذب این فلز در آن ۶/۶ میکروگرم در گرم صورت گرفته است. Marchio و همکارانش (۲۰۰۴) خانواده Brassicaceae به خصوص سه گونه *Raphanus sativa* و *Brassica juncea*، *B. napus* را به‌منزله گونه‌های مناسب برای گیاه‌پالایی پسماند پیشنهاد کردند. گونه‌های دیگر جذب فلزات سنگین را انجام داده‌اند، اما گونه بیش‌انباشتگر کیسه‌چوپان بیشترین موفقیت را داشته است. در عوض این گونه قابلیت رشد کمی روی پسماند داشت و در تولید زیست‌توده زیاد، ناموفق بود (وزن خشک ۱ میلی‌گرم در گیاه) و برای گیاه‌پالایی روی پسماند گونه مناسبی محسوب نمی‌شود. تاج‌ریزی و چلیپای زرد نیز فاقد رشد رویشی مناسب بودند (به ترتیب وزن خشک ۱۰ و ۱ میلی‌گرم در گیاه). از بین گونه‌ها ذرت، آفتابگردان، منداب و کلزا دارای رشد رویشی مناسب و جذب فلزات سنگین بودند. در بین گونه‌های رشدیافته روی پسماند صنعتی نوع دوم بیشترین مقدار جذب روی و سرب مربوط به ذرت به مقدار ۴۰/۱ و ۹۸ میکروگرم در گرم و بیشترین مقدار جذب کروم و نیکل مربوط به منداب به مقدار ۱۱۷/۲ و ۱۲۱/۲ میکروگرم در گرم بوده است. در جذب کادمیوم بین گونه‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و تقریباً همگی در یک سطح جذب را انجام داده‌اند. با توجه به ویژگی‌های این نوع پسماند و شرایط نامساعد آن فقط آفتابگردان نسبت به دو گونه دیگری مقاومت بیشتری نشان داد و با این حال توانست رشد رویشی بالایی داشته باشد و زیست‌توده زیادی تولید کند. به گفته Meers و همکارانش (۲۰۰۵) گیاه آفتابگردان علاوه بر تولید



## منابع

- قادریان، س. م؛ جمالی حاجیانی، ن. ۱۳۸۹. «بررسی مقاومت، جذب و انباشتگی کادمیوم در گیاه *Matthiola chenopodiifolia* Fisch Mey (Brassicaceae) & C. A.»، زیست‌شناسی گیاهی، شماره ششم، ص ۸۷ تا ۹۸.
- Amal,A.H.S. 2001. Effect of Cd and Pb on growth, certain antioxidant enzymes activity, protein profile and accumulation of Cd, Pb and Fe in *Raphanus sativus* and *Eruca sativa* seedlings, Egyptian Journal of Biology, 3, 131-139.
- Baker,A.J.M., and Proctor,J. 1990. The Influence of cadmium, Copper, Lead and zinc on the distribution and evolution of metallophyte in the British isles, Plant Systematic and Evolution, 173: 91-108.
- Baker,A.J.M., Reeves,R.D., and Hajar,A.S.M. 1994. Heavy metals accumulation and Tolerance British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* j. & C. presl (Brassicaceae), New phytologist, 127: 61-68.
- Chen,H.M., Zheng,C.R., Tu,C., and Shen,Z.G. 2000. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals, Chemosphere, 41: 229-234.
- Escarre,J., Lefebvre,C., Gruber,W., Leblanc,M., Lepart,J., Riviere,Y., and Delay. 2000. Zinc and cadmium hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens* from metalicolous and nonmetalliferous sites in the Mediterranean: implications for phytoremediation, New Phytologist, 145: 429-437.
- Knight,B., Zhao,F.J., McGrath,S.P., and Shen,Z.G. 1997. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil Solution, Plant and Soil, 197: 71-78.
- Luo,C., Shen,Z., and Li,X. 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS, Chemosphere, 59: 1-11.
- Madejon,P., Murillo,J.M., Maranon,T., Cabrera,F., and Soriano,M.A. 2003. Trace element and nutrient accumulation in sunflower plants two years after the Aznalcollar mine spill, Science of The Total Environment, 30: 239-257.
- Marchiol,L., Assolari,S., Sacco,P., and Zerbi,G. 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil, Environmental Pollution, 132: 21-27.
- McGrath,S.P., Shen,Z.G., and Zhao,F.J. 1997. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ocbroleucum* growing contaminated Soils, Plant and Soil, 188: 153-159.
- Meers,E., Ruttens,A., Hopgood,M.J., Samson,D., and Tack,F.M.G. 2005. Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals, Chemosphere, 58: 1011-1022.
- Meerts,P., and Van Isacker,N. 1997. Heavy metal tolerance and accumulation in metalicolous and non-metallicolous population of *Thlaspi caerulescens* from continental Europe, Plant Ecology,133: 221-231.
- Murillo,J.M., Maranon,T., Cabrera,F. and Lopez,R. 1999. Accumulation of heavy metals in sunflower and sorghum plants affected by the Guadiamar spill, Science of The Total Environment, 242: 281-292.
- Nagajyoti,P.C., Lee,K.D., and Sreekanth,T.V.M. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review, Environmental Chemistry Letters, 8: 199-216.
- Peng,K.J., Luo,C.L., Chen,Y.H., Wang,G.P., Li,X.D, and Shen,Z.G. 2009. Cadmium and Other Metal Uptake by *Lobelia chinensis* and *Solanum nigrum* from Contaminated Soil, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 83: 260-264.

Pulford,I.D., Riddell-Blackb,D., and Stewart,T.V.M. 2002. Heavy Metal Uptake by Willow Clones from Sewage Sludge-Treated Soil: The Potential for Phytoremediation, International Journal of Phytoremediation, 4: 59 -72.

Reeves,R.D., Baker,A.J.M, Borhidi,A., and Berazain,R. 1999. Nickel hyperaccumulation in serpentin flora of Cubq, Annals of Botany, 83: 29-38.

Rossi,G., Figlilolia,A., Sosciarelli,S., and Pennelli,B. 2002. Capability of *Brassica napus* to Accumulate Cadmium, Zinc and Copper from Soil, Acta Biotechnologica, 22: 133-140.

Schwartz,C., Morel,J.L., Saumier,S., Whiting,S.N., and Baker,A.J.M. 1999. Root development of the Zinc-hyperaccumulator plant *Thlaspi caerulescens* as affected by metal origin, content and localization in soil, Plant and Soil, 208: 103-115.

Shuhe,W., Qixing,Z., Xin,W., kaisong, Z., Guanlin,G., and Qiying,M.L. 2005. A newly-discovered Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. Chinese Science Bulletin 50: 33-38.